

doi: 10.12029/gc20200417

杨海星, 高利东, 高玉石, 隋海涛, 柳志辉, 赵志飞, 吕晶, 张维宇, 赵胜金, 于海洋. 2020. 内蒙古霍林河地区晚石炭世本巴图组火山岩年代学、地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 47(4): 1173-1185.

Yang Haixing, Gao Lidong, Gao Yushi, Sui Haitao, Liu Zhihui, Zhao Zhifei, Lü Jing, Zhang Weiyu, Zhao Shengjin, Yu Haiyang. 2020. The chronology, geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Benbatu Formation of Huolinhe area, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 47(4):1173-1185(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古霍林河地区晚石炭世本巴图组火山岩年代学、地球化学特征及构造背景

杨海星<sup>1</sup>, 高利东<sup>1</sup>, 高玉石<sup>1</sup>, 隋海涛<sup>1</sup>, 柳志辉<sup>1</sup>, 赵志飞<sup>1</sup>,  
吕晶<sup>1</sup>, 张维宇<sup>1</sup>, 赵胜金<sup>1,2</sup>, 于海洋<sup>1</sup>

(1. 内蒙古第十地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 赤峰 024005; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 在内蒙古东部霍林河地区晚古生代地层中厘定出一套火山岩, 其 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为  $(313.7 \pm 3.5)$  Ma, 时代归属晚石炭世。岩石学、岩石地球化学特征表明: 研究区本巴图组火山岩主要由安山岩、玄武安山岩组成, 属准铝质碱性系列岩石, SiO<sub>2</sub> 含量 52.83%~54.76%, 具较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 (17.43%~20.79%), TiO<sub>2</sub> 含量 (0.97%~1.41%) 较低, Na<sub>2</sub>O (3.74%~4.21%) > K<sub>2</sub>O (2.37%~3.02%)。稀土总量 ( $\Sigma$ REE) 较高, 为  $46.78 \times 10^{-6} \sim 124.36 \times 10^{-6}$ , 轻稀土 (LREE) 富集 ( $42.57 \times 10^{-6} \sim 109.06 \times 10^{-6}$ ), 重稀土 (HREE) 较富 ( $4.21 \times 10^{-6} \sim 15.30 \times 10^{-6}$ ); LREE/HREE 值为 6.04~10.43, 轻、重稀土分馏较强, (La/Yb)<sub>n</sub> 值为 6.32~14.56, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图上呈现出左高右低的右倾型分配模式; 富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、Pb、Sr) 和轻稀土元素, 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti) 和重稀土元素。岩浆来源于俯冲流体交代的地幔楔部分熔融; 具岛弧及大陆边缘弧构造环境的特征, 形成于板块边缘的消减带, 主要与古亚洲洋板块的俯冲作用有关。

**关键词:** 本巴图组; 火山岩; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学; 地质调查工程; 内蒙古

中图分类号: P548; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)04-1173-13

## The chronology, geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Benbatu Formation of Huolinhe area, Inner Mongolia

YANG Haixing<sup>1</sup>, GAO Lidong<sup>1</sup>, GAO Yushi<sup>1</sup>, SUI Haitao<sup>1</sup>, LIU Zhihui<sup>1</sup>, ZHAO Zhifei<sup>1</sup>, LÜ Jing<sup>1</sup>,  
ZHANG Weiyu<sup>1</sup>, ZHAO Shengjin<sup>1,2</sup>, YU Haiyang<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia No. 10 Geological Mineral Exploration and Development Co., Ltd., Chifeng 024005, Inner Mongolia, China;  
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this study, the authors determined a set of volcanic rocks in the Late Paleozoic strata at Huolinhe area, Inner Mongolia.

收稿日期: 2018-05-1; 改回日期: 2019-04-21

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20160048-11, DD20160048-15, DD20160048) 联合资助。

作者简介: 杨海星, 男, 1990 年生, 长期从事区域地质矿产调查工作; E-mail: 986746511@qq.com。

The age of zircon U - Pb isotope based on LA - ICP - MS analysis is  $(313.7 \pm 3.5)$  Ma, suggesting Late Carboniferous. The characteristics of petrography and petrogeochemical indicate that the Benbatu Formation consists of andesite and andesitic basalt rocks and belongs to aluminous rocks of alkalic series. The  $\text{SiO}_2$  values are 52.82%–54.76%, with higher  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content (17.43%–20.79%) and lower  $\text{TiO}_2$  content (0.97%–1.41%);  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.74%–4.21%) >  $\text{K}_2\text{O}$  (2.37%–3.02%). In addition, rare earth elements ( $\Sigma\text{REE}$ ) are between  $46.78 \times 10^{-6}$  and  $124.36 \times 10^{-6}$ , light rare earth elements (LREE) are enriched ( $42.57 \times 10^{-6}$ – $109.06 \times 10^{-6}$ ), and heavy rare earth elements (HREE) are relatively enriched ( $4.21 \times 10^{-6}$ – $15.30 \times 10^{-6}$ ). The ratios of LREE/HREE are 6.04–10.43, suggesting obvious fractionation of light and heavy rare earth elements. The ratios of  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  are 6.32–14.56, exhibiting right-inclined shape high on the left and low on the right on the chondrite - normalized REE patterns. Large ion lithophile elements (Rb, Ba, K, Pb, Sr) and LREE are enriched whereas high field - strength elements (Nb, Ta, Ti, P) and HREE are depleted. Magma came from mantle wedge partial melting with underthrust fluid metasomatism. These rocks are characterized by structural environment of island arc and continental edge arc and were formed along the subduction zone at the edge of the plate and related to Paleasian Ocean subduction.

**Key words:** Benbatu Formation; volcanic rocks; zircon U - Pb dating; petrogeochemistry; engineering geological survey; Inner Mongolia

**About the first author:** YANG Haixing, male, born in 1990, engages in investigation of regional geological and mineral resources; E - mail: 986746511@qq.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20160048 - 11, No. DD20160048 - 15, No. DD20160048).

## 1 引 言

大兴安岭中南段属于中亚造山带东段(又称兴蒙造山带),地处三大板块(西伯利亚、华北和太平洋板块),和三大构造体系(古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克和太平洋构造体系)的独特地理位置,具有复杂的构造演化历史,使得其研究具有重要的科学价值(邵济安等,1997;李锦轶,1998;吴福元等,1999;孙德有等,2004;郭晓丹等,2011),一直为中国东北地区研究的热点(唐克东等,1995;Miao et al.,2007;Chen et al.,2009;王金贵等,2018)。在中亚造山带东段分布有额尔古纳—兴安、松嫩—张广才岭、佳木斯—兴凯等地块,随着古亚洲洋的不断收缩,这些地块向西伯利亚板块和华北板块靠拢并导致其间先后互相碰撞拼合,最终西伯利亚板块和华北板块相互碰撞形成一个整体(孙德有等,2004)。关于华北板块和西伯利亚板块的碰撞、拼合的位置和时间,即古亚洲洋的最终缝合位置及时间的问题一直存在较大争议。一部分学者认为古亚洲洋的最终缝合位置为索伦—贺根山—线,闭合时间主要有二叠纪(王惠等,1999;Xiao et al.,2003;Li et al.,2012)、晚泥盆—早石炭世(徐备等,1997;陈斌等,2001;刘敦一等,2003)或中—晚泥盆世(包志伟等,1994;张臣等,1997;徐备等,2001)。另有一部分学者认为索伦—西拉木伦—长春—延吉—线为古亚

洲洋的最终缝合位置,闭合时间为晚二叠—早三叠世(王玉净等,1997;鲍庆中等,2006;李朋武等,2006;刘建峰等,2016),也有部分学者认为闭合于晚志留—晚泥盆世(唐克东等,1997)。

区域上本巴图火山岩主要分布于阿鲁科尔沁旗、西乌珠穆沁旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗等地区。霍林河地区出露的晚古生代地层在不同阶段的地质工作者对其层位归属及形成时代有不同的认识:1:20万区调甘珠尔庙幅将其厘定为上二叠统<sup>①</sup>,北侧哈拉盖农场幅将本套地层厘定为上二叠统包尔敖包组<sup>②</sup>,1:5万矿调将本套地层厘定为上二叠统林西组<sup>③④</sup>,1:25万区调修测将其厘定为下二叠统寿山沟组<sup>⑤</sup>。以往地质调查工作一直缺少精准的同位素测年依据,近年来,笔者在内蒙古霍林河地区进行野外地质考察过程中首次在该套地层中发现火山岩,根据同位素年龄及岩石地层对比将其厘定为上石炭统本巴图组,通过对其岩石地球化学分析,可为区域上晚古生代构造演化研究提供新资料。

