

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.015

内蒙古东乌旗角闪辉长岩年龄、地球化学特征及其对晚古生代构造演化的约束

张夏炜^{1,2}, 程银行^{3*}, 李英杰¹, 滕学建³, 王少轶³, 李影³, 刘海东²ZHANG Xiawei^{1,2}, CHENG Yinhang^{3*}, LI Yingjie¹, TENG Xuejian³, WANG Shaoyi³, LI Ying³, LIU Haidong²

1. 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

1. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要: 兴蒙造山带东部内蒙古东乌旗地区晚古生代构造岩浆活动复杂, 是解决兴蒙造山带晚古生代构造演化的关键地区。对东乌旗地区新识别出的角闪辉长岩进行了系统的地质特征、岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学研究。东乌旗角闪辉长岩主体呈包体状产出, 主要由斜长石(55%~60%)、角闪石(15%~20%)、辉石(10%~15%)和少量磁铁矿等组成。获得角闪辉长岩样品的锆石 U-Pb 年龄为 299 ± 3 Ma, 表明岩体形成于晚石炭世。6 件样品的地球化学数据显示, SiO_2 含量为 49.88%~51.98%, TiO_2 含量为 1.2%~1.86%, MgO 含量 4.42%~7.41%, Al_2O_3 含量为 15.55%~16.84%, MnO 含量为 0.12%~0.17%, CaO 含量 5.67%~6.52%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量 3.35%~4.63%, m/f 值为 0.41~0.49, $\text{Mg}^\#$ 值为 52.56~60.82, TFEO 值为 7.12~9.18; 稀土元素球粒陨石标准化配分模式表现为轻稀土元素(LREE)相对于重稀土元素(HREE)富集的平坦右倾型, 轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为 4.96~6.92, 岩石富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K 等, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, LREE/HREE 值较稳定, δEu 值为 0.87~0.98, 显示具有弱的正 Eu 异常。角闪辉长岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 5.1~11.25, 单阶段地壳模式年龄(T_{DM1})为 1039~604 Ma。结合区域地质演化, 认为东乌旗角闪辉长岩可能是由于受到洋壳的俯冲, 上覆亏损地幔发生部分熔融, 产生钙碱性岩浆, 且在上升侵位的过程中受到地壳物质较弱程度的混染, 形成于古亚洲洋俯冲环境。东乌旗地区在晚石炭世—早二叠世存在少量的基性岩浆活动, 标志着构造背景由俯冲造山向造山后伸展转变。

关键词: 角闪辉长岩; 晚石炭世; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 兴蒙造山带

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)01-0180-13

Zhang X W, Cheng Y H, Li Y J, Teng X J, Wang S Y, Li Y, Liu H D. Zircon U-Pb age and geochemistry of the bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its constrains on the Late Paleozoic tectonic evolution. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 180-192

Abstract: The research area is located in the east of the Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt, Dong Ujimqi of Inner Mongolia. The complex tectonomagmatic activity in this area is the key to solve the tectonic evolution of Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt. This

收稿日期: 2020-11-20; 修订日期: 2021-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目《东乌旗石炭—二叠纪岩浆岩的岩石构造组成及时空演化对造山作用的响应》(批准号: 41872068)、《内蒙古迪彦庙蛇绿岩带前弧玄武岩组合及其成因》(批准号: 41972061) 和中国地质调查局项目《内蒙古 1: 5 万奥尤特等六福区域地质矿产调查》(编号: 1212011220446)、《内蒙古 1: 5 万阿尔塔拉等六福区域地质矿产调查》(编号: 1212011120697)

作者简介: 张夏炜(1995-), 男, 在读博士生, 构造地质学专业。E-mail: 384427151@qq.com

* 通信作者: 程银行(1982-), 男, 博士, 研究员, 从事地质矿产调查与研究工作。E-mail: weicheng1858@163.com

study carried out zircon U-Pb dating analyses and petrographical, geochemical for the bojites firstly recognized in the Dong Ujimqi, so as to understand the characteristics of the mantle nature and structure. The bojite generally extends north-east and presents like rock plant. In these rocks, main rock forming minerals are plagioclase, hornblende and pyroxene. The dating results indicate that the bojite was formed in the Late Carboniferous (299 ± 3 Ma). The geochemical data of the samples show that: SiO_2 (49.88% ~ 51.98%), TiO_2 (1.2% ~ 1.86%), MgO (4.42% ~ 7.41%), Al_2O_3 (15.55% ~ 16.84%), MnO (0.12% ~ 0.17%), CaO (5.67% ~ 6.52%), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (3.35% ~ 4.63%), m/f (0.41 ~ 0.49), $\text{Mg}^\#$ (52.56 ~ 60.82), TFeO (7.12 ~ 9.18). The standardized distribution pattern of REE chondrites is right-leaning with relatively enriched LREE. The rocks are enriched in LILE (Rb, Ba, K), and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti), LREE/HREE is stable, with negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.87 \sim 0.98$). The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of zircons from the bojite vary between 5.1 ~ 11.25, and their Hf one-stage model ages vary from 1039 Ma to 604 Ma. Combined with regional tectonic evolution, it may be due to the subduction of oceanic crust, the thermal dehydration of subducted plate resulted in the partial melting of overlying depleted mantle and the generation of calc alkaline magma. In the process of ascending and emplacement, it was contaminated by crustal materials in a weak degree, which formed in the subduction environment of Paleo Asian Ocean. There was a small amount of basic magmatism in Dong Ujimqi in the Late Carboniferous—Early Permian, which indicated that the tectonic setting changed from subduction orogeny to post orogenic extension.

Key words: bojite; Late Carboniferous; zircon U-Pb age; Hf isotope; Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt

辉长岩是基性岩的代表岩石,其物质来源多为上地幔,主要由玄武质岩浆结晶而成,为下地幔和地壳的形成提供了重要的物质来源(李化启等, 2005; 周长勇等, 2005)。辉长岩的形成也与地幔柱的演化规律和深部能量分配、构造环境演化有着密切的关系,对于辉长岩的研究可以为壳幔间的物质联系提供重要的证据(陈立辉等, 2006; 朱永峰等, 2006)。

兴蒙造山带大地构造位置位于西伯利亚板块与华北板块之间的中亚造山带东段,早古生代以来经历了多期次的构造事件,有着较复杂的岩石圈结构构造和物质组成,因此一直是地质科学家研究的热点地区之一。前人对该地区晚古生代造山演化有不同认识:大陆边缘弧形钙碱性花岗岩(张健等, 2011; 王新宇等, 2013),年代主要集中在 335 ~ 298 Ma;造山后高钾钙碱性、碱性花岗岩(洪大卫等, 2000; 童英等, 2010; 张玉清等, 2013; 程银行等, 2014; 王帅等, 2021),年代集中在 323 ~ 273 Ma 之间;大陆弧后花岗岩(张磊等, 2013),年代为 325 ~ 260 Ma。在内蒙古东乌旗地区识别出东乌旗角闪辉长岩,构造位置处于兴蒙造山带中东部,该地区广泛发育晚古生代花岗岩,目前该地区的研究多集中于花岗质岩石,而对记录深部地幔岩浆事件的基性—超基性岩的研究十分薄弱。目前仅窑勒地区的早二叠世角闪辉长岩(程银行等, 2015)和东方红公社地区的晚石炭世辉闪橄榄岩(程银行等, 2020)有相关报道,且对于该地区是否存在古亚洲洋俯冲环境下的岩浆事件仍需要进行研究。本文以东乌

旗新识别出的角闪辉长岩为研究对象,在野外观察、室内岩相学的基础上,进行了系统的岩石学、岩石地球化学、年代学等方面的研究,并结合前人研究成果讨论其源区性质及地球动力学背景,旨在为东乌旗地区晚古生代幔源岩浆事件和俯冲阶段提供基性岩记录,也为该区晚古生代构造演化研究提供新佐证。

