# 内蒙古东乌旗晚石炭世角闪石岩锆石 U-Pb 年龄、 地球化学及其构造意义

张夏炜<sup>1,2)</sup>,程银行<sup>2)</sup>,李英杰<sup>1)</sup>,许旭<sup>1)</sup>,滕学建<sup>2)</sup>,王少铁<sup>2)</sup>,李影<sup>2)</sup>,刘海东<sup>3)</sup>

1)河北地质大学地球科学学院,河北石家庄,050031;2)中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170;
 3)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京,100083

內容提要:为研究兴蒙造山带晚古生代地幔性质和造山演化特征,对东乌旗巴彦都兰新识别出的角闪石岩进行了岩相学、角闪石电子探针分析、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素和岩石地球化学分析。结果表明,东乌旗角闪石岩主要由角闪石(85%~90%)、少量斜长石(5%)和磁铁矿(<5%)等组成。获得的角闪石岩测年样品的锆石 U-Pb 年龄为 310±1 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<sub>2</sub>含量为48.66%~52.50%,MgO 含量 11.53%~13.10%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 10.11%~12.18%,Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量 2.21%~3.13%,小于3.5%,m/f 比值为0.36~0.45,Mg\* 值为70.27~74.54,TFeO 值为7.77~10.14;稀土元素球粒陨石标准化配分模式表现为轻稀土相对富集的右倾型,岩石富集大离子亲石元素 Rb、K等,相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti。电子探针分析结果显示角闪石岩中角闪石属于钙质角闪石,具有幔源角闪石的特点。角闪石岩中锆石 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值为7.47~15.54,单阶段地壳模式年龄( $T_{\rm DM1}$ )为847~332 Ma,表明其源区主要为亏损地幔。结合区域地质演化,认为东乌旗角闪石岩可能形成于古亚洲洋俯冲背景下,这一发现为兴蒙造山带晚古生代地幔构造岩浆演化提供了岩石证据。

关键词:角闪石岩;晚石炭世;锆石 U-Pb 年龄;Hf 同位素;兴蒙造山带

内蒙古东乌珠穆沁旗(简称东乌旗)位于西伯利 亚板块与华北板块之间的兴蒙造山带中东部,该地 区广泛发育晚古生代花岗岩,其演化历史记录了古 亚洲洋的关闭及拼合造山过程,因此备受广大地质 学者关注。前人对这一地区晚古生代造山演化研究 有不同认识:大陆边缘弧形钙碱性花岗岩(Zhang Jian et al., 2011; Wang Xinyu et al., 2013),年代 主要集中在 335~298Ma;造山后高钾钙碱性、碱性 花岗岩(Hong Dawei et al., 2000; Tong Ying et al., 2010; Zhang Yuqing et al., 2013; Cheng Yinhang et al., 2014),年代集中在 323~273Ma 之 间;大陆弧后花岗岩(Zhang Lei et al., 2013),年代 为 325~260Ma。前述表明,这些研究多集中在中 酸性侵入岩、火山岩方面,对记录深部地幔岩浆事件 的基性一超基性岩的研究几乎空白,目前仅见窑勒 地区早二叠世角闪辉长岩(Cheng Yinhang et al., 2015)和东方红公社地区晚石炭世辉闪橄榄岩 (Cheng Yinhang et al., 2020)有相关报道,且对于 该地区是否存在有俯冲背景的岩浆事件仍需要进行 研究。本文以东乌旗西部新识别出的角闪石岩为研 究对象,在野外观察,室内岩相学的基础上,对角闪 石岩进行电子探针、锆石 LA-ICP-MS 年代学、锆石 Hf 同位素和岩石地球化学研究,并结合前人研究成 果讨论其源区性质及形成地球动力学背景,认为角 闪石岩原始岩浆来源于亏损地幔,形成于古亚洲洋 俯冲环境,该成果为晚石炭世幔源岩浆事件和俯冲 阶段提供了基性-超基性岩记录,也为该区晚古生代 构造演化研究提供了新佐证。