## 2 地质概况

研究区位于扎鲁特旗行政中心北西约120 km,大地构造位置在为阿尔泰—兴蒙造山系(I级)、大兴安岭弧盆系(II级)、锡林浩特岩浆弧(III级),南邻索伦山—西拉沐沦结合带(图1)。区内出露古生代地层仅有上石炭统本巴图组,分布面积较小,主

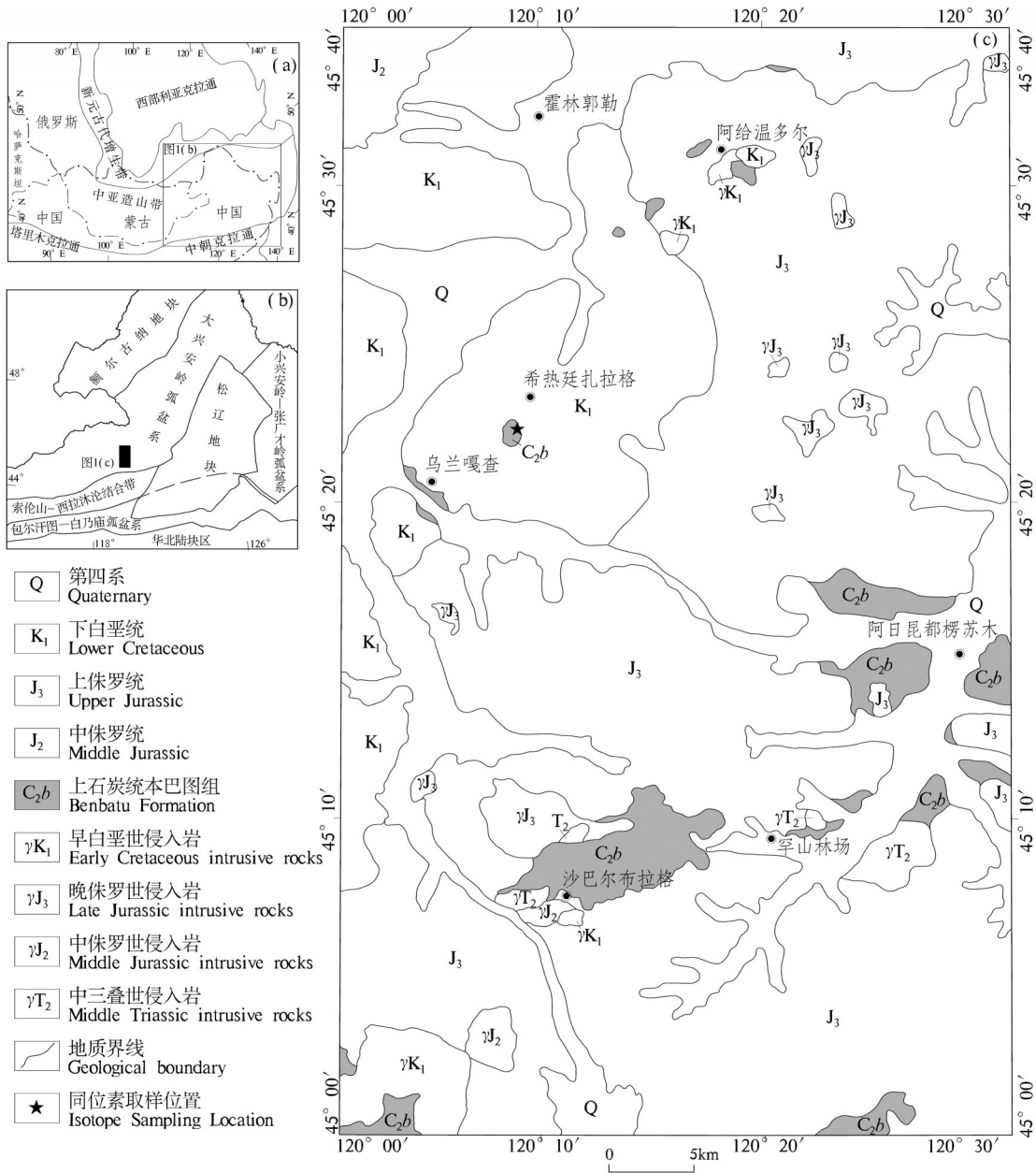


图1 研究区地质简图(a—中亚地区构造简图(据 Jahn et al., 2004 修改); b—中国东北地区构造简图(据潘桂棠等, 2015 修改); c—霍林河地区地质简图)  
 Fig.1 Geological sketch map of the study area (a—Tectonic framework of central Asia; b—Tectonic framework of Northeast China; c—Geological sketch map of Huolinhe region)

要沿沙巴尔布拉格—阿日昆都楞苏木带状分布,另沿乌兰嘎查—阿给温多尔一线零星出露。本巴图是地质科学院丁蕴杰于1960年创名(内蒙古自治区地矿局,1996),现定义指“锡林浩特—磐石地层分区晚石炭世海相碎屑岩岩系。夹灰岩透镜体和火山碎屑岩,顶底出露不全”。研究区本巴图组岩性组合主要为深灰色、灰绿色、灰黑色细砂质板岩、粉

砂质板岩、变质粉砂岩、变质细砂岩,局部出露安山岩。区内本组上下限不清,多被中生代火山岩覆盖或侵入岩侵入。

研究区中生代地层大面积出露,由老至新依次为中侏罗统塔木兰沟组安山岩、黑云母安山岩、角闪安山岩;上侏罗统满克头鄂博组流纹质凝灰岩、流纹岩、流纹质熔结凝灰岩、沉凝灰岩等,玛尼吐组

安山岩、安山质凝灰岩等(杨海星等,2019);下白垩统白音高老组流纹质凝灰岩、流纹质熔结凝灰岩等,梅勒图组安山岩、角闪安山岩等(杨海星等,2019),大磨拐河组细砂岩、粉砂岩、泥岩、砾岩等。

侵入岩零星分布,可分为中三叠世花岗岩、中侏罗世花岗岩、晚侏罗世花岗岩及早白垩世花岗岩4个期次。

### 3 火山岩岩石学特征

霍林河地区本巴图组出露的火山岩岩相学鉴定结果主要为安山岩,少量为安山玄武岩,本次共采集7套安山岩样品,包含5套安山岩,2套安山玄武岩。

安山岩呈灰绿色、深灰色,具斑状结构,基质交织结构,块状构造。成分特征及其变化:岩石主要由斑晶、基质组成。斑晶为斜长石、角闪石、黑云母,大小一般1~2 mm,部分2~8 mm,少数0.3~1 mm,星散状分布。斜长石半自形板状,被绢云母、方解石交代,含量10%~15%;角闪石半自形柱状,被方解石、不透明矿物交代,含量5%~10%;黑云母少量,片状,局部被铁质交代。基质为斜长石、隐晶质:斜长石半自形板状,大小一般0.01~0.05 mm,部分0.05~0.1 mm,略显定向一半定向分布,构成似交织结构。被绢云母、方解石交代,含量45%~50%;隐晶质填隙状分布。常被黏土质、不透明矿物交代,含量35%~40%。岩石轻碎裂,沿裂隙有方解石、不透明矿物充填交代。

安山玄武岩呈灰绿色,具斑状结构,基质似交织结构,块状构造。岩石主由斑晶、基质组成。斑晶为斜长石(5%~10%)、单斜辉石(1%~2%)、橄榄石(1%~3%),均为半自形晶,大小一般0.5~2 mm,部分2~4 mm,少数0.2~0.5 mm,星散状分布。斜长石板状,可见筛状熔蚀,被绢云母交代,表面略脏。单斜辉石柱状,被包林皂石交代,少残留。橄榄石粒状,被包林皂石交代,为假象。基质为斜长石(60%~65%)、隐晶质(30%~35%)、橄榄石。斜长石半自形板状,大小一般0.01~0.05 mm,部分0.05~0.1 mm,少0.1~0.2 mm,定向一半定向分布,构成似交织结构,被绢云母交代,表面略脏。隐晶质杂乱分布。橄榄石半自形粒状,大小一般0.01~0.1 mm,部分0.1~0.2 mm,星散状分布,被包林皂石交代,为假象。岩石

轻碎裂,沿裂隙不透明矿物充填交代。副矿物由磁铁矿、磷灰石组成;次生矿物主要为绢云母、包林皂石及脉状不透明矿物。

### 4 分析测试方法

本巴图组火山岩受风化作用较强,具明显的球形风化现象(图2a、b),选择测试样品时,尽量选择岩石面貌新鲜,受风化作用较弱,或去除边部受风化作用较强部分,选择内部面貌新鲜、致密坚硬的部分岩石,保证测试结果可靠。