1 区域地质背景及岩相学特征

研究区位于内蒙古东乌旗地区,大地构造位置处在华北板块与西伯利亚板块之间,古亚洲洋构造域大陆增生造山带中东部(图 1-a),按照 Xiao et al. (2003)对兴蒙造山带构造单元的划分,其大地构造位置处于乌里雅斯太活动大陆边缘与贺根山蛇绿岩—弧—增生杂岩带交界处,南部紧邻宝力道弧—增生杂岩带(图 1-b)。其地理位置特殊,经历了古亚洲洋板块的俯冲消减、碰撞造山,后又经历了太平洋板块的俯冲增生,其复杂的地质作用使该区域大陆改造明显,地壳变形强烈,构造复杂。区内晚古生代构造岩浆活动非常活跃,该岩浆岩带向西经二连浩特断续延入蒙古境内,向东延入大兴安岭地区。区内出露地层有中—下泥盆统泥鳅河组,岩性以灰绿色、浅灰色变质粉砂岩和黄灰色、灰绿色变质泥质粉砂岩为主;上石炭统宝力高庙组,主要为陆相火山岩—碎屑岩建造,以紫褐色安山岩、安山质火山碎屑岩为主;下侏罗统红旗组,主要岩性为复成分砂砾岩、含砾粗砂岩、长石岩屑砂岩,角度不整合于晚古生代岩石地层之上。侵入岩以晚石炭

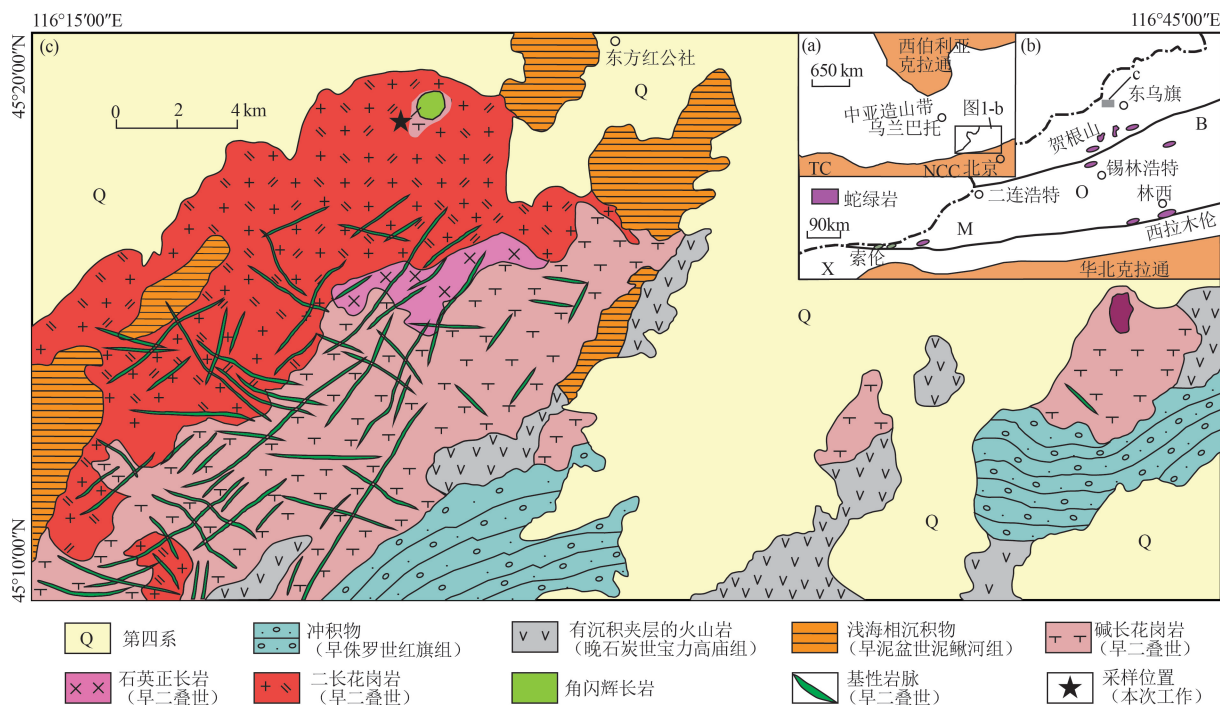


图1 内蒙古东乌旗地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Dong Ujimqi in Inner Mongolia

世一早二叠世肉红色中细粒碱性花岗岩、中细粒石英正长岩和灰白色中细粒二长花岗岩为主,侵入泥鳅河组和宝力高庙组中,其间伴有基性—超基性深部幔源岩浆活动的记录,局部见晚侏罗世灰黑色安山玢岩侵入。本文研究的角闪辉长岩主要分布于东方红公社西南约 6 km,呈包体状产出 270~280 Ma(内部资料)的碱质正长岩、碱长花岗岩中(图 2-a),大小从十几厘米到十几米不等,岩石组合非常单一。

角闪辉长岩新鲜面呈深灰色,中细粒辉长结构,块状构造(图 2-b),主要矿物有斜长石(55%~60%)、角闪石(15%~20%)、辉石(10%~15%)和少量磁铁矿(5%)等。斜长石自形程度较好,长柱状,可见聚片双晶,大部分具一定程度的定向分布,局部嵌于角闪石内,粒径一般为 1.5~2.5 mm(图 2-d)。角闪石呈半自形柱状,棕绿色,多色性明显,Ng'为绿色,Np'为浅绿色。镜下可见 2 组交角分别为 56°和 124°的菱形解理发育(图 2-c),大小一般为 0.3~1 mm,似堆状或杂乱分布,为交代辉石的产物,部分发育纤闪石化,局部颗粒边缘及内部包嵌有少量半自形斜长石。辉石多为单斜辉石,晶体为半自形柱状,正光性,无多色性,局部可见辉石呈嵌晶

状被斜长石和角闪石包裹,形成包含结构(图 2-c)。副矿物以磁铁矿等为主。

2 样品分析方法

2.1 岩石地球化学测试

主量、微量和稀土元素分析在中国地质调查局天津地质调查中心元素分析实验室完成。在室内将风化面去除,手工磨碎至 1~5 mm,将样品熔制成玻璃饼,然后采用 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行主量元素测定。X 射线荧光光谱仪分析精度高,具有耗时短、检测范围广、检测结果准确等优点,成为测定硅酸盐全岩常用的方法,分析精度优于 1%。称取 40 mg 样品于 Tenon 罐中,加入 HNO₃ 和 HF 充分溶解后,用 1% 的 HNO₃ 稀释,在 Finigan MAT 公司生产的双聚焦电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)ELEMENT 上测定微量和稀土元素,分析精度优于 5%,该方法能同时对多种元素进行测定,检测范围广,且检测限低,灵敏度、准确度高。分析结果见表 1,最后运用 Geokit 软件(路远发,2004)对东乌旗角闪辉长岩进行地球化学投图。