引用本文:张夏炜,程银行,李英杰,许旭,滕学建,王少铁,李影,刘海东. 2021. 内蒙古东乌旗晚石炭世角闪石岩锆石 U-Pb 年龄、地球化 学及其构造意义. 地质学报,95(5):1495~1507, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021074.
 Zhang Xiawei, Cheng Yinhang, Li Yingjie, Xu Xu, Teng Xuejian, Wang Shaoyi, Li Ying, Liu Haidong. 2021. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Late Carboniferous hornblendite in Dong Ujimqi Inner Mongolia and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 95(5):1495~1507.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41872068;41972061)和中国地质调查局项目(编号 1212011220446;1212011120697)共同资助的成果。

收稿日期:2020-7-12;改回日期:2020-12-15;网络发表日期:2021-03-09;责任编委:吴才来;责任编辑:黄敏、郭现轻。

作者简介:张夏炜,男,1995年生。硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:384427151@qq.com。通讯作者:程银行,男,1982 年生。副研究员,博士,从事地质矿产调查与研究工作。E-mail:weicheng1858@163.com

# 1 区域地质背景及岩相学特征

研究区位于东乌旗西部巴彦都兰地区,构造位 置为二连-贺根山构造结合带北侧,西伯利亚板块东 南缘(图 1a, b)。该区属草原覆盖区,第四系较多, 地层连续出露较差,但古生界和中生界均有不同程 度分布(图 1c)。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,岩性主要以灰绿色、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。 侵入岩主要以晚石炭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,侵入到泥鳅河组和宝力高庙组中,其间伴 有基性一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。本文研究的角闪石岩 采于绥和查干乌拉基性杂岩体中,呈条带状包体就位 于早二叠世灰白色中细粒二长花岗岩中(图 1a、b),构 造方位与围岩一致。围岩呈中细粒结构,块状构造, 时代为 277.2±0.5 Ma(Li Min et al., 2015)。

角闪石岩的岩相学特征:岩石呈黑色或灰黑色, 细粒结构,块状构造(图 2a,b),矿物组成主要有角 闪石(85%~90%)、少量斜长石(5%)和磁铁矿(< 5%)等。角闪石自形程度较好,呈长柱状或粒状,粒 度为 0.5~2.0 mm,单偏光下颜色为黄绿色(图 2c),斜消光。角闪石局部可见绿泥石化,副矿物粒 状磁铁矿沿角闪石解理缝分布(图 2c)。

# 2 样品分析方法

## 2.1 角闪石电子探针分析

矿物电子探针测试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进行,使用仪器型号 为日本岛津 EPMA-1600,测试条件:加速电压 15 kV,束流 20 nA,分析束斑直径 5 μm;测试矿物:角 闪石;测试元素:Si、Ti、Al、Mg、Fe等。分析结果见 表 1。

### 2.2 锆石测年及 Hf 同位素分析

锆石的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究所 实验室利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双 目镜下的仔细挑选,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, 将其表面抛光至锆石中心。在原位分析前,通过反 射光和 CL 图像仔细研究锆石晶体的形态与内部结 构特征来选择最佳分析点。锆石制靶、透射、反射及



图 1 内蒙古东乌旗巴彦都兰地质简图(据 Cheng Yinhang et al., 2014)

Fig. 1 Geological sketch map of Bayandulan in Dong Ujimqi, Inner Mongolia (after Cheng Yinhang et al., 2014)



图 2 内蒙古东乌旗角闪石岩野外照片和显微镜下照片 Fig. 2 Macrofeatures and photomicrographs of the hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia (a)—角闪石岩野外露头;(b)—角闪石岩手标本;(c)、(d)—角闪石岩偏光照片;Pl—斜长石;Hbl—角闪石;Mag—磁铁矿 (a)—Outcrop of hornblendite; (b)—hand specimen of hornblendite; (c)~(d)—photomicrographs of hornblendite; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Mag—magnetite