本次选择1件测年样品,岩性为安山岩,粉碎样品及分选锆石在内蒙古地勘十院化验室完成,阴极发光(CL)照相、样品制靶和LA-ICPMS锆石U-Pb测年在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,火山岩样品采样锆石激光剥蚀等离子体质谱LA-ICPMS U-Pb测年,测试过程在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,检测仪器为激光烧蚀等离子质谱(ELEMENT XR),测试流程可参见文献(范晨子等,2012)。

本次研究对7件样品进行了岩石地球化学分析。粉碎样品在内蒙古第十地质矿产勘查开发有限责任公司化验室完成,主量元素测试由内蒙古第十地质矿产勘查开发有限责任公司十院化验室采用X射线荧光光谱法(XRF)完成,微量元素测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)完成,主量元素和微量元素分析精度和准确度均优于5%。

### 5 分析结果

#### 5.1 锆石U-Pb测年结果

安山岩样品D7715锆石分析结果见表1,锆石阴极发光图像见图3,年龄谐和图见图4。锆石晶型均较完整,具自形一半自形晶,可见较明显的震荡环状结果,Th/U比值均大于0.1,显示为岩浆成因锆石(吴元保等,2004)。共测试了30个数据点,其中27个数据点在谐和曲线上形成一个明显的集聚区,集聚区位于谐和曲线上,代表了成岩年龄,其余有2个年龄明显偏大的锆石可能为火山岩捕获锆石,另1个可能由于Pb丢失导致不谐和。27个数据获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(313.7 \pm 3.5)$  Ma (MSWD=0.64)。



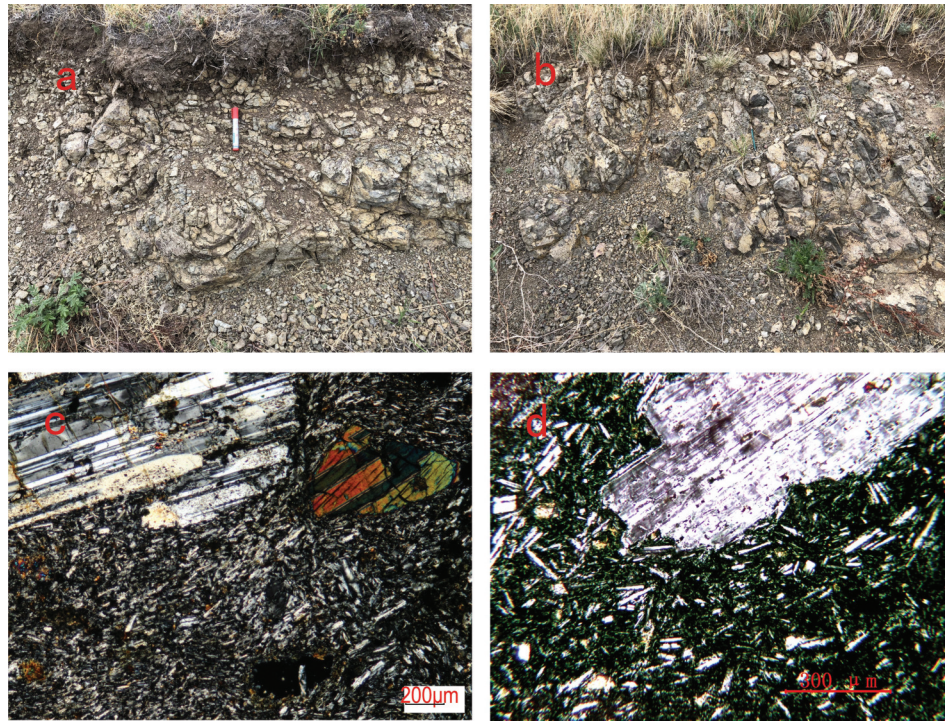


图2 本巴图组火山岩野外露头 and 显微照片(a,c-安山岩;b,d-安山玄武岩)

Fig. 2 Outcrop and microphotograph of the volcanic rocks in the Benbatu Formation (a, c-andesites;b, d-andesitic basalt)

表1 本巴图组火山岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data of the volcanic rocks in the Benbatu Formation

测点	Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ
1	0.69	0.0511	0.0015	0.3689	0.0139	0.0553	0.0017	321	9	319	10	426	66
2	0.69	0.0501	0.0015	0.3505	0.0124	0.0534	0.0015	315	9	305	9	346	63
3	0.32	0.0495	0.0015	0.3724	0.0187	0.0602	0.0025	312	9	321	14	611	86
4	0.71	0.0513	0.002	0.3776	0.0515	0.0565	0.0063	322	12	325	38	471	230
5	0.37	0.0506	0.0015	0.3708	0.0143	0.0571	0.0018	318	9	320	11	494	67
6	0.48	0.0532	0.0017	0.369	0.0253	0.0533	0.003	334	10	319	19	343	122
7	0.44	0.0503	0.0015	0.367	0.0134	0.0551	0.0016	316	9	317	10	416	63
8	0.39	0.0491	0.0014	0.3545	0.0118	0.0542	0.0014	309	9	308	9	381	58
9	0.44	0.0492	0.0014	0.348	0.0125	0.0538	0.0016	309	9	303	9	363	64
10	0.5	0.0513	0.0015	0.3549	0.0157	0.0537	0.0019	323	9	308	12	360	79
11	0.5	0.0452	0.0014	0.3703	0.0242	0.0627	0.0034	285	9	320	18	699	110
12	0.4	0.0494	0.0014	0.3467	0.0123	0.0541	0.0015	311	9	302	9	374	63
13	0.22	0.4904	0.0142	11.4906	0.3937	0.1782	0.0038	2572	61	2564	32	2636	35
14	0.59	0.0489	0.0014	0.3763	0.0157	0.0534	0.0018	308	9	324	12	344	74
15	0.48	0.0496	0.0018	0.3614	0.0474	0.0505	0.0055	312	11	313	35	218	232
16	0.57	0.0503	0.0015	0.3491	0.0147	0.0555	0.0019	317	9	304	11	430	75
17	0.38	0.049	0.0014	0.3561	0.0124	0.0552	0.0015	309	9	309	9	421	60
18	0.37	0.0498	0.0014	0.3649	0.0133	0.0539	0.0016	313	9	316	10	368	65
19	0.4	0.056	0.0016	0.4166	0.0162	0.0585	0.0018	351	10	354	12	547	67
20	0.49	0.0496	0.0015	0.344	0.0186	0.053	0.0024	312	9	300	14	330	97
21	0.53	0.05	0.0015	0.3466	0.0158	0.0542	0.002	315	9	302	12	378	81
22	0.31	0.0506	0.0015	0.3638	0.0161	0.0554	0.002	318	9	315	12	427	78
23	0.34	0.0511	0.0015	0.3686	0.0155	0.0553	0.0019	321	9	319	12	425	74
24	0.4	0.0501	0.0015	0.3799	0.0152	0.057	0.0019	315	9	327	11	492	71
25	0.4	0.0493	0.0014	0.3702	0.0166	0.0574	0.0021	311	9	320	12	506	79
26	0.5	0.047	0.0018	0.3527	0.0476	0.0535	0.006	296	11	307	36	349	235
27	0.44	0.047	0.0014	0.337	0.0125	0.054	0.0016	296	8	295	9	371	66
28	0.35	0.0501	0.0015	0.3504	0.0155	0.0541	0.002	315	9	305	12	373	80
29	0.49	0.0502	0.0015	0.3709	0.0205	0.058	0.0027	316	9	320	15	530	99
30	0.48	0.0502	0.0015	0.3535	0.0171	0.0546	0.0022	316	9	307	13	396	86

注:测试单位:国家地质实验测试中心;测试方法:LA-ICPMS;实验仪器:激光烧蚀等离子质谱(ELEMENT XR);Pb<sup>#</sup>为剔除数据。

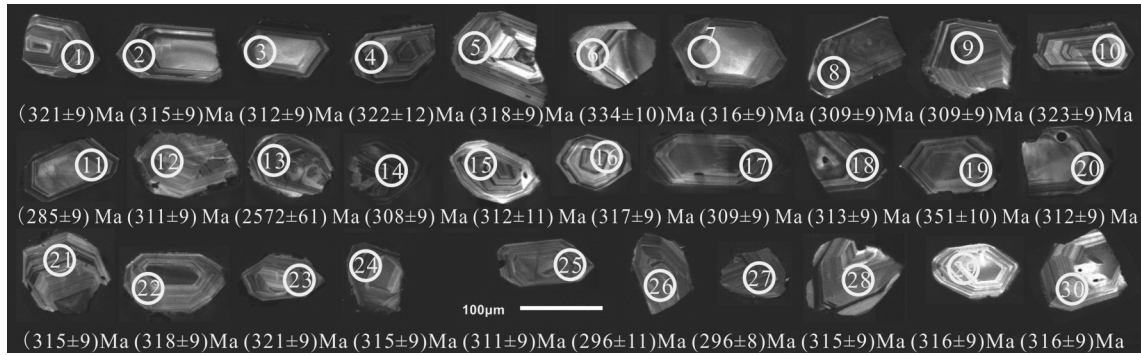


图3 本巴图组火山岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig.3 CL images of the zircons from the volcanic rocks in the Benbatu Formation