2.2 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析

锆石的挑选在河北省区域地质调查研究所实

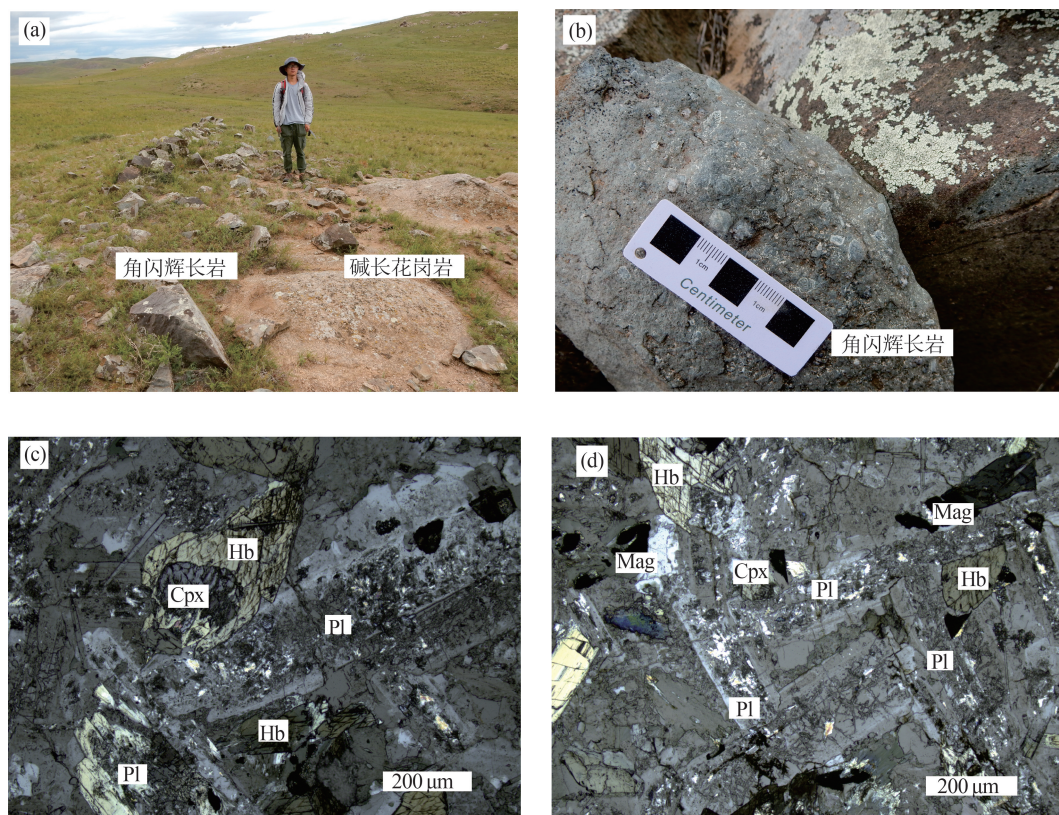


图 2 东乌旗角闪辉长岩野外(a、b)及镜下(c、d)照片

Fig. 2 Macrofeatures(a,b) and photomicrographs(c,d) of the bojite in Dong Ujimqi

a—角闪辉长岩野外露头;b—角闪辉长岩手标本;c—包含结构;d—斜长石堆晶结构;

Pl—斜长石;Hb—角闪石;Cpx—单斜辉石;Mag—磁铁矿

验室完成。利用标准重矿物分离技术分选,经双目镜挑选,将不同特征的锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定,待其固化之后,将表面抛光至锆石中心。原位分析前,通过反射光和阴极发光图像研究锆石晶体的形态与内部结构特征,选择最佳分析点。锆石制靶、透射光、反射光及阴极发光(CL)图像、锆石 U-Pb 年龄测定均在天津地质调查中心实验室进行,锆石 U-Pb 年龄测定所用仪器为 193 nm 激光剥蚀系统(New Wave)和多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS, Neptune)。U-Pb 年代学测试方法参考耿建珍等(2011),采用 GJ-1 为外部标准校正锆石的 U、Th 和 Pb 同位素分馏,采用 NIST610 玻璃为标样计算锆石中 U、Th 和 Pb 含量;利用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2010)和 Isoplot 程序进行数据处理,分析结果见表 2。

Lu-Hf 同位素分析在天津地质调查中心实验室

进行,所用仪器为 193 nm 激光剥蚀系统(New Wave)和多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS, Neptune)。Lu-Hf 同位素分析方法和同位素分馏校正参考耿建珍等(2011),分析结果见表 3。

3 分析结果

3.1 地球化学特征

东乌旗角闪辉长岩的 6 件样品主量和微量元素结果及特征值列于表 1。数据表明,角闪辉长岩的 SiO_2 含量为 50.88%~51.98%; TiO_2 含量为 1.1%~1.81%; Al_2O_3 含量为 15.45%~16.65%; MgO 的含量为 4.42%~7.41%; FeO 含量为 4.62%~6.42%,平均为 5.56%; Fe_2O_3 含量为 2.51%~3.07%; MnO 含量为 0.14%~0.16%,平均为 0.15%; CaO 含量为 5.80%~6.65%; Na_2O 含量为 1.95%~3.29%; K_2O 含量为 1.34%~1.88%; P_2O_5 含量为 0.23%~0.51%。

表 1 内蒙古东乌旗角闪辉长岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace elements and REE of bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

编号	AO1.1	AO1.2	AO1.3	AO1.4	AO1.5	AO1.6
SiO ₂	51.22	51.32	49.88	50.95	50.88	51.98
Al ₂ O ₃	15.68	15.55	16.84	15.45	16.65	16.57
Fe ₂ O ₃	3.38	3.41	2.71	3.07	2.78	2.51
FeO	6.08	6.04	4.79	6.42	4.62	5.65
CaO	5.73	5.67	6.52	5.8	5.95	6.65
MgO	6.82	6.96	5.44	7.41	4.42	6.88
K ₂ O	1.96	1.4	1.25	1.88	1.52	1.34
Na ₂ O	2.5	1.95	2.41	2.47	1.95	3.29
TiO ₂	1.82	1.86	1.2	1.81	1.37	1.1
P ₂ O ₅	0.5	0.51	0.24	0.51	0.32	0.23
MnO	0.17	0.16	0.12	0.16	0.14	0.15
烧失量	2.46	2.41	2.06	2.36	2.14	3.02
总量	98.32	97.24	93.46	98.29	92.74	99.37
Mg [#]	57.16	57.69	57.32	59.02	52.56	60.82
TFeO	9.12	9.11	7.23	9.18	7.12	7.91
m/f	0.49	0.48	0.49	0.48	0.46	0.41
La	23.9	23.9	14.8	22.7	19.4	12.4
Ce	62.4	61.2	32.6	59.7	43.2	28.6
Pr	8.33	8.27	4.93	8.05	6.35	4.61
Nd	36.1	36.1	21.8	35.1	27.7	20.9
Sm	7.7	7.68	4.85	7.57	5.9	4.84
Eu	2.14	2.14	1.52	2.11	1.74	1.42
Gd	7.11	7.12	4.48	6.98	5.2	4.4
Tb	1.18	1.18	0.72	1.15	0.8	0.74
Dy	6.62	6.57	3.92	6.44	4.1	4.06
Ho	1.26	1.27	0.73	1.23	0.74	0.76
Er	3.56	3.52	1.99	3.43	1.98	2.12
Tm	0.52	0.51	0.28	0.49	0.28	0.31
Yb	3.19	3.2	1.77	3.12	1.7	1.99
Lu	0.49	0.48	0.27	0.47	0.26	0.3
Rb	82.6	84.8	45.2	86.6	61.1	30.4
Sr	648	658	523	644	534	383
Ba	476	464	394	481	344	193
V	202	201	175	199	178	184
Sc	26.4	26.8	19.9	26.5	17.8	24.1
Nb	9.6	9.5	5.43	9.37	6.95	4.66
Ta	0.71	0.71	0.42	0.68	0.46	0.35
Zr	214	217	128	211	168	129
Hf	5.72	5.61	3.93	5.51	4.86	3.86
Ga	19.2	19.3	20.4	19.2	21.6	20
U	0.69	0.74	0.9	0.74	0.77	0.6
Th	3.32	3.22	2.67	3.09	2.46	1.72
Cr	324	326	160	350	105	283
Ni	96.6	97.2	72.6	112	55.4	117
Co	33.8	33.5	26.1	35.2	24.3	35.2
Li	56.7	55	46.9	52.8	48.1	41.9
Y	30	30.2	17.2	29.4	17.4	17.7
ΣREE	164.5	163.14	94.66	158.54	119.35	87.45
LREE	140.57	139.29	80.5	135.23	104.29	72.77
HREE	23.93	23.85	14.16	23.31	15.06	14.68
LREE/HREE	5.87	5.84	5.69	5.8	6.92	4.96
δEu	0.87	0.87	0.98	0.87	0.94	0.92
LREE/HREE	5.87	5.84	5.69	5.8	6.92	4.96
(La/Sm) _N	1.95	1.96	1.92	1.89	2.07	1.61
(La/Yb) _N	5.05	5.04	5.64	4.91	7.69	4.20

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$; TFeO = FeO + 0.8998Fe₂O₃; N 为球粒陨石标准化值 (Gill et al., 1981); m/f = (TFeO/72)/(MgO/40); 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

表 2 内蒙古东乌旗角闪辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Th-Pb dating results of bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