阴极发光(CL)图像、锆石 U-Pb 年龄测定与 Lu-Hf 同位素分析均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)。U-Pb 年代学测试方法见 Li Huaikun et al. (2009),采用 GJ-1 作为外部标准校正锆石的 U、 Th 和 Pb 同位素分馏,采用 NIST610 玻璃作为标样 计算锆石中 U、Th 和 Pb 含量;利用 ICPMSDataCal 程序和 Isoplot 程序进行数据处理,分析结果见表 2。Lu-Hf 同位素分析方法和同位素分馏校正见 Geng Jianzhen et al. (2011),分析结果见表 3。

#### 2.3 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。将样品熔 制成玻璃片,然后采用 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行主量元素测定,分析精度优于 1%。称取 40 mg 样品于 Tenon 罐中,加人 HNO<sub>3</sub>和 HF 充分 溶解后,用1%的 HNO<sub>3</sub>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%,分析结果见表4。

### 3 分析结果

#### 3.1 角闪石岩电子探针结果

角闪石岩的电子探针分析结果见表 1。由表 1 可知,角闪石岩中角闪石的成分变化不大。角闪石 具有较高的 MgO (14.98% ~ 16.04%)、SiO<sub>2</sub> (45.84%~48.76%)、CaO (11.77%~12.36%)和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.30%~8.66%),较低的 K<sub>2</sub>O(0.45%~ 0.62%)和 Na<sub>2</sub>O(0.77%~1.53%),此外角闪石中 还含有 TiO<sub>2</sub> (0.86%~1.56%)和少量的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.17%~0.35%)。

依据国际矿物学协会角闪石专业委员会提出的 计算方法(IMA-CNMMN角闪石专业委员会全体 成员:角闪石命名法,2001),计算角闪石的Fe<sup>2+</sup>值 和Fe<sup>3+</sup>值,基于23个氧原子为单位计算角闪石的

Table 1         Results of electron microprobe analysis of hornblende from hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia											
	样品	4-13-1	4-13-2	4-13-4	4-13-5	4-13-7	4-13-15	4-13-24	4-14-1	4-14-2	4-14-3
	$SiO_2$	48.72	48.50	48.69	47.13	47.26	48.76	47.35	46.79	45.84	46.86
	$TiO_2$	1.01	0.86	1.13	0.91	1.03	1.05	1.36	1.56	1.30	1.12
	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	7.01	6.30	6.26	7.30	7.56	5.30	7.51	7.19	8.66	7.85
	$Cr_2O_3$	0.32	0.17	0.26	0.35	0.27	0.18	0.34	0.19	0.19	0.22
五八	FeO	10.12	10.12	9.68	9.85	9.81	9.72	10.76	10.45	10.48	10.14
日万	MnO	0.18	0.21	0.19	0.16	0.19	0.21	0.17	0.18	0.20	0.18
含重	MgO	15.65	15.92	16.04	15.57	15.84	15.88	15.10	14.98	14.91	15.06
(%)	CaO	11.82	11.77	12.14	12.22	11.50	12.36	11.83	12.01	12.02	12.29
	Na <sub>2</sub> O	1.28	1.11	1.10	1.11	1.41	0.77	1.35	1.19	1.53	1.18
	$K_2O$	0.52	0.45	0.50	0.59	0.48	0.46	0.61	0.57	0.62	0.56
	Cl	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06
	Total	96.66	95.45	96.04	95.22	95.38	94.73	96.41	95.15	95.81	95.51
Т	Si	7.08	7.12	7.12	6.96	6.94	7.22	6.94	6.95	6.77	6.92
	$\mathrm{Al}^{\mathbb{N}}$	0.92	0.88	0.89	1.04	1.06	0.78	1.06	1.05	1.23	1.08
	Al	0.28	0.21	0.19	0.23	0.25	0.15	0.24	0.21	0.28	0.29
	Ti	0.11	0.09	0.12	0.10	0.11	0.12	0.15	0.18	0.15	0.13
	$\mathrm{Cr}^{3+}$	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03
С	$\mathrm{Fe}^{3+}$	0.09	0.23	0.11	0.22	0.26	0.12	0.14	0.12	0.19	0.14
	Mg	3.39	3.48	3.49	3.43	3.47	3.51	3.30	3.32	3.28	3.32
	$\mathrm{Fe}^{2+}$	1.09	0.97	1.05	0.99	0.88	1.09	1.14	1.16	1.08	1.11
	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	$\mathrm{Fe}^{2+}$	0.05	0.04	0.02	0.01	0.07	0.00	0.05	0.02	0.02	0.00
D	Mn	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
В	Ca	1.84	1.85	1.90	1.93	1.81	1.96	1.86	1.91	1.90	1.94
	Na	0.09	0.08	0.05	0.04	0.10	0.02	0.08	0.05	0.05	0.03
	Na	0.28	0.24	0.26	0.28	0.30	0.20	0.31	0.30	0.39	0.31
А	К	0.10	0.08	0.09	0.11	0.09	0.09	0.11	0.11	0.12	0.11
Fe <sup>2-</sup>	$^{+}+{\rm Fe}^{3+}$	1.23	1.24	1.18	1.22	1.20	1.20	1.32	1.30	1.30	1.25
Mg/(M	$Mg + Fe^{2+}$ )	0.75	0.77	0.77	0.77	0.79	0.76	0.74	0.74	0.75	0.75
Si/(Si	+Al+Ti)	0.84	0.86	0.86	0.84	0.83	0.87	0.83	0.83	0.80	0.82
Ca/(Ca	+Mg+Fe)	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30