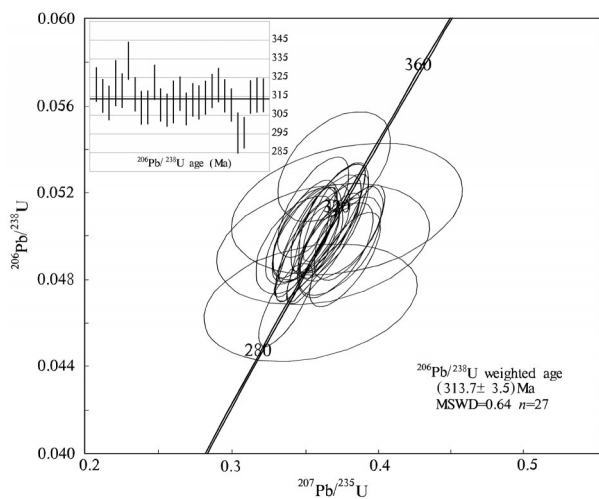


图4 本巴图组火山岩U-Pb年龄谐和图

Fig.4 U-Pb age concordia plots from the volcanic rocks in the Benbatu Formation

## 5.2 主量元素特征

本巴图组火山岩主量元素分析结果(表2)显示:  $\text{SiO}_2$  含量 52.83%~54.76%,  $\text{TiO}_2$  含量 0.97%~1.41%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 17.43%~20.79%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量 4.33%~4.97%,  $\text{FeO}$  含量 2.28%~2.99%,  $\text{MnO}$  含量 0.06%~0.2%,  $\text{MgO}$  含量 2.2%~3.35%,  $\text{CaO}$  含量 5.66%~6.72%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量 3.74%~4.21%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量 2.37%~3.02%; ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 平均值 6.11%~6.89%。在国际地科联推荐的火山岩分类命名的 TAS 图解(图 5a)上,均落在 Ir 线以上,属碱性,对应岩性有 6 件样品落入玄武质粗面安山岩内,另 1 件样品落入粗面安山岩内;由于研究区本巴图组火山岩具不同程度蚀变作用,所以采用受蚀变作用影响较弱的高场强元素 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解(图 5b)进行验证,2 件样品落

入亚碱性玄武岩内,4 件样品落入碱性玄武岩内,另有 1 件样品落入安山岩内。在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  图解(图 5c)中,均落入钾质岩石系列;在 A/CNK-A/NK 图解中(图 5d)除 1 件样品落入过铝质岩石内,其余均落在准铝质岩石内。综合以上主量元素分析可知,本巴图组火山岩为一套准铝质碱性系列岩石。

## 5.3 微量元素特征

本巴图组火山岩微量元素分析结果及主要参数见表 2, 稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )较高,为  $46.78 \times 10^{-6} \sim 124.36 \times 10^{-6}$ , 其中轻稀土(LREE)富集, 值为  $42.57 \times 10^{-6} \sim 109.06 \times 10^{-6}$ , 重稀土(HREE)较富, 值为  $4.21 \times 10^{-6} \sim 15.30 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 值为 6.04~10.43, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 值为 6.32~14.56, 反映了轻、重稀土分馏较强, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图 6a), 呈现出左高右低的右倾型分配模式,  $\delta\text{Eu}$  值为 1.03~1.15, 具微弱正铕异常, 5 件样品具不同程度 Tm 的负异常。

微量元素蜘蛛网图(图 6b)显示, 本巴图组火山岩微量元素富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Pb、Sr)和轻稀土元素, 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和重稀土元素, 有一个样品 Pb 极富集可能由于样品蚀变所致, 其他微量元素特征近似。因此本巴图组火山岩为同源岩浆, 具岛弧火山岩的特征(赵振华, 2007; 欧阳京等, 2010)。

## 6 讨论

### 6.1 火山岩形成时代

刘建峰(2009)获得达青牧场本巴图组片理化火山岩锆石 U-Pb 年龄  $(318.4 \pm 3.4) \text{ Ma}$  和  $(315.4 \pm 4.4) \text{ Ma}$ , 巴雅尔吐胡硕本巴图组火山凝灰岩锆石

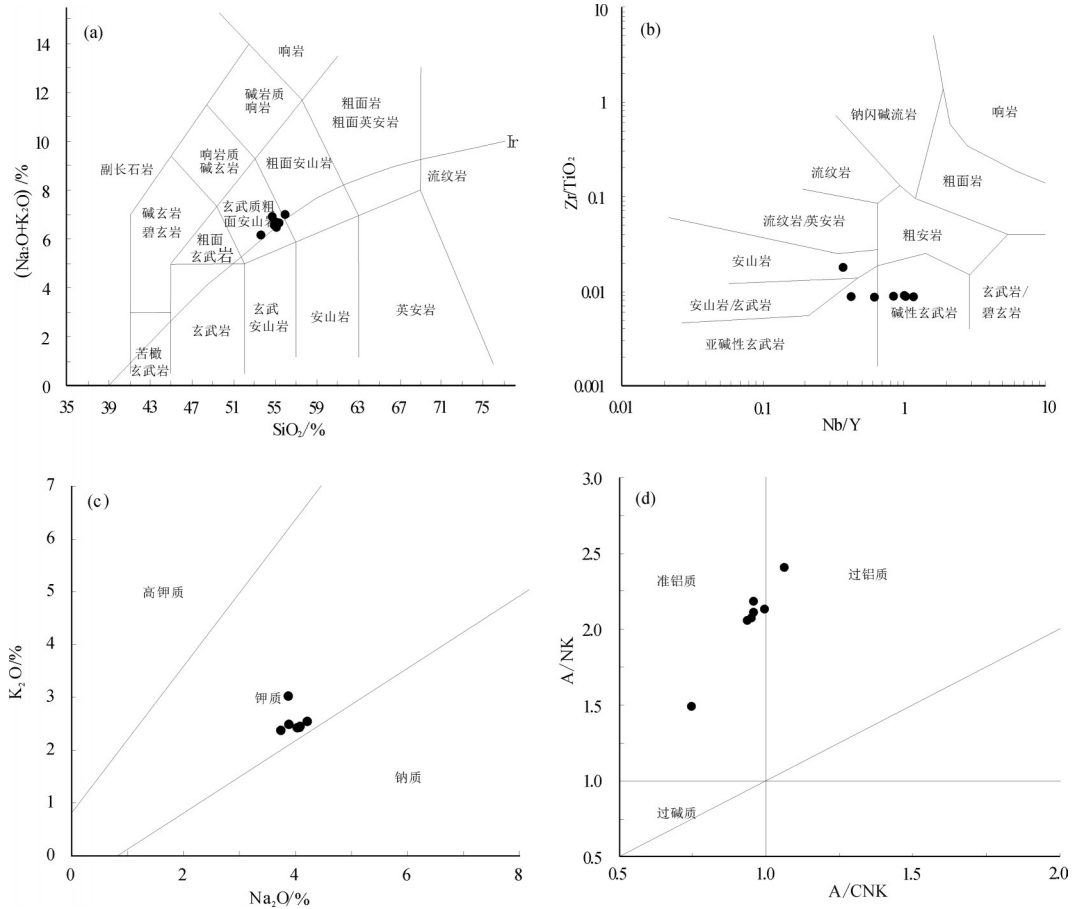


图5 本巴图组火山岩 TAS图解(a) (LeMaitre et al., 1989)、Nb/Y–Zr/TiO<sub>2</sub>图解(b) (Winchester et al., 1977)、Na<sub>2</sub>O–K<sub>2</sub>O图解(c) (Middlemost EAK, 1972)、A/CNK–A/NK图解(d) (Maniar et al., 1989)

Fig.5 TAS classification diagram (a), Nb/Y–Zr/TiO<sub>2</sub> diagram (b), Na<sub>2</sub>O–K<sub>2</sub>O diagram (c), A/CNK–A/NK diagram (d) of the volcanic rocks in the Benbatu Formation