测点号	元素含量		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma			
	U	Pb		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
	$/10^{-6}$	$/10^{-6}$											
AO-1.02	1366	81	0.3028	0.0474	0.0008	0.3373	0.0113	0.0512	0.0016	299	5	295	3
AO-1.03	65	4	1.0229	0.0465	0.0007	0.3403	0.0260	0.0530	0.0041	293	5	297	3
AO-1.06	35	2	1.1345	0.0464	0.0010	0.3295	0.0365	0.0508	0.0062	292	6	289	2
AO-1.07	351	21	0.5198	0.0473	0.0006	0.3481	0.0133	0.0531	0.0020	298	4	303	3
AO-1.08	242	17	1.0399	0.0507	0.0007	0.3711	0.0156	0.0532	0.0022	319	4	320	2
AO-1.09	408	25	0.6024	0.0453	0.0006	0.3533	0.0136	0.0562	0.0021	286	4	307	2
AO-1.10	564	37	0.9518	0.0478	0.0005	0.3195	0.0133	0.0485	0.0021	301	3	282	3
AO-1.11	356	22	0.5513	0.0467	0.0005	0.3421	0.0122	0.0531	0.0020	294	3	299	2
AO-1.12	1065	64	0.4597	0.0473	0.0006	0.3502	0.0112	0.0533	0.0017	298	3	305	2
AO-1.14	439	26	0.2281	0.0488	0.0004	0.3795	0.0114	0.0562	0.0017	307	3	327	2
AO-1.16	299	19	0.6921	0.0492	0.0006	0.3618	0.0148	0.0540	0.0026	309	4	314	3
AO-1.17	584	39	0.4705	0.0502	0.0006	0.3687	0.0118	0.0530	0.0016	316	4	319	2
AO-1.20	614	38	0.4823	0.0470	0.0005	0.3752	0.0126	0.0580	0.0020	296	3	323	3
AO-1.22	208	16	1.6944	0.0466	0.0006	0.3458	0.0152	0.0542	0.0026	293	4	302	3
AO-1.23	393	22	0.2813	0.0457	0.0005	0.3409	0.0117	0.0541	0.0020	288	3	298	2
AO-1.24	277	20	1.4042	0.0483	0.0006	0.3592	0.0141	0.0538	0.0022	304	4	312	3
AO-1.25	86	6	1.4448	0.0465	0.0007	0.3486	0.0160	0.0544	0.0025	293	4	304	3
AO-1.26	495	35	1.2613	0.0482	0.0004	0.3569	0.0091	0.0534	0.0014	304	3	310	2
AO-1.27	242	16	0.7163	0.0492	0.0005	0.3592	0.0138	0.0526	0.0020	310	3	312	3
AO-1.29	212	13	0.6793	0.0481	0.0005	0.3463	0.0132	0.0520	0.0020	303	3	302	3
AO-1.30	1128	73	1.2783	0.0482	0.0008	0.3498	0.0095	0.0524	0.0013	303	5	305	2
AO-1.31	1611	101	0.9774	0.0473	0.0007	0.3530	0.0116	0.0537	0.0016	298	4	307	3
AO-1.32	260	15	0.5638	0.0476	0.0006	0.3527	0.0147	0.0537	0.0024	300	4	307	2
AO-1.02	1366	81	0.3028	0.0474	0.0008	0.3373	0.0113	0.0512	0.0016	299	5	295	2
AO-1.03	65	4	1.0229	0.0465	0.0007	0.3403	0.0260	0.0530	0.0041	293	5	297	2

样品全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 介于 3.47% ~ 4.63% 之间, 平均值 4.15, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.4 ~ 0.78, 且 K_2O 含量均小于 Na_2O 含量。样品的 m/f 值为 0.45~0.58, $\text{Mg}^\#$ 值介于 52.56~60.82 之间。在 TAS 图解(图 3-a)中, 样品点均落入角闪辉长岩区域; 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 3-b)中, 样品点落入钙碱性范围, 显示其属于钙碱性系列岩石。

东乌旗角闪辉长岩稀土元素总量 ΣREE 较高, 变化范围为 $87.45 \times 10^{-6} \sim 164.5 \times 10^{-6}$, 平均值为 131.27×10^{-6} 。轻稀土元素总量 LREE 的区间值为 $72.77 \times 10^{-6} \sim 140.57 \times 10^{-6}$, 平均值为 112.1×10^{-6} , 重

稀土元素总量区间值为 $14.16 \times 10^{-6} \sim 23.93 \times 10^{-6}$, 平均值为 19.16×10^{-6} 。轻稀土元素 (LREE) 相对于重稀土元素 (HREE) 略富集, 轻、重稀土元素比值 (LREE/HREE) 为 4.96 ~ 6.92, 平均值为 5.84, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.2 \sim 7.69$, 平均值为 5.42, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.61 \sim 2.07$, 平均值为 1.91, 说明轻、重稀土元素之间和重稀土元素内部的分馏程度中等, LREE/HREE 值较稳定, δEu 值为 0.87~0.98, 平均值为 0.89, 显示 Eu 异常不明显。

在角闪辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图中, 样品的配分模式表现出相同的变化趋势,

表 3 东乌旗角闪辉长岩锆石 Lu-Hf 同位素数据分析结果

Table 3 Zircons Lu-Hf isotopic results of bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM} /Ma	T _{DM1} /Ma	f _{Lu/Hf}
299	0.04876	0.00139	0.28272	0.00001	0.28271	-2.01000	4.32000	767	1039	-0.96
293	0.02453	0.00071	0.28277	0.00002	0.28277	0.07000	6.38000	672	903	-0.98
292	0.06036	0.00170	0.28281	0.00002	0.28280	1.36000	7.46000	637	833	-0.95
298	0.03190	0.00091	0.28283	0.00002	0.28282	1.95000	8.33000	600	782	-0.97
319	0.03430	0.00095	0.28284	0.00002	0.28283	2.40000	9.22000	583	741	-0.97
286	0.04508	0.00129	0.28278	0.00002	0.28278	0.39000	6.44000	669	893	-0.96
301	0.05045	0.00143	0.28282	0.00002	0.28281	1.61000	7.94000	622	808	-0.96
294	0.05133	0.00143	0.28285	0.00002	0.28284	2.78000	8.99000	575	738	-0.96
298	0.03922	0.00115	0.28278	0.00002	0.28277	0.18000	6.53000	675	898	-0.97
307	0.04559	0.00138	0.28277	0.00002	0.28276	-0.06000	6.44000	689	911	-0.96
309	0.04025	0.00119	0.28279	0.00002	0.28279	0.78000	7.34000	652	854	-0.96
316	0.05643	0.00166	0.28278	0.00003	0.28277	0.23000	6.85000	682	891	-0.95
296	0.02016	0.00063	0.28277	0.00002	0.28276	-0.20000	6.20000	681	917	-0.98
293	0.05722	0.00167	0.28280	0.00003	0.28279	1.06000	7.19000	649	852	-0.95
288	0.02312	0.00074	0.28278	0.00002	0.28277	0.12000	6.31000	670	903	-0.98
304	0.04972	0.00143	0.28278	0.00002	0.28277	0.17000	6.59000	681	900	-0.96
293	0.05418	0.00158	0.28278	0.00002	0.28277	0.30000	6.45000	678	899	-0.95
304	0.03553	0.00112	0.28273	0.00002	0.28273	-1.37000	5.10000	737	994	-0.97
310	0.04182	0.00143	0.28291	0.00002	0.28290	4.72000	11.25000	496	604	-0.96
303	0.08356	0.00249	0.28288	0.00003	0.28287	3.96000	10.14000	543	671	-0.93
303	0.02116	0.00065	0.28285	0.00001	0.28284	2.64000	9.18000	569	732	-0.98

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10^4$; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10^4$; $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}-1}$; 其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.032200$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038400$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283250$; f_{CC} 、 f_s 、 f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$, t 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$