表 1 内蒙古东乌旗角闪石岩中角闪石电子探针分析结果

阳离子数及相关参数。结果显示,角闪石晶体化学 式中 $(Na+Ca)_B > 1.5, \pm Na_B < 0.5, 属于钙角闪石$ 组。再按照钙角闪石组的分类, $Ca_B > 1.5, (Na + K)_A < 0.5, Si 介于 6.5 ~ 7.5 之间, Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)介于 0.5~0.9 之间,按照 Leake(1997)的分$ 类,该角闪石应属于镁角闪石(图 3)。

#### 3.2 锆石 U-Pb 年代学

角闪石岩样品(4205)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果列于表 2,从中挑选具有明显特征与 代表性的锆石制作 CL 图像,分选出的锆石多呈柱 状、粒状、不规则状,自形程度较差,颗粒长径 100~ 120 μm,长宽比 1.5:1~4:1。锆石阴极发光图像 总体偏暗(图 4),多数锆石生长韵律环带不明显,颗 粒较破碎,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(Wu Yuanbao et al., 2004)。 从锆石中选择合适的位置进行 U-Pb 同位素测试, 共选择 18 个测点进行实验。结果显示(表 2);U 含 量变化范围为 $641 \times 10^{-6} \sim 2985 \times 10^{-6}$ ,含量较高 且变化范围较大,Th/U比值为 $0.06 \sim 1.51$ ,其中 15个测点Th/U值为 $0.4 \sim 2.2$ ,具明显岩浆锆石特 征(Th/U>0.4)(Li Changmin, 2009)。测得的18 颗有效锆石年龄数据较为集中,均落于谐和线上或 其附近。18个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄加权平均值为  $310\pm 1$  Ma(MSWD=1.10, n=18)(图5)。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,故推断东乌旗角闪石岩形成时 间为晚石炭世。

#### 3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对角闪石岩中锆石进行 Lu-Hf 同位素测试,测 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。东乌旗角闪石岩中锆石的<sup>176</sup> Lu/<sup>177</sup> Hf 比值为 0.000431~0.005916,  $f_{Lu/Hf}$  值为  $-0.98 \sim$ 0.82,低于上地壳(<sup>176</sup> Lu/<sup>177</sup> Hf = 0.0093,  $f_{Lu/Hf}$  = -0.72)的值。锆石的<sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf 比值为 0.282833