U–Pb 年龄(323.9±3.5)Ma; 汤文豪(2011)根据同位素 Rb–Sr 等时线年龄和锆石 SHRIMP U–Pb 同位素定年数据及古生物资料认为查干诺尔地区石炭系本巴图组双峰式火山岩形成年龄介于 313~308 Ma; 郭晓丹(2011)在西乌旗地区本巴图组沉积岩中最小的碎屑锆石年龄峰期为 319 Ma, 推测其沉积年龄为 319 Ma; 潘世语(2012)获得苏尼特右旗地区本巴图组安山岩的锆石 U–Pb 年龄为(300.9±1.6)Ma; 李瑞杰(2013)在西乌旗本巴图组安山岩内获得的锆石 U–Pb 年龄为(336.2±1.9)Ma; 本次采集的安山岩样品的锆石均具震荡环状结构, Th/U > 1, 显示岩浆成因锆石, 该数值可代表成岩年龄, 获得的年龄值为(313.7±3.5)Ma, 与区域本巴图组时代一致, 因此本文所研究火山岩层位归属为本巴图组, 时代为晚石炭世。

### 6.2 岩石成因

总结前人研究成果, 安山岩的成因主要有 3 种, 第一种为玄武质岩浆分离结晶成因(易伟欣, 2013), 第二种为玄武质岩浆与源自陆壳的酸性岩浆混合成因(刘勇等, 2010), 第三种是由地幔或大洋板片部分熔融形成(代富强等, 2015)。研究区及附近区域目前尚未发现有大量玄武质岩石, 因此首先可排除第一种成因类型; 研究区火山岩不具负钕异常, 说明斜长石分离结晶作用不明显, 所以也不是第二种成因; 因此研究区安山岩只能是由地幔或大洋板片部分熔融形成。将研究区火山岩的一些不相容元素比值 Hf/Sm(0.80~1.84, 平均 1.22)、Ta/Hf(0.09~0.12, 平均 0.10)、Nb/Ta(13.64~19.4, 平均 17.33)、Ta/Yb(0.22~1.03, 平均 0.46)、Sm/Nd(0.19~0.22, 平均 0.20)、Nb/La(0.35~0.71, 平均 0.48)



表2 本巴图组火山岩主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )及稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 2 Major elements (%), trace elements ( $10^{-6}$ ) and REE ( $10^{-6}$ ) analyses of the Zhaduding A-type granites of the volcanic rocks in the Benbatu Formation

样号	BYS-1	BYS-12	BYS-3	BYS-4	BYS-5	BYS-6	BYS-7
岩性	安山岩	安山玄武岩	安山岩	安山岩	安山岩	安山岩	安山玄武岩
SiO <sub>2</sub>	54.76	54.13	54.08	54.05	53.66	53.36	52.83
TiO <sub>2</sub>	0.97	1.30	1.28	1.27	1.30	1.28	1.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.43	19.28	19.38	19.05	19.54	19.68	20.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.82	4.50	4.46	4.78	4.84	4.97	4.33
FeO	2.51	2.99	2.99	2.69	2.39	2.28	2.99
MnO	0.06	0.20	0.17	0.18	0.19	0.19	0.19
MgO	3.35	2.97	2.52	2.58	2.57	2.20	3.13
CaO	6.72	5.99	6.10	5.94	5.66	6.16	6.01
Na <sub>2</sub> O	3.87	4.03	3.88	4.08	4.07	4.21	3.74
K <sub>2</sub> O	3.02	2.42	2.49	2.45	2.43	2.54	2.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.42	0.36	0.45	0.55	0.73	0.50	0.53
烧失量	1.46	1.57	1.93	2.16	2.42	2.39	1.93
Rb	64.71	20.04	24.26	29.36	26.07	23.75	34.34
Sr	887.95	688.89	580.40	615.96	876.08	626.90	681.21
Ba	830.41	1.57	1.93	2.16	2.42	2.39	1.93
Th	3.59	2.61	1.22	1.25	2.09	1.39	1.62
U	0.81	0.84	0.56	0.58	0.48	0.45	0.74
Nb	8.03	6.70	5.94	6.21	6.18	6.17	6.18
Ta	0.46	0.42	0.34	0.37	0.37	0.45	0.35
Zr	178.54	165.59	139.76	147.17	146.50	145.82	146.99
Hf	5.26	4.41	3.41	3.67	3.68	3.71	3.71
Co	21.85	15.09	14.87	14.53	13.92	14.59	16.10
Ni	7.61	3.81	5.96	3.46	4.92	3.06	4.84
Cr	37.00	6.52	14.80	5.49	11.84	4.23	14.17
V	124.66	126.40	106.87	108.92	110.48	101.93	107.01
Sc	23.34	7.03	6.71	7.05	6.86	6.05	8.48
Li	13.60	10.91	12.71	12.57	10.74	10.00	11.78
Cs	2.39	1.85	3.16	1.79	1.09	0.61	1.71
Be	1.98	1.59	1.80	1.85	1.93	1.64	1.72
Ga	21.79	18.46	20.68	20.89	20.76	20.83	21.78
Tl	0.31	0.26	0.29	0.36	0.31	0.24	0.31
Cu	10.81	15.95	19.25	13.21	9.57	9.58	9.67
Pb	13.95	16.64	13.55	16.98	9.32	10.53	10.71
Zn	96.31	100.36	91.29	98.76	83.12	75.57	85.28
Bi	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.40	0.68	0.53	0.53	0.44	0.36	1.03
Sn	1.10	1.11	1.18	0.92	0.84	0.80	1.31
Mo	2.81	0.62	0.35	0.11	0.05	0.06	0.57
Cd	0.10	0.61	0.29	0.37	0.19	0.20	0.17
La	23.12	14.80	9.46	10.43	13.84	8.70	11.97
Ce	45.38	33.22	19.88	21.69	28.14	18.43	24.51
Pr	6.38	4.44	2.55	2.83	4.24	2.44	3.15
Nd	26.76	20.65	10.57	11.40	18.04	10.27	12.74
Sm	5.51	4.52	2.00	2.21	3.60	2.02	2.41
Eu	1.93	1.53	0.71	0.73	1.13	0.71	0.86
Gd	4.87	4.39	1.80	1.92	3.13	1.80	2.20
Tb	0.77	0.59	0.17	0.18	0.36	0.14	0.21
Dy	4.21	3.46	1.19	1.28	2.14	1.13	1.45
Ho	0.75	0.64	0.18	0.18	0.35	0.15	0.22
Er	2.02	1.87	0.58	0.60	1.00	0.52	0.74
Tm	0.37	0.26	0.03	0.02	0.09	0.01	0.05
Yb	1.98	1.68	0.49	0.51	0.84	0.44	0.65
Lu	0.34	0.24	0.04	0.03	0.08	0.02	0.05
Y	21.73	15.91	5.90	6.18	10.18	5.33	7.33
ΣREE	124.36	92.27	49.64	54.02	76.98	46.78	61.22
LREE	109.06	79.15	45.16	49.30	68.99	42.57	55.65
HREE	15.30	13.11	4.48	4.73	7.98	4.21	5.56
LREE	7.13	6.04	10.09	10.43	8.64	10.10	10.00
/HREE							
La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	8.36	6.32	13.79	14.55	11.87	14.26	13.28
δEu	1.14	1.05	1.14	1.09	1.03	1.14	1.15

注:主量元素测试单位:内蒙古地勘十院化验室,测试方法:X射线荧光光谱法(XRF);微量元素测试单位:河北省区域地质矿产调查研究所实验室,测试方法:电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)。

与球粒陨石、原始地幔、洋中脊玄武岩、大洋岛玄武岩(葛文春等,1999)进行比较,相对接近于原始地幔和正常洋脊玄武岩。研究区火山岩稀土曲线右倾,不具负铕异常,Tm元素具不同程度亏损,说明岩浆来源较深(戴凤岩等,1987);富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Pb、Sr)和LREE,亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和HREE,具岛弧火山岩特征,是因为俯冲洋壳在一定深度发生脱水作用,高场强元素随金红石、钛铁矿等保留在俯冲板块的残留相中,因而富集大离子亲石元素,之后进入地幔楔发生部分熔融(赵振华,2007;欧阳京等,2010)。本巴图组火山岩Rb/Sr值在0.02~0.17,Nd/Th值在7.4~9.1,平均值分别为0.07、8.08,同原始地幔(0.03、15.93)(Pearce,1982)与壳源岩浆( $>0.5$ 、 $\approx 3$ )(Tischendorf et al.,1985;Bea et al.,2001)的Rb/Sr与Nd/Th值相比,接近于原始地幔。因此本巴图组火山岩是由俯冲流体交代的地幔楔部分熔融作用形成。