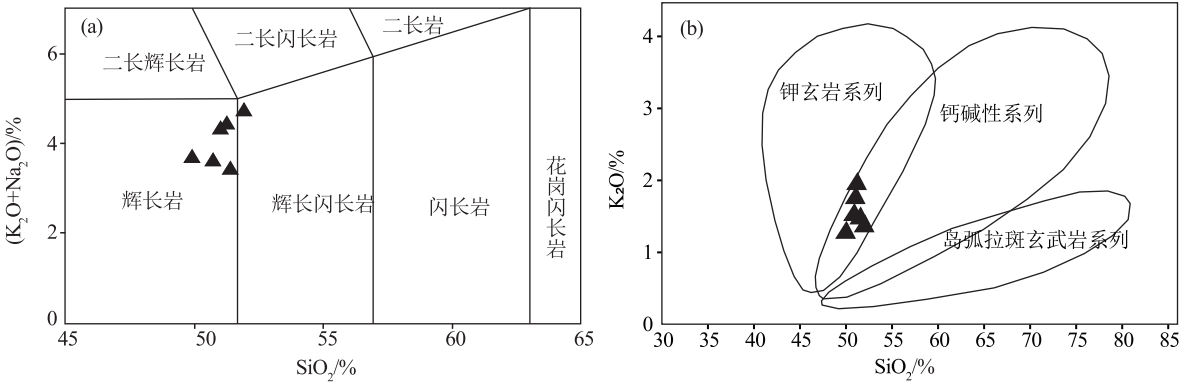


图 3 东乌旗角闪辉长岩 TAS 分类图解(a, Middlemost et al., 1994)和 SiO₂-K₂O 分类图解(b)

Fig. 3 TAS classification(a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams of the Dong Ujimqi bojite

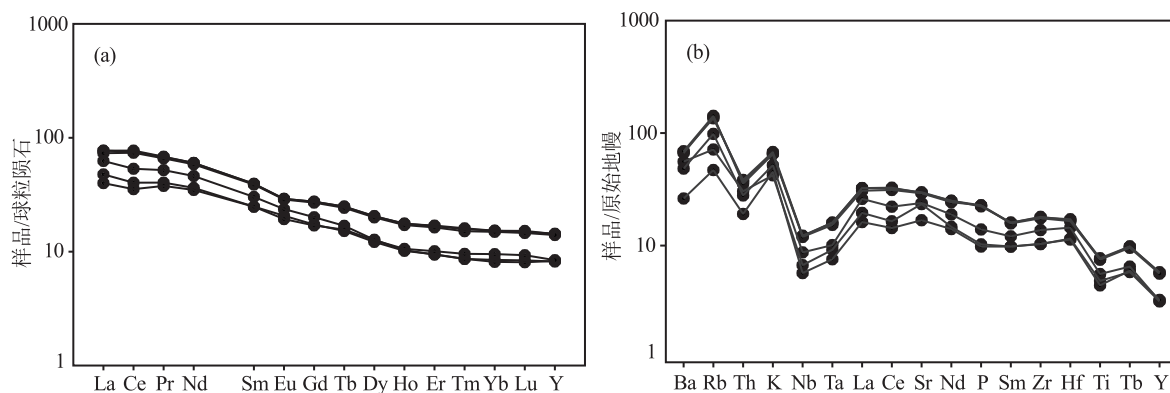


图 4 东乌旗角闪辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a, Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, Gill, 1981)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns(b) of the bojite in Dong Ujimqi

显示出轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对平坦的右倾配分模式(图 4-a),稀土元素配分曲线较一致。在微量元素原始地幔标准化蛛网图解中,东乌旗角闪辉长岩表现出明显富集大离子亲石元素如 Rb、K、Ba,亏损高场强元素如 Nb、Ta、Ti 等特征(图 4-b),说明岩浆可能受到地壳物质的混染。Sr 的富集受控于斜长石,表明存在斜长石的堆晶作用。Nb、Ta、Ti 的负异常,表明角闪辉长岩可能形成于与俯冲带有关的岛弧环境。Nb、Ta 亏损是板块俯冲环境岩浆的典型特征(李长民等, 2009),暗示岩浆源区可能受到俯冲板片影响。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

东乌旗角闪辉长岩样品(AO-1)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果数据列于表 2。从获得的样品阴极发光图像(图 5)可以看出,分选出的锆石结构较均一,晶形多呈半自形,多呈不规则板

状、短柱状,颗粒长 100~150 μm ,长宽比为 1.5:1~3:1。锆石阴极发光图像总体偏暗,内部无残留核,外部无变质边,具有基性岩浆成因锆石的特征(李长民, 2009)。

对锆石选择合适的位置进行 U-Pb 同位素测试,共选择 23 个测点进行实验,测点均在生长环带发育的区域。数据显示, U 含量变化范围为 $35 \times 10^{-6} \sim 1611 \times 10^{-6}$, Pb 含量为 $2.0 \times 10^{-6} \sim 101.0 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.3028~1.6944, 含量较高且变化范围较大,除 AO-1.02 点外,其余 22 个测试点的 Th/U>0.4(表 2),具明显的岩浆锆石特征(吴元保等, 2004)。测得的 23 颗有效锆石年龄数据较集中,均落于谐和线上或其附近(图 6-a)。22 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $299 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD = 3.7, $n=22$)(图 6-b)。被测锆石为岩浆锆石,且测试点均落于谐和线上及其附近,应代表其结晶年龄。

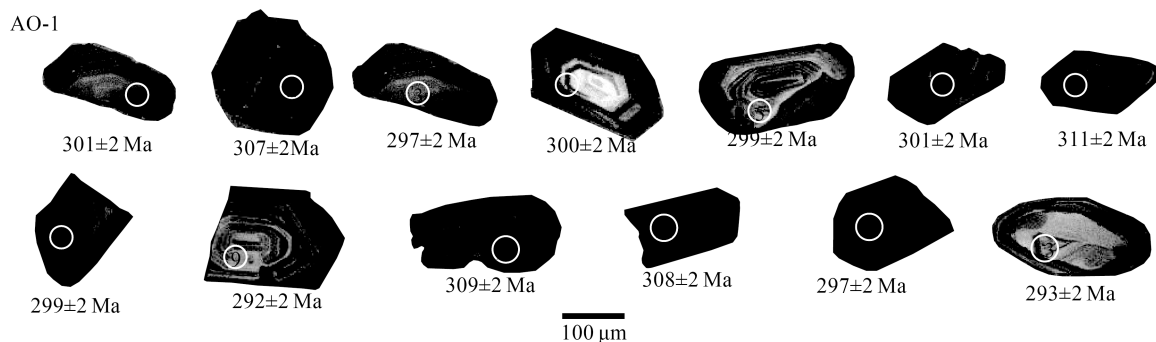


图 5 内蒙古东乌旗角闪辉长岩代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 CL images of representative zircons of the bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对角闪辉长岩中锆石进行 Lu-Hf 同位素测试,测试选点位置尽量选择与 U-Pb 年龄测定位置相近,分析结果见表 3。东乌旗角闪辉长岩中锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.0006 \sim 0.0025$, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 $-0.98 \sim -0.95$, 低于上地壳 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0093$, $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$) 的值。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282710 \sim 0.282900$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $5.1 \sim 11.25$, 地壳模式年龄 (T_{DM1}) 为 $1039 \sim 604 \text{ Ma}$ 。

4 讨论

4.1 岩石成因及源区特征

东乌旗角闪辉长岩的稀土元素总量较低,为 $87.45 \times 10^{-6} \sim 124.78 \times 10^{-6}$ 。从稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 3-a)可以看出,角闪辉长岩轻、重稀土元素分馏不明显,为轻稀土元素略富集、重稀土元素相对平坦的右倾配分模式,稀土元素配分曲线较一致,表明该岩浆具有同源岩浆演化过程,且分异程度较低,可能源于部分熔融的地幔源区。Eu 异常不明显,轻、重稀土元素比值平均为 4.6,表明稀土元素分异程度较低。Rb、Ba、K 等大离子亲石元素在角闪辉长岩中较富集,相对亏损 Nb、Ti、Ta 等高场强元素,与岛弧岩浆岩地球化学特征相似,表明其源区可能与古亚洲洋板块的俯冲有关。