Taste 2 - Encon El Tito Ter Tito e 13 aning round of nonstrante in 20ng ejindri, finite trongona													
元素含量及比值				同位素比值						年龄(Ma)			
测点号	U	Th	<sup>232</sup> Th	$\frac{206}{200}$ Pb	+1σ	$\frac{207}{207}$ Pb	+1σ	$\frac{207}{\text{Pb}}$	+1σ	206 Pb	$+1\sigma$	$\frac{207}{\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$
	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	10	<sup>235</sup> U	10	<sup>206</sup> Pb	10	<sup>238</sup> U		<sup>235</sup> U	10
4205.1	930	861	0.9253	0.0494	0.0003	0.3652	0.0039	0.0536	0.0006	311	2	316	3
4205.2	1914	1774	0.927	0.0494	0.0003	0.3681	0.0026	0.0540	0.0004	311	2	318	2
4205.3	1689	1752	1.0371	0.0501	0.0003	0.3728	0.0025	0.0540	0.0004	315	2	322	2
4205.4	757	240	0.3169	0.0503	0.0003	0.3653	0.0037	0.0526	0.0005	317	2	316	3
4205.5	2584	3924	1.5187	0.0482	0.0003	0.3585	0.0024	0.0539	0.0004	304	2	311	2
4205.6	1934	2193	1.134	0.0495	0.0003	0.3747	0.0026	0.0549	0.0004	312	2	323	2
4205.7	2985	3874	1.2979	0.0491	0.0003	0.3613	0.0025	0.0534	0.0003	309	2	313	2
4205.8	1554	1749	1.1255	0.0485	0.0003	0.3527	0.0027	0.0527	0.0004	305	2	307	2
4205.9	1014	641	0.6326	0.0498	0.0004	0.3690	0.0039	0.0537	0.0005	313	2	319	3
4205.10	1420	2074	1.4603	0.0497	0.0003	0.3758	0.0028	0.0549	0.0004	313	2	324	2
4205.11	641	444	0.6923	0.0489	0.0003	0.3553	0.0040	0.0527	0.0006	308	2	309	3
4205.12	833	52	0.0628	0.0497	0.0003	0.3615	0.0032	0.0528	0.0005	313	2	313	3
4205.13	1853	2562	1.3824	0.0514	0.0003	0.3737	0.0026	0.0528	0.0003	323	2	322	2
4205.14	955	326	0.3411	0.0495	0.0003	0.3612	0.0031	0.0530	0.0004	311	2	313	3
4205.15	1591	1358	0.8536	0.0485	0.0003	0.3631	0.0027	0.0543	0.0004	305	2	315	2
4205.16	712	923	1.2968	0.0489	0.0003	0.3563	0.0038	0.0529	0.0005	308	2	309	3
4205.17	1779	1645	0.9249	0.0492	0.0003	0.3579	0.0024	0.0527	0.0003	310	2	311	2
4205.18	934	566	0.6057	0.0481	0.0003	0.3560	0.0032	0.0537	0.0005	303	2	309	3

表 2 内蒙古东乌旗角闪石岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia



图 3 内蒙古东乌旗角闪石分类图解(据 Leake, 1997)
Fig. 3 Classification of hornblende in Dong Ujimqi,
Inner Mongolia (after Leake, 1997)
Ca <sub>B</sub> —表 1B 位置 Ca 原子数; (Na+K) <sub>A</sub> —表 1A 位置
Na 与 K 原子数之和; Ca <sub>A</sub> 一表 1A 位置 Ca 原子
$Ca_B{-\!\!\!-\!}Ca$ atoms in B of table 1; $(Na{+}K)_A{-\!\!\!-\!}sum$ of Na
and K atoms in A of table 1; $\mathrm{Ca}_A\mathrm{Ca}$ atoms in A of table 1

~0.283044, ε<sub>Hf</sub>(t)值为 7.47~15.54, 地壳模式年龄(T<sub>DM1</sub>)为 847~332Ma。

#### 3.4 地球化学特征

东乌旗角闪石岩 6 件样品主量和微量元素结果 及特征值列于表 4,数据表明,样品的 SiO<sub>2</sub>含量为 48.66%~52.50%,平均为 50.04%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 10.11%~12.18%,平均值为 10.55%。CaO 含量 为 9.98%~ 11.17%,TFeO 含量为 7.77%~ 10.12%,MgO 含量为 11.53%~13.10%,平均值 为 12.36%,对应的 Mg<sup>#</sup>值为 70.27~74.54。样品 的 m/f 比值为 0.36~0.45,样品的 TiO<sub>2</sub> 含量为 0.83%~1.20%,平均值 1.02%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量 0.06% ~0.11%,平均值 0.09%。岩石 的全碱(K<sub>2</sub>O+ Na<sub>2</sub>O)含量 2.21%~3.13%,且 K<sub>2</sub>O 含量均小于 Na<sub>2</sub>O 含量。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 0.27~0.95,为亚 碱性系列。