### 6.3 构造环境

本巴图组火山岩主量元素具较低的TiO<sub>2</sub>含量,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量偏高,并且Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O;轻稀土(LREE)富集、重稀土(HREE)较富;微量元素亏损高场强元素Nb、Ta、Ti,具明显的“TNT”异常,具典型的岛弧环境特征(欧阳京等,2010;穆可斌等,2019)。将研究区火山岩微量元素V( $101.93 \times 10^{-6}$ ~ $166.60 \times 10^{-6}$ ,平均126.96)、Sc( $6.05 \times 10^{-6}$ ~ $23.34 \times 10^{-6}$ ,平均11.88 $\times 10^{-6}$ )、Nb( $5.94 \times 10^{-6}$ ~ $8.95 \times 10^{-6}$ ,平均7.11 $\times 10^{-6}$ )、微量元素比值Zr/Y(7.77~27.35,平均15.16)、Ni/Co(0.17~0.40,平均0.27)、Sc/Cr(0.45~1.43,平均0.84)、Sc/Ni(1.13~5.86,平均2.95)、Cr/V(0.04~0.30,平均0.12)、Rb/Sr(0.03~0.17,平均0.07)、Ba/Rb(0.06~12.85,平均4.64)、Ba/Sr(0.002~1.67,平均0.57)与安第斯安山岩、大陆岛弧安山岩、大洋岛弧低钾安山岩、大洋岛弧其他安山岩的微量元素及比值(胡享生等,1990)进行综合比较,其与大陆岛弧安山岩的微量元素特征最为接近。

研究区安山岩在Ta/Hf-Th/Hf图解(图7a)中落入陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区,位于板块汇聚边缘,少量样品过渡到大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区的趋势。在Ta/Yb-Th/Yb图解(图7b)中均落入活动大陆边缘(陆缘弧)区内,此外在Hf/3-Th-Nb/16图解(图7c)和Hf/3-Th-Ta图解(图7d)中,样



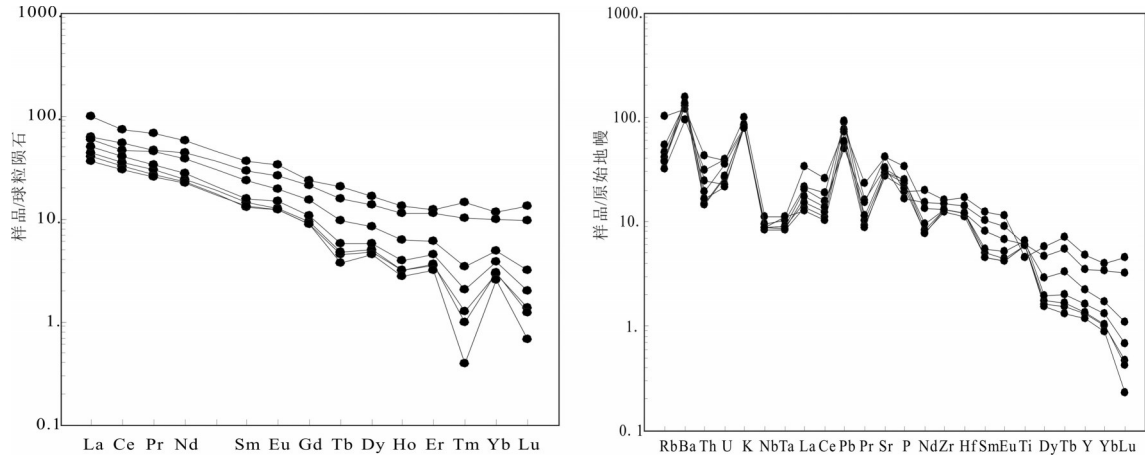


图6 本巴图组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)、原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)  
 Fig.6 Chondrite – normalized REE patterns (a), primitive mantle – normalized trace element spider diagrams (b) of the volcanic rocks in the Benbatu Formation(after Sun et al., 1989)

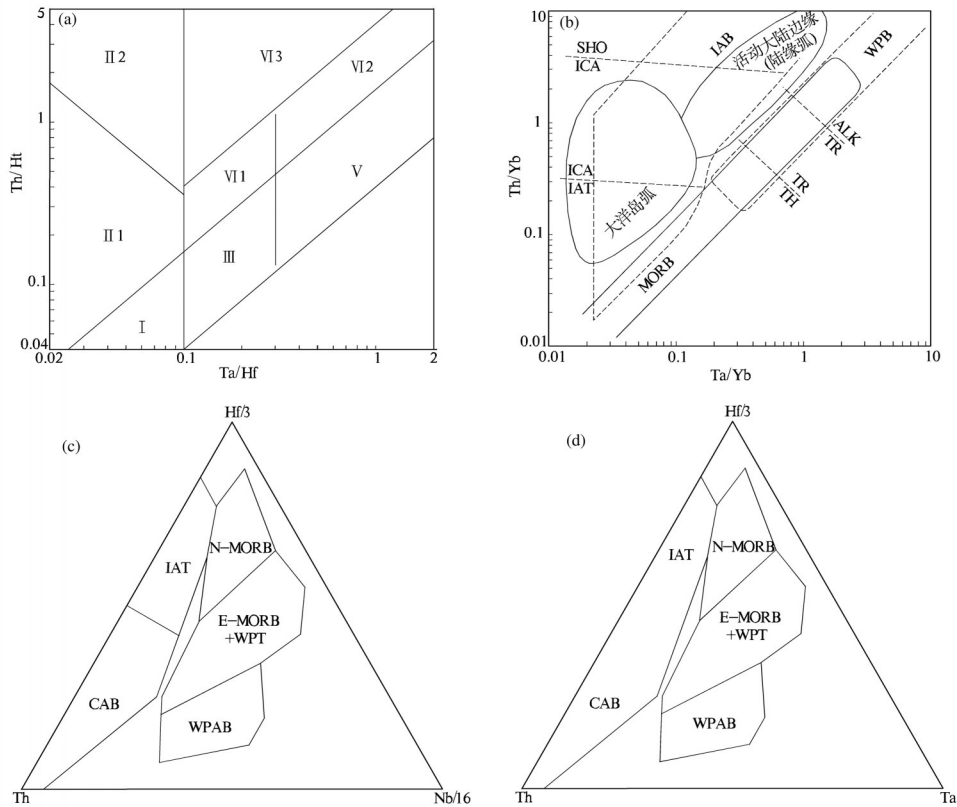


图7 本巴图组火山岩 Th/Hf – Ta/Hf图解(a)(汪云亮等,2001)、Th/Yb – Ta/Yb图解(b)(Pearce,1982)、Hf/3 – Th – Nb/16图解(c)(Wood,1980)、Hf/3 – Th – Ta图解(d)(Wood,1979)  
 Fig.7 Th/Hf – Ta/Hf diagram (a) (after Wang Yunliang et al.,2001), Th/Yb – Ta/Yb diagram (b) (after Pearce,1982), Hf/3 – Th – Nb/16 diagram (c) (after Wood,1980), Hf/3 – Th – Ta diagram (d) (after Wood,1979) of the volcanic rocks in the Benbatu Formation

品均落入岛弧火山岩区域;因此本巴图组火山岩具岛弧及大陆边缘弧构造环境的特征,形成于板块边缘的消减带,结合区域构造演化背景(包志伟等,1994;徐备等,1997,2001;张臣等,1997;王惠等,1999;陈斌等,2001;刘敦一等,2003;Xiao et al.,2003;Li et al.,2012),主要与古亚洲洋板块俯冲作用有关。研究区南邻索伦山—西拉沐沦结合带,为古亚洲洋最终消亡位置;在早石炭世,古亚洲洋向两侧俯冲(潘桂棠等,2015,2016;马士委等,2016),之后在其北侧苏左旗—西乌旗—罕山林场一带形成了本巴图组安山岩(何付兵等,2017)。

## 7 结 论

本文在对内蒙古霍林河地区本巴图组火山岩进行野外地质调查的基础上,通过岩相学、年代学及岩石地球化学等方面的研究可以得出以下结论:

(1)研究区本巴图组安山岩成岩年龄为(313.7±3.5)Ma,形成于时代归属晚石炭世。

(2)研究区本巴图组火山岩为一套准铝质碱性系列岩石;轻、重稀土分馏较强;富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Pb、Sr)和LREE,亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和HREE。

(3)研究区本巴图组火山岩岩浆来源于俯冲流体交代的地幔楔部分熔融;形成环境为岛弧或大陆边缘弧,主要与古亚洲洋板块的俯冲作用有关。

**致谢:**野外工作由两个区调项目组的共同参与,并得到了地勘十院张忠总工程师和王立明副院长的指导及帮助;论文写作过程中得到了方曙正高级工程师的指导;样品测试工作得到了测试单位实验室人员的大力支持;评审专家提出的宝贵意见提升了论文质量。在此一并深表感谢。

## 注释

①辽宁省第2区域地质测量队. 1973. 甘珠尔庙幅L-50-30 1:20万区域地质矿产报告[R].