前人将 $60 \sim 71$ 看作未分异的初始岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值,这里 $\text{Mg}^\# = 100n(\text{Mg})/n(\text{Mg}) + n(\text{Fe}^{2+})$ (Langmuir et al., 1977); 邓晋福等 (2004) 进行研究后得出岩石

初始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值应在 $65 \sim 75$ 之间的结论。按 Langmuir 的公式计算,东乌旗角闪辉长岩样品的 $\text{Mg}^\#$ 值介于 $53 \sim 60$ 之间,表明角闪辉长岩并不是由原始岩浆侵入作用形成的。在原始岩浆中, Ni 的含量也影响着原始岩浆的形成。Hess et al. (1992) 认为原始岩浆中 Ni 值应为 $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, 东乌旗角闪辉长岩的 Ni 值在 $72.6 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$ 之间,小于原始岩浆中的 Ni 值,表明在岩石形成过程中可能发生了地壳物质混染、部分熔融或分离结晶等作用。 $\text{Mg}^\#$ 与 SiO_2 的含量无关,角闪辉长岩样品的主要氧化物随着 MgO 含量的变化, CaO 、 TFe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 等未显示有相关性,说明两者之间并无关联,岩浆分异演化过程中与分离结晶作用的关系不大。

在中国东部地壳中 Nb/U 平均值为 9.6, 原始地幔中为 34。东乌旗角闪辉长岩的 Nb/U 值为 $6.03 \sim 13.91$, 低于原始地幔中 Nb/U 值,表明岩浆来源于亏损地幔,且受到地壳物质的混染。大陆地壳 La/Nb 平均值约为 2.2, 原始地幔的 La/Nb 值为 $0.98 \sim 1$, 东乌旗角闪辉长岩 La/Nb 值为 $2.4 \sim 2.79$, 略高于原始地幔中的值,说明角闪辉长岩岩浆源区受到了壳源物质混染的影响,但影响程度较弱。LILE/HFSE 值也能反演岩浆早期原岩的性质,在东乌旗角闪辉长岩样品均出现 $\text{Th} > \text{Ta}$ 和 $\text{La} > \text{Ta}$ 的现象,也可以说明岩石受到陆壳组分的混染。Nb/Ta 值为 $12.92 \sim 15.10$, 平均值为 13.67, 相比于幔源岩石 (≈ 17.5) 和陆壳岩石 (≈ 11), 表明初始岩浆为幔源物质和陆壳成分混合形成。另外,岩浆发生陆壳混

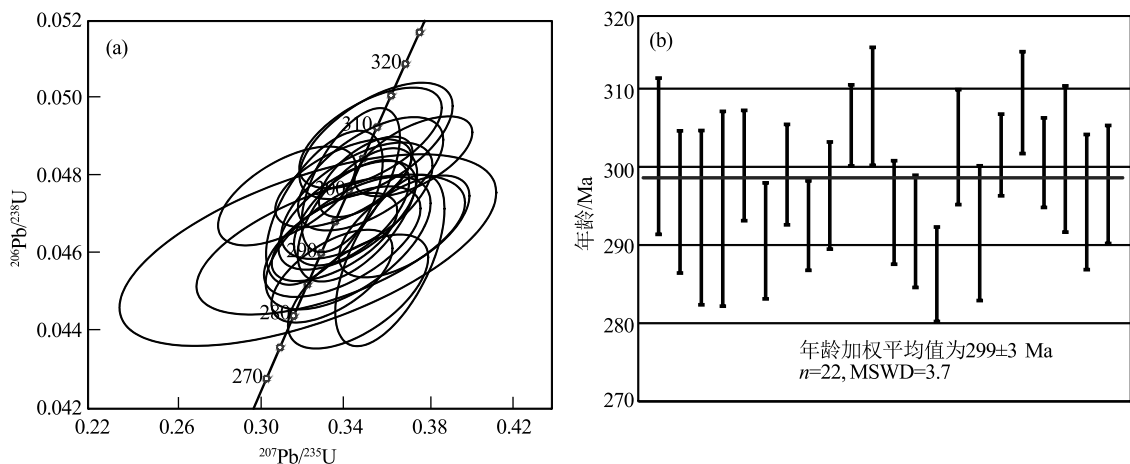


图 6 内蒙古东乌旗角闪辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及年龄加权平均值(b)

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram(a) and weighed mean age(b) of the bojite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

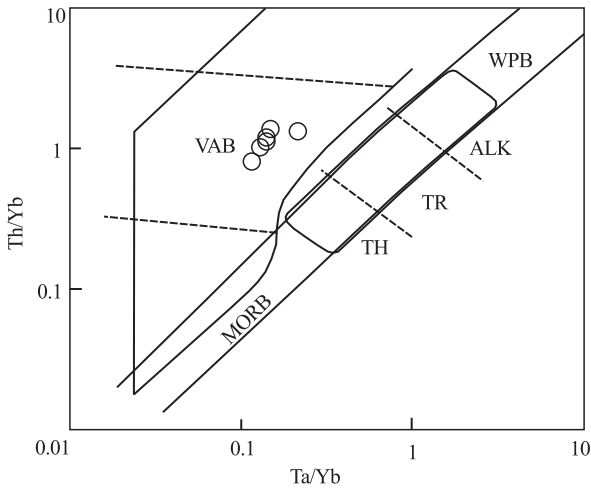


图 7 东乌旗角闪辉长岩 Ta/Yb-Th/Yb 图解
(Pearce et al., 1979)

Fig. 7 Ta/Yb-Th/Yb diagram of bojite in Dong Ujimqi
VAB—火山弧玄武岩; MORB—洋中脊拉斑玄武岩; WPB—
板内玄武岩 (TH—拉斑玄武质, TR—过渡的, ALK—碱性的)

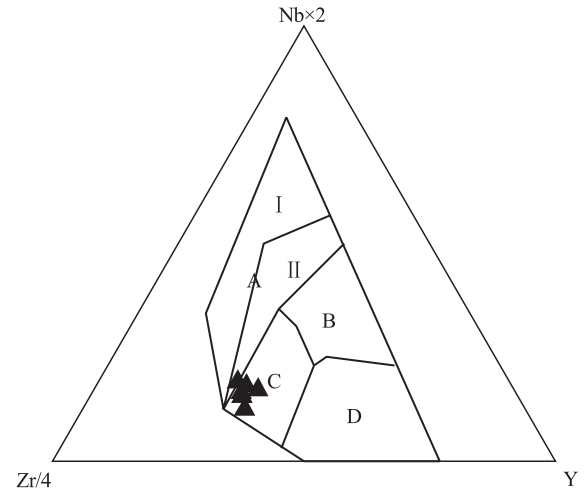


图 9 东乌旗角闪辉长岩 Nb-Zr-Y 图解 (Meschede et al., 1986)

Fig. 9 Nb-Zr-Y diagram of bojite in Dong Ujimqi
AI—板内碱性玄武岩; AII—板内玄武岩和板内拉斑玄武岩;
B—E-MORB; C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩;
D—N-MORB 和火山弧玄武岩

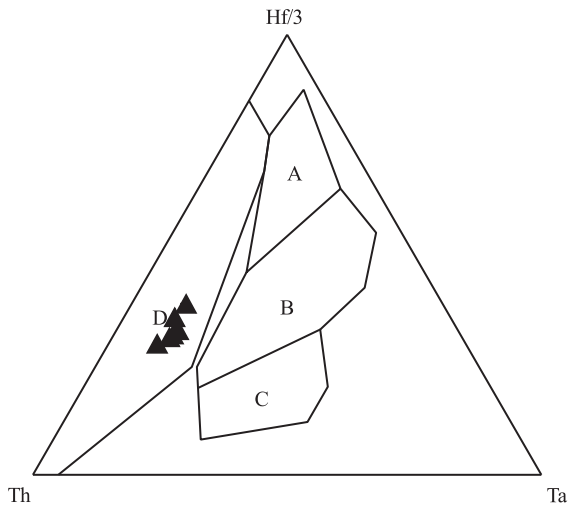


图 8 东乌旗角闪辉长岩 Th-Hf-Ta 图解 (Wood et al., 1980)