样品稀土总量较高(表 4),为 66.8×10<sup>-6</sup> ~ 111.54×10<sup>-6</sup>,平均为 91.48×10<sup>-6</sup>。轻稀土 (LREE)相对于重稀土(HREE)略富集,轻重稀土 比值(LREE/HREE)为 1.42~1.83,平均 1.62, (La/Yb)<sub>N</sub>=2.34~3.17,平均 2.67,(La/Sm)<sub>N</sub> 1.17~1.91,平均 1.54,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 较 为稳定, $\delta$ Eu为 0.79~0.98,平均 0.88,表现为弱的 Eu 负异常,可能是岩体形成过程中长石发生了一定 程度的分离结晶所致。

在 REE 球粒陨石标准化配分图解(图 6a)中,

fr /m

#### 表 3 东乌旗角闪石岩锆石 Lu-Hf 同位素数据

	Table 3	Zircons Lu-	Hf isotopic con	npositions o	f hornblendite ir	Dong Uji	imqi , Inne	r Mongoli	ia
年龄(Ma)	$^{176}{ m Yb}/^{177}{ m Hf}$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}{\rm Hf}/^{177}{\rm Hf})_{\rm i}$	$\varepsilon_{\rm Hf}(0)$	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM}$	$T_{\rm DM1}$
211	0 176425	0.004254	0 282040	0.000012	0.282015	5.03	11 03	181	563

T HX ( u)	10/ 11	23a/ 111		=0	(,	•111 ( - )	•m (•)	- Divi	- Divi 1	J Lu/ III
311	0.176425	0.004254	0.282940	0.000012	0.282915	5.93	11.93	484	563	-0.87
311	0.075704	0.001847	0.283005	0.000011	0.282994	8.24	14.73	357	382	-0.94
312	0.130364	0.003733	0.282811	0.000011	0.282789	1.38	7.47	673	847	-0.89
309	0.170447	0.004662	0.283044	0.000009	0.283017	9.62	15.54	326	332	-0.86
305	0.017728	0.000537	0.282892	0.000012	0.282889	4.24	11.01	504	623	-0.98
313	0.204511	0.005916	0.282900	0.000012	0.282865	4.53	10.16	573	674	-0.82
315	0.099675	0.002935	0.283013	0.000013	0.282996	8.52	14.80	356	379	-0.91
313	0.077282	0.002179	0.282919	0.000012	0.282906	5.20	11.61	487	583	-0.93
313	0.152017	0.004129	0.282948	0.000011	0.282924	6.22	12.25	469	542	-0.88
311	0.021406	0.000685	0.282893	0.000011	0.282889	4.28	11.01	504	621	-0.98
311	0.046549	0.001360	0.282934	0.000012	0.282926	5.73	12.32	455	538	-0.96
308	0.207664	0.005205	0.283020	0.000014	0.282990	8.77	14.59	369	393	-0.84
310	0.100603	0.002468	0.282953	0.000008	0.282939	6.40	12.78	440	509	-0.93
311	0.146817	0.003331	0.282833	0.000012	0.282814	2.16	8.36	632	792	-0.90
308	0.015049	0.000431	0.283000	0.000011	0.282998	8.06	14.87	351	375	-0.99