②内蒙地质局区域地质测量队. 1978. 哈拉盖图农场幅L-50-24 1:20万区域地质调查报告[R].

③内蒙古自治区第十地质矿产勘查开发院. 2007. 内蒙古自治区德勒斯台防火站幅L50E017023北沙拉大队幅L50E017024罕山林场幅L50E018023阿勒坦达巴道班幅L50E018024 1:5万区域矿产地质调查报告[R].

④内蒙古自治区第四水文地质工程地质勘察院. 2010. 包尔呼吉尔塔拉幅L50E015023巴润哈尔努尔幅L50E015024沙尔呼热幅

L50E016023查布干其敖瑞幅L50E016024 1:5万区域矿产地质调查报告[R].

⑤内蒙古地质调查院,福建省地质调查研究院. 2011. 霍林郭勒市幅L50C003004 1:25万区域地质调查报告[R].

## References

- Bao Zhiwei, Chen Senhuang, Zhang Zhentang. 1994. Study on REE and Sm-Nd isotopes of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia[J]. *Geochimica*, 23(4): 339-349(in Chinese with English abstract).
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, Arzamastseva L. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov. Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 140:554-566.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1996. *Stratigraphy (Lithostratic) of Inner Mongolia Autonomous Region*[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1-344 (in Chinese with English abstract).
- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3):245-257.
- Chen Bin, Zhang Guochun, Wilde S. 2001. Subduction and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implications[J]. *Geological Review*, 47(4): 361-367(in Chinese with English abstract).
- Dai Fengyan, Zhang Najun. 1987. The significance of anomalous values of some elements in REE in the research of rock genesis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 6(2):57-61.
- Dai Fuqiang, Zhao Zifu, Zheng Yongfei. 2015. Plate mantle interaction: the origin of andesitic volcanic rocks after the collision in the Dabie orogenic belt[C]//Academic Annual Meeting of China Mineral Rock Geochemistry Society(in Chinese with English abstract).
- Fan Chenzi, Hu Mingyue, Zhao Linghao, Sun Dongyang, Zhan Xiuchun. 2012. Advances in in situ microanalysis of U-Pb zircon geochronology using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(1): 29-46 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yuan Zhongkuan, Li Wenyuan, Li Mingzhi, Yin Chengxiao. 1999. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of the mantle-crust interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3):396-407(in Chinese with English abstract).
- Guo Xiaodan, Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Qiu Haijun. 2011. The detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and its significance of Benbatu Formation in Xiwuzhumin, Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 30(2/3): 278-290(in Chinese with English abstract).

- He Fubing, Wei Bo, Xu Jixiang, Sun Yonghua, Li Ruijie. 2017. Ages, origin and geological implications of the volcanic rocks in the Baoligaomiao Formation of East Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 44(6):1159–1174 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiangsheng, Mo Xuanxue, Fan Li. 1990. Jiangda ancient trench–arc–basin system, Xizang (Tibet): Evidences from volcanic rocks[C]//*Contribution to Geology of the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Windley B, Natal In B, Dobretsov N. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599–603.
- LeMaitre R W, Bateman P, Dudek A. 1989. *A Classification of Igneous Rock and Glossary of Terms* [M]. Oxford: Blackwell, 193.
- Li Dapeng, Chen Yuelong, Wang Zhong, Lin Yu, Zhou Jian. 2012. Paleozoic sedimentary record of the Xing–Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57: 776–785.
- Li Jinyi. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas[J]. *Geological Review*, 44(4):339–347 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo–Asian Ocean and subduction of the Paleo–Pacific plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207–224.
- Li Pengwu, Gao Rui, Guang Ye, Li Qiusheng. 2006. Palaeo magnetic constraints on the final closure time of Solonker–Linxi suture [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36 (5) : 744–758 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruijie. 2013. The Reserch of Geochemical Characteristics, Geochronology and Geology Significance of the Benbatu Formation Volcanic Rocks of the Xiwuqi Area in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing):1–61 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Lūqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction[J]. *Acta Geological Sinica*, 77 (3) : 317–327, 435–437 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Sun Lixin, Yin Dongfang, Zheng Peixi. 2016. Zircon U–Pb dating of the Jiujingzi ophiolite in Bairin Left Banner, Inner Mongolia: Constraints on the formation and evolution of the Xar Moron River suture zone[J]. *Geology in China*, 43(6): 1947–1962 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng. 2009. Late Paleozoic Magmatism and Its Constraints on Regional Tectonic Evolution in Linxi–Dongwuqi Area, Inner Mongolia[D]. Jilin: Jilin University:1–142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Li Tingdong, Xiao Qinghui, Geng Shufang, Wang Tao, Chen Bike. 2010. New chronology of the Ningyuan alkali basalt in southern Hunan, China: Evidence from LA–ICP–MS zircon U–Pb dating[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(6):833–841 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shiwei, Zhou Zhiguang, Liu Changfeng, Li Ruijie, Lai Lin, Zhang Xuebin, Meng Yuanku. 2016. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Carboniferous quartz diorite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(6):1932–1946 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Fan Weiming, Liu Dunyi. 2007. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia–Daxinganling orogenic belt in North China: constraints from geochronology of ophiolites and associated formations[C]//Zhai M G, Windley B F, Kusy T M, Meng Q R (eds.). *Mesozoic Sub–continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia*. Special Publications, vol. Geological Society, London, 206:223–237.
- Middlemost EAK. 1972. A simple classification of volcanic rocks[J]. *Bulletin of Volcanology*, 36: 382–397.
- Mu Kebin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuo Chen, Pei Lei, Liu Chenjun, Gao Feng, Chen Youxin, Wang Meng, Zhao Shaowei. 2019. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Granite Veins in the Bailongjiang Group, South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 52(3):111–135 (in Chinese with English abstract).
- Ou Yangjing, Wang Shuangshuang, Yu Man, Liu Ye, Wang Fan, Shang Zhaocong, Yao Chao, Wang Jinrong. 2010. Igneous assemblages of different origin in island arc and their geological significances[J]. *Gansu Geology*, 19 (2): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Lu Songnian, Xiao Rongge, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Hao Guojie, Luo Mansheng, Ren Fei, Yuan Sihua. 2016. Division of Tectonic Stages and Tectonic Evolution in China. [J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6) : 1–23 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Rongge. 2015. Explanatory Note to The Tectonic Map of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–160 (in Chinese with English Abstract).
- Pan Shiyu. 2012. Geochemical characteristics and tectonic significance of Late Carboniferous volcanic rocks in Benbatu Formation of Sonid Youqi, Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 31 (1) : 40–50 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//Thorps R S (ed.). *Andesites*. New York: John Wiley and Sons, 525–548.
- Shao Ji'an, Mu Baolei, He Guoqi, Zhang Lūqiao. 1997. The geological processes of northern part of North China during the Paleozoic and Pacific tectonics [J]. *Sciences in China (Series D)*, 27:390–394