Fig. 8 Th-Hf-Ta diagram of bojite in Dong Ujimqi
A—N 型 MORB; B—E 型 MORB 和板内拉斑玄武岩;
C—碱性板内玄武岩; D—火山弧玄武岩

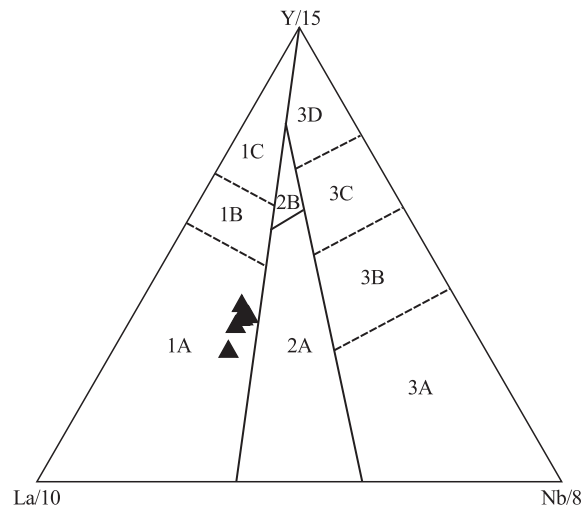


图 10 东乌旗角闪辉长岩 La-Nb-Y 图解 (Cabanis et al., 1989)

Fig. 10 La-Nb-Y diagram of bojite in Dong Ujimqi
1—火山弧玄武岩 (1A—钙碱性玄武岩; 1C—火山弧拉斑玄武岩;
1B—1A 和 1C 的重叠区域); 2A—大陆玄武岩; 2B—弧后盆地玄武岩;
3A—大陆内裂谷区碱性玄武岩; 3B, 3C—E 型 MORB (3B 是富集的,
3C 是弱富集的); 3D—N 型 MORB

染作用会出现弱正 T_m 异常,这与角闪辉长岩在稀土元素配分曲线上出现的结果吻合。

东乌旗角闪辉长岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282710 \sim 0.282900$, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+5.1 \sim +11.25$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄关系图 (图 11) 显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在亏损地幔线附近,表现出弱富集至弱亏损的特征,表明角闪辉长岩母岩浆来源于亏损地

幔源区,在上升过程中很少受到壳源物质的混染。

4.2 构造背景

研究区发育大规模的石炭纪—二叠纪岩浆岩,记录了贺根山洋盆关闭、板块碰撞造山、碰撞后伸展造山等板块运动过程。目前古亚洲洋闭合时间

存在很大分歧,部分学者认为闭合时间为晚泥盆世—早石炭世(Tang et al., 1990; Xu et al., 2015),而 Xiao et al. (2009) 认为其闭合时间应为二叠纪晚期。童英等(2010)认为,北部贺根山蛇绿岩与南部索伦山—西拉木伦蛇绿岩代表 2 个洋盆体系,其间由锡林浩特古陆分隔。李锦轶等(2007)认为南部的西拉木伦洋盆到中二叠世晚期—三叠纪在西拉沐伦河一带才最终闭合。而北部贺根山洋盆闭合较早,主要依据有以下几点:①Li et al. (2018) 认为二连—贺根山蛇绿岩带发育区的迪彦庙 SSZ 型蛇绿岩中哈达特前弧玄武岩 333.4 ± 8.5 Ma 指示了洋内初始俯冲阶段,表明贺根山洋盆在早石炭世处于洋内初始俯冲阶段和洋陆转化首次岩浆作用的起始时代(李英杰等, 2012; 2018); ②李英杰等(2015)认为西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的岩石组合也反映岩浆来自亏损的地幔,可能是俯冲作用形成的。程银行等(2016)对内蒙古东乌旗早二叠世超镁铁岩和花岗岩进行研究,认为其形成于板内伸展构造体制,与古亚洲洋闭合之后板内非造山作用有关; ③周志广等(2010)在内蒙古东乌旗穆沁旗发现了早—中二叠世华夏植物群,且在多个地点发现其与安加拉植物群发生混生,由此认为早二叠世前索伦—林西蛇绿岩带及贺根山蛇绿岩带代表的洋盆已经闭合。结合以上信息,笔者认为,研究区晚古生代构造主要表现为 3 个阶段:第一阶段是洋壳俯冲和板块碰撞阶段(335~295 Ma),主要表现为大规模的陆缘弧中酸性火山岩和少量的侵入岩,少量的

片麻状闪长岩和平行于贺根山蛇绿混杂岩带构造片理化带、韧性变形带。第二阶段是造山后伸展阶段(295~280 Ma),主要表现为大规模的侵入岩发育,侵入到第一阶段形成的火山岩中,以二长花岗岩、正长花岗岩为主。第三阶段是非造山阶段(280~270 Ma)(内部数据未发表),主要表现为大规模碱质花岗岩、辉绿岩墙开始发育,标志着造山阶段结束。

相对不活泼的高场强元素可以用于研究岩石的成因和判别岩石形成的构造环境。Pearce et al. (1979) 提出,利用 Th/Yb 和 Ta/Yb 之间的差异来判别岩浆是否形成于火山弧环境。如图 7 所示,东乌旗角闪辉长岩样品均落入 VAB(火山弧玄武岩)区域;在 Th-Hf-Ta 图解(图 8)中,样品点全部落入 VAB 范围内;Nb-Zr-Y 图解(图 9)中,5 个样品点落入 C 区(板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩)中,1 个样品点落入火山弧玄武岩和板内玄武岩的边界上,并有向 AII 区偏移的趋势;在 La-Nb-Y 图解(图 10)中,样品点落入火山弧玄武岩—钙碱性玄武岩中。因此,东乌旗角闪辉长岩可能形成于岛弧俯冲碰撞背景下,在时间上接近造山后伸展阶段。

4.3 约 299 Ma 构造岩浆事件

中亚造山带东段广泛发育晚石炭世—早二叠世形成的高钾钙碱性花岗岩、碱质 A 型花岗岩,时间介于 320~280 Ma 之间(洪大卫等, 2000; 张玉清等, 2013; 武跃勇等, 2016; 王树庆等, 2019),表明晚石炭世—早二叠世两大板块俯冲碰撞—造山后存在巨量花岗质岩浆事件,然而是否发育有俯冲碰撞—造山后板内伸展阶段基性侵入岩石的记录? 目前西伯利亚板块东南缘基性岩的研究多集中在二连—贺根山及其南侧的蛇绿混杂岩(贺宏云等, 2011; 李英杰等, 2012; 2015),均为古亚洲洋向北俯冲的残留物,多为岛弧型和洋中脊型岩浆岩。西伯利亚板块西南缘的新疆北天山一带发现有早二叠世造山后伸展构造背景的镁铁—超镁铁岩(王玉往等, 2000; 邓宇峰等, 2011)。程银行等(2020)对东乌旗新发现的辉石橄榄岩研究后获得年龄为 317.8 ± 1.6 Ma,其形成于俯冲流体改造的岩石圈地幔的减薄作用。本次在东乌旗西部新发现了表示深部岩浆活动的岩石记录——角闪辉长岩,并获得了 299 ± 3 Ma 的锆石 U-Pb 同位素年龄,标志着这一时期幔源性构造岩浆事件的存在。笔者在东乌旗西山地区

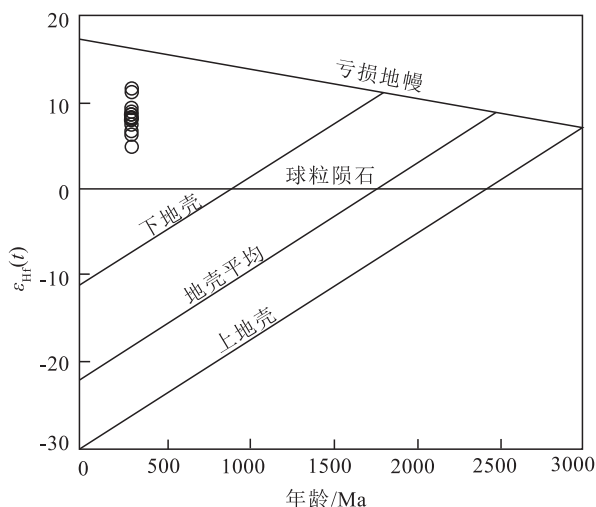


图 11 东乌旗角闪辉长岩锆石 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(Yang et al., 2006)