注: $\epsilon_{Hf}(0) = [(^{176} Hf/^{177} Hf)_{s}/(^{176} Hf/^{177} Hf)_{CHUR,0} - 1] \times 10^4$ ; $\epsilon_{Hf}(t) = \{[(^{176} Hf/^{177} Hf)_{s} - (^{176} Lu/^{177} Hf)_{s} \times (e^{\lambda} - 1)]/[(^{176} Hf/^{177} Hf)_{CHUR,0} - (^{176} Lu/^{177} Hf)_{CHUR} \times (e^{\lambda} - 1)] - 1\} \times 10^4$ ; $t_{DM1} = 1/\lambda \times \{1 + [(^{176} Hf/^{177} Hf)_{s} - (^{176} Hf/^{177} Hf)_{DM}]/[(^{176} Lu/^{177} Hf)_{s} - (^{176} Lu/^{177} Hf)_{cHUR} = 0.032200, (^{176} Hf/^{177} Hf)_{cHUR,0} = 0.282772, (^{176} Lu/^{177} Hf)_{DM} = 0.038400, (^{176} Hf/^{177} Hf)_{DM} = 0.283250; f_{CC}, f_{S}, f_{DM}$ 分別为大陆地売、样品和亏损地幔的f\_{Lu/Hf}, t为样品形成时间, \lambda=1.867 \times 10^{-11} a^{-1}.





Fig. 4 CL images of representative zircons of the hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia



图 5 内蒙古东乌旗角闪石岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图 Fig. 5 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia diagram of the hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

# 续表 4

1501

#### 表 4 内蒙古东乌旗角闪石岩主量元素(%)、

微量元素(×10<sup>--6</sup>)分析结果

Table 4 Major (%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements of

hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia

岩石名称	角闪石岩							
样号	4205.1	4205.2	4205.3	4205.4	4205.5	4205.6		
$SiO_2$	49.69	50.33	52.50	49.10	49.96	48.66		
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	11.97	12.18	11.23	11.77	10.11	12.05		
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	2.26	2.69	2.23	3.27	3.08	2.74		
FeO	7.56	6.87	5.76	6.96	7.35	6.92		
CaO	9.98	10.39	10.85	10.80	11.17	11.12		
MgO	12.38	11.53	11.94	12.34	13.10	12.85		
$K_2O$	1.43	0.93	0.68	0.87	0.72	1.37		
$Na_2O$	1.70	2.09	2.45	1.76	1.49	1.44		
${\rm TiO}_2$	1.11	0.93	0.83	1.15	0.88	1.20		
$P_2O_5$	0.08	0.10	0.09	0.11	0.10	0.067		
MnO	0.24	0.24	0.19	0.22	0.28	0.20		
LOI	1.74	1.95	1.60	1.87	1.93	1.62		
总量	99.14	99.23	99.35	99.22	99.17	99.24		
Mg♯	71.08	70.27	74.54	70.36	71.14	72.28		
TFeO	9.59	9.29	7.77	9.90	10.12	9.39		
m/f	0.43	0.45	0.36	0.45	0.43	0.41		
Cs	1.66	1.31	0.37	0.87	0.63	1.53		
Rb	55.4	32.6	15.7	28.4	22.3	52.6		
Sr	216	256	237	180	166	213		
Ba	162	91.1	74.7	105	55.7	170		
Ga	12.2	12.4	10.2	12.3	12.7	11.6		
Nb	4.99	4.42	2.66	3.14	4.07	2.84		
Та	0.31	0.21	0.14	0.13	0.20	0.14		
Zr	42.4	51.0	42.9	65.2	41.3	40.4		
Hf	1.47	1.74	1.42	1.99	1.43	1.50		
Th	1.82	1.59	1.24	0.77	1.25	0.87		
V	320	271	265	323	293	344		
Cr	1020	272	382	928	335	250		
Со	61.1	56.7	56.8	60.2	62.1	64.0		
Ni	166	145	164	148	197	170		
Li	20.8	17.8	8.9	18.1	13.6	16.6		
Sc	74.6	68.4	75.9	75.1	82.8	80.4		
U	0.82	0.72	0.52	0.39	0.82	0.42		
La	12.60	12.00	6.36	7.00	9.98	7.21		
Ce	32.4	31.7	16.9	19.1	27.0	19.6		
Pr	4.44	4.40	2.82	3.10	3.54	2.83		
Nd	17.6	18.1	10.9	13.7	15.6	13.1		
Sm	4.14	4.27	2.85	3.75	3.73	3.54		
Eu	1.08	1.08	0.88	1.10	0.97	1.08		
Gd	3.70	3.72	2.54	3.47	3.66	3.41		
Tb	0.68	0.70	0.47	0.60	0.62	0.58		
Dy	4.36	4.49	3.08	3.95	4.10	3.90		
Ho	0.94	0.98	0.65	0.84	0.88	0.82		
Er	2.50	2.54	1.65	2.14	2.40	2.13		
Tm	0.40	0.41	0.26	0.32	0.37	0.32		
Yb	2.68	2.76	1.60	2.09	2.53	2.08		
Lu	0.42	0.43	0.24	0.31	0.40	0.31		
Y	23.6	23.9	15.6	20.0	21.3	19.6		
ΣREE	111.54	111.48	66.80	81.47	97.08	80.51		
LREE	72.26	71.55	40.71	47.75	60.82	47.36		