- (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Gao Shan. 2004. The final closing time of the west Lamulun River– Changchun– Yanji plate suture zone Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 34 (2): 174–181(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]// Saunders A D, Norry M J(eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society London Special Publications, 42: 313–345.
- Tang Kedong, Shao Ji'an. 1997. On tectonic evolution of centralasian fold region——Achievement reviewon recent studies by russian geologists[J]. Geoscience, 11 (1): 21–28(in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong, Wang Ying, He guoqi, Shao Ji' an. 1995. Continental–margin structure of northeast china and its adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, 69(1): 16–30(in Chinese with English abstract).
- Tang Wenhao, Zhang Zhicheng, Li Jianfeng, Feng Zhishuo, Chen Chen. 2011. Geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks of Benbatu Formation in Sonid Youqi, Inner Mongolia and Its geological significance[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 47 (2): 321–330(in Chinese with English abstract).
- Tischendorf f G, Paelchen. 1985.Zur Klassifikation von Granitoiden/ Classification of granitoids[J]. Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften, 13(5): 615–627.
- Wang Hui, Gao Rongkuan. 1999. Further study on biostratum division and correlation of early permian epoch of mandula area of Damaoqi, Inner Mongolia[J]. Geology of Inner Mongolia, (2):7–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingui, Zhang Xinquan, Zhang ZiXuan, Xu Fan, ZHou Jing, Zhang Zhenli, Ren Peilin.2018.Research on the comprehensive prospecting model of copper polymetallic deposit in Meiyougou, Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 41(01):75–81 (in Chinese with English abstract) .
- Wang Yujing, Fan Zhiyong. 1997. Discovery of the Permian radiolarian fossils in ophiolites north of the XarMoron River,Inner Mongolia,and its geological implications[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 36(1): 58–69(in Chinese with English abstract).
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi.2001. Th/Hf– Ta/Hf identification of tecton ic setting of basalts[J] . Acta Petrologica Sinica, 17(3):413–421(in Chinese with English abstract).
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20: 325–343 .
- Wood D A. 1979. Avariably veined suboceanic uppermantle– genetic significance for mid– ocean ridge basalts from geochemical evidence[J]. Geology, 7:499–503
- Wood D A. 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of British Tertiary volcanic province[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 50: 11–30.
- Wu Fuyuan, Cao Lin. 1999. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. Geology, 18 (2): 1– 13(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraintion interpretation of U– Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 49(15):1544–1569(in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture,Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 22(6) : 8–1–8–20.
- Xu Bei, Chorvet, Zhang Fuqin. 2001. Primary study on petrology and geochronology of blueschist in Sunite Zuo Qi, northern Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Geology, 36(4): 424– 434(in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Chen Bin. 1997. The structure and evolution of a Middle Paleozoic orogenic belt between the North China and Siberian blocks, northern Inner Mongolia,China [J]. Science in China (Ser. D), 27 (3):227–232(in Chinese with English abstract).
- Yang Haixing, Gao Lidong, Gao Yushi, Sui Haitao, Liu Zhihui, Zhao Zhifei, Zhao Shengjin, Yu Haiyang, Zhang Weiyu, Lv Jing, Lang Xinxin. 2019. Geochronology and geochemistry of the andesites in the Manitu Formation from Hanshanlinchang area in mid–southern Daxinganling Mountain and its geological significance[J]. Geology and Exploration, 55(4):1223–1240(in Chinese with English abstract).
- Yang Haixing, Gao Lidong, Gao Yushi, Sui Haitao, Zhao Zhifei, Lü Jing,Zhang Weiyu, Zhao Shengjin, Liu Zhihui, Zhou Yingshuai. 2019. Zircon U– Pb geochronology and geochemistry for the stratotype section of the Meiletu Formation in Mid– Southern Daxinganling Mountain and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 38(5):845– 857(in Chinese with English abstract).
- Yi Weixin. 2013.Petrological characteristics and genesis of cenozoic volcanic rocks in volcanic cluster of chugoku district in Japan[J]. Journal of Henan Polytechnic University:Natural Science, 32(4): 418–426(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chen, Li Maosong. 1997. The features of Late Paleozoic tectonomagmatic activity and crustal revolution in the southern Suzuoqi area[J]. Geological Journal of China Universities, 3 (1) : 31–39(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2007.How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 31 (1) : 92–103(in Chinese with English abstract).

## 参考文献

包志伟, 陈森煌, 张桢堂. 1994. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm–Nd 同位素研究[J]. 地球化学, 23 (4) : 339–349.

- 陈斌, 赵国春, Wilde S. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. 地质评论, 47(4): 361-367.
- 代富强, 赵子福, 郑永飞. 2015. 板片-地幔相互作用: 大别造山带碰撞后安山质火山岩成因[C]//中国矿物岩石地球化学学会学术年会.
- 戴凤岩, 张娜钧. 1987. 稀土元素中某些元素异常值在岩石成因研究中的意义[J]. 地质科技情报, 6(2): 57-61.
- 范晨子, 胡明月, 赵令浩, 孙冬阳, 詹秀春. 2012. 锆石铀-铅定年激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱原位微区分析进展[J]. 岩矿测试, 31(1): 29-46.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 李文远, 陈明植, 尹成孝. 1999. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报, 15(3): 396-407.
- 郭晓丹, 周建波, 张兴洲, 邱海峻. 2011. 内蒙古西乌珠穆沁旗本巴图组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报, 30(2/3): 278-290.
- 何付兵, 魏波, 徐吉祥, 孙永华, 李瑞杰. 2017. 内蒙古巴彦敖包地区宝力高庙组火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 44(6): 1159-1174.
- 胡享生, 莫宣学, 范例. 1990. 西藏江达古沟-弧-盆体系的火山岩石学与地质学标志[C]//地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社. 1-15.
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. 地质论评, 44(4): 339-347.
- 李朋武, 高锐, 管焯, 李秋生. 2006. 内蒙古中部索伦-林西缝合带封闭时代的古地磁分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 36(5): 744-758.
- 李瑞杰. 2013. 内蒙古西乌旗本巴图组火山岩地球化学特征、年代学及地质意义研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-61.
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报, 77(3): 317-327, 435-437.
- 刘建峰, 李锦轶, 孙立新, 殷东方, 郑培玺. 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩锆石 U-Pb 定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束[J]. 中国地质, 43(6): 1947-1962.
- 刘建峰. 2009. 内蒙古林西-东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约[D]. 吉林: 吉林大学, 1-142.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 耿树方, 王涛, 陈必河. 2010. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年[J]. 地质通报, 29(6): 833-841.
- 马士委, 周志广, 柳长峰, 李瑞杰, 来林, 张学斌, 孟元库. 2016. 内蒙古西乌旗地区晚石炭世石英闪长岩的岩石成因及构造意义[J]. 中国地质, 43(6): 1932-1946.
- 穆可斌, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘成军, 高峰, 陈有炳, 王盟, 赵少伟. 2019. 南秦岭白龙江群中花岗岩脉群年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 52(3): 111-135.
- 内蒙古自治区地矿局. 1996. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 欧阳京, 汪双双, 于漫, 刘晔, 王凡, 尚兆聪, 姚超, 王金荣. 2010. 岛弧环境中不同成因的火成岩组合及其地质意义[J]. 甘肃地质, 19(2): 18-26.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖荣阁, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 23(6): 1-23.
- 潘桂棠, 肖荣阁. 2015. 中国大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1-160.
- 潘世语. 2012. 内蒙古苏尼特右旗晚石炭世本巴图组火山岩地球化学特征及构造意义[J]. 世界地质, 31(1): 40-50.
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用[J]. 中国科学: D辑, 27(8): 390-394.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174-181.
- 汤文豪, 张志诚, 李建锋, 冯志硕, 晨辰. 2011. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 47(2): 321-330.
- 唐克东, 邵济安. 1997. 中亚褶皱区构造演化问题——俄罗斯学者近年研究成果评价[J]. 现代地质, 11(1): 21-28.
- 唐克东, 王莹, 何国琦, 邵济安. 1995. 中国东北及邻区大陆边缘构造[J]. 地质学报, 69(1): 16-30.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 17(3): 413-421.
- 王惠, 高荣宽. 1999. 内蒙古达茂旗满都拉地区早二叠世生物地层划分对比再研究[J]. 内蒙古地质, (2): 7-20.
- 王金贵, 张鑫全, 张子轩, 许凡, 周敬, 张振利, 任陪林. 2018. 内蒙古煤油沟铜多金属矿综合找矿模式的研究[J]. 地质调查与研究, 41(01): 75-81.
- 王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地意义[J]. 古生物学报, 36(1): 58-69.
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. 世界地质, 18(2): 1-13.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 徐备, Charvet J, 张福勤. 2001. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究[J]. 地质科学, 36(4): 424-434.
- 徐备, 陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构和演化[J]. 中国科学(D辑), 27(3): 227-232.
- 杨海星, 高利东, 高玉石, 隋海涛, 柳志辉, 赵志飞, 赵胜金, 于海洋, 张维宇, 吕晶, 郎欣欣. 2019. 大兴安岭中南段罕山林场地区玛尼吐组安山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 55(4): 1223-1240.
- 杨海星, 高利东, 高玉石, 隋海涛, 赵志飞, 吕晶, 张维宇, 赵胜金, 柳志辉, 周颖帅. 2019. 大兴安岭中南段梅勒图组层型剖面火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 38(5): 845-857.
- 易伟欣. 2013. 日本中国地区火山群中新世代火山岩岩石学特征与成因[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 32(4): 418-426.
- 张臣, 李茂松. 1997. 内蒙古苏左旗地区晚古生代构造-岩浆活动及地壳演化特征[J]. 高校地质学报, 3(1): 31-39.
- 赵振华. 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 31(1): 92-103.