Fig. 11 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of zircon in Dong Ujimqi

获得的花岗岩年龄 300 ± 1.4 Ma(内部资料),以及辛后田等(2011)获得东乌旗狼麦温都尔宝力高庙组上段安山岩年龄(303.4 ± 6.7 Ma),王新宇等(2013)获得的内蒙古维拉斯托花岗岩 SHRIMP 年龄(298 ± 2.5 Ma)应与本文的角闪辉长岩属同期构造岩浆事件。本次研究表明,东乌旗地区在晚石炭世—早二叠世存在少量的基性岩浆活动,标志着构造背景由俯冲造山向造山后伸展转变。

5 结 论

(1)内蒙古东乌旗角闪辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 299 ± 3 Ma,表明形成时代属晚石炭世。

(2)东乌旗角闪辉长岩属钙碱性系列,具有较高的 $Mg^\#$ 值,高 V 和 Cr 含量。相对于原始地幔富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),岩石稀土元素总量较高,轻稀土元素(LREE)相对于重稀土元素(HREE)富集, Eu 异常不明显。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282710 \sim 0.282900$,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+5.1 \sim +11.25$,表现出弱富集—弱亏损的特征,以上特征表明东乌旗角闪辉长岩岩浆源区为亏损地幔,且在上升过程中受到较少壳源物质的污染。

(3)根据地球化学元素特征,结合区域大地构造位置、区域构造演化等特征,认为东乌旗角闪辉长岩形成于古亚洲洋俯冲带岛弧构造环境中,且存在约 299 Ma 较大规模的构造岩浆事件。

致谢:中国地质调查局天津地质调查中心实验室涂家润博士和郭虎老师在实验工作中提供了大量指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

Boynton W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [C]//Henderson P. Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 1984: 63–144.

Cabani B, Lecomte M. Le diagramme $\text{La}/10-\text{Y}/15-\text{Nb}/8$: Un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale [J]. Compte Rendus de l'Académie des Sciences Series II, 1989, 309: 2023–2029.

Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 1–358.

Hess P C. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts [C]//Morgan, J P, Black D K, Sinton J M. Mantle flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges. Geophysical Monograph, American

Geophysical Union, 1992, 71: 67–102.

Langmuir C H, Bender J F, Bence A E. Petrogenesis of basalts from the famous area: Mid-Atlantic ridge [J]. Earth Planet Sci. Lett., 1977, 36: 133–156.

Li Y J, Wang G H, Santosh, M, et al. Super-subduction zone ophiolites from Inner Mongolia, North China: Implications for the tectonic history of the southeastern Central Asian Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2018, 59: 126–143.

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.

Meschede M. A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram [J]. Chemical Geology, 1986, 56: 207–218.

Middlemost E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System [J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215–224.

Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks [J]. Contributions to Mineral Petrology, 1979, 69: 33–47.

Tang K D. Tectonic development of the Paleozoic foldbelts on the northern margin of the Sino-Korean craton [J]. Tectonics, 1990, 9(2): 249–260.

Wood D A. 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 the British Tertiary Volcanic Province [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50: 11–30.

Xiao W J, Windley B, 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): 1069.

Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1189–1217.

Xu B, Zhao P, Wang Y Y, et al. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt (XMOB) in north China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 183–196.

Yang J, Wu F, Shao J, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(3/4): 336–352.

陈立辉, 韩宝福. 新疆北部乌恰沟地区镁铁质侵入岩的年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成: 对地幔源区特征和深部过程的约束 [J]. 岩石学报, 2006, (5): 1201–1214.

程银行, 李艳锋, 李敏, 等. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义 [J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2086–2096.

程银行, 李敏, 张天福, 等. 西伯利亚板块东南缘晚古生代伸展体制新证据: 东乌旗角闪辉长岩年代学及地球化学研究 [J]. 地质学报, 2015, 89(2): 262–271.

程银行, 张天福, 李艳锋, 等. 内蒙古东乌旗早二叠世超镁铁岩的发现

- 及其构造意义[J].地质学报,2016,90(1): 115-125.
- 程银行,张夏炜,王少轶,等.东乌旗晚石炭世辉石橄榄岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学[J].地球科学,2020,45(3): 844-855.
- 邓晋福,罗照华,苏尚国,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[J].北京:地质出版社,2004.
- 邓宇峰,宋谢炎,颀炜,等.新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁—超镁铁岩体的岩石成因:主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J].地质学报,2011,85(9): 1435-1451.
- 耿建珍,李怀坤,张剑,等.锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J].地质通报,2011,30(10): 1508-1513.
- 贺宏云,宝音乌力吉,杨建军.内蒙古贺根山蛇绿岩地球化学特征及其成因[J].西部资源,2011,3: 93-96.
- 洪大卫,王式洸,谢锡林,等.兴蒙造山带正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J].地学前缘,2000,7(2): 441-456.
- 李长民.锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J].地质调查与研究,2009,32(3): 161-174.
- 李化启,马瑞,梁一鸿,等.动态熔融过程中辉长岩主要矿物的熔融序列及其熔融动力学研究[J].岩石学报,2005,21(6): 1749-1758.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,等.内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J].岩石学报,2007,23(3): 565-582.
- 李英杰,王金芳,王根厚,等.内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义[J].岩石学报,2018,34(2): 469-482.
- 李英杰,王金芳,李红阳,等.内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩的识别[J].岩石学报,2012,28(4): 1282-1290.
- 李英杰,王金芳,李红阳,等.内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别[J].岩石学报,2015,31(5): 1461-1470.
- 路远发.GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J].地球化学,2004,(5): 459-464.
- 童英,洪大卫,王涛,等.中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J].地球学报,2010,31(3): 395-412.
- 王帅,李英杰,王金芳,等.内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J].地质通报,2021,40(1): 82-94.
- 王树庆,胡晓佳,赵华雷.内蒙古苏左旗洪格尔地区新发现晚石炭世碱性花岗岩[J].地质调查与研究,2019,42(2): 81-85.
- 王新宇,侯青叶,王瑾,等.内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J].现代地质,2013,27(1): 67-78.
- 王玉往,王京彬,王莉娟.内蒙古大乃林沟角闪石岩岩石学特征[J].地质论评,2000,46(3): 301-306.
- 吴元保,郑永飞.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,2004,49(16): 1589-1604.
- 武跃勇,姜海蛟,寇帅.内蒙古苏尼特左旗查干敖包地区早白垩世火山岩地质及地球化学特征[J].地质调查与研究,2016,39(1): 1-14.
- 辛后田,滕学建,程银行,等.内蒙古东乌旗宝力高庙组地层划分及其同位素年代学研究[J].地质调查与研究,2011,34(1): 1-9.
- 张健,陈井胜,李泊洋,等.内蒙古塔尔气地区晚古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J].世界地质,2011,30(4): 521-531.
- 张磊,吕新彪,刘阁,等.兴蒙造山带东段大陆弧后 A 型花岗岩特征与成因[J].中国地质,2013,40(3): 869-884.
- 张玉清,张建,屈强,等.内蒙古阿德拉嘎乌拉正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄[J].地质与资源,2013,22(4): 308-312.
- 周长勇,吴福元,葛文春,等.大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因[J].岩石学报,2005,(3): 763-775.
- 周志广,谷永昌,柳长峰,等.内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早—中二叠世华夏植物群的发现及地质意义[J].地质通报,2010,29(1): 21-25.
- 朱永峰,郭璇,周晶.新疆中天山巴仑台地区晚石炭世+ ε_{Nd} 辉长岩体的岩石学 and 同位素地球化学研究[J].岩石学报,2006,22(5): 1178-1192.