岩石名称		角闪石岩					
样号	4205.1	4205.2	4205.3	4205.4	4205.5	4205.6	
HREE	39.28	39.93	26.09	33.72	36.26	33.15	
∂Eu	0.83	0.81	0.98	0.92	0.79	0.94	
LREE/ HREE	1.84	1.79	1.56	1.42	1.68	1.43	
$(La/Sm)_N$	1.91	1.77	1.4	1.17	1.68	1.28	
$(La/Yb)_N$	3.17	2.93	2.68	2.26	2.66	2.34	
$(Gd/Lu)_{\rm N}$	8.81	8.65	10.58	11.19	9.15	11.00	
La/Sm	3.04	2.81	2.23	1.87	2.68	2.04	
Sr/Nb	12.28	14.14	21.74	13.14	10.64	16.26	

注:  $Mg^{\sharp} = 100 \times Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+})$ ; TFeO = FeO + 0.8998Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;N 为球粒陨石标准化值(Sun et al., 1989), m/f = (TFeO/72)/(MgO/40)。

样品的配分模式表现出相同的变化趋势,主体呈现 出右倾特征,各样品配分变化趋势近相互平行,仅表 现出位置的不同,显示其稀土分异程度相当,其围岩 总体变化趋势与角闪石岩相同,仅表现出绝对含量 高于角闪石岩。原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 6b)显示,角闪石岩明显富集大离子亲石元素 (Rb、K),相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),具明显 的 Nb、Ta 负异常和高场强元素 Zr 负异常,其围岩 变化趋势较大,Ba、Rb、Th、K 含量较角闪石岩稍 高,Sr、P、Ti 较角闪石岩稍低。

### 4 讨论

#### 4.1 岩石成因及源区特征

角闪石岩在岩石学分类中属于基性一超基性岩 范围,但目前为止研究区有关角闪石岩的报道有限, 仅在内蒙古大乃林沟地区(Wang Yuwang et al., 2000)和乌拉特中旗图古日格地区(Wang Jian et al., 2016)有相关报道。大乃林沟角闪石岩中角闪 石属于铁普通角闪石,本文所研究的角闪石岩中角 闪石与大乃林沟角闪石岩中角闪石相比, TiO<sub>2</sub>、 MgO、Na2O、MgO 含量偏高,而 TFeO 与 MnO 含 量明显偏低,表现出完全不同的成因。图古日格角 闪石岩中角闪石与本文研究的角闪石岩中角闪石都 属于钙质角闪石,且各元素含量较为接近。在钙质 角闪石中随着岩浆结晶温度与压力的升高,钙质角 闪石的 SiO<sub>2</sub>含量降低, Al、Ti 和 K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 的含 量增加,壳源 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量一般不超过 10%,而幔源 一般不低于 10% (Jiang Changyi et al., 1984)。在 角闪石  $TiO_2$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>关系图(图 7)中均位于幔源区, 显示其具有幔源成因的特征。

东乌旗角闪石岩样品的 TiO2含量较低(0.83%





~1.2%),相对原始地幔富集大离子亲石元素(Rb、 Ba、K),相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti、Zr、Hf), 如图 6 所示,具明显的 Nb、Ta 负异常,Nb、Ta 的亏 损可能是由于地壳物质参与或俯冲流体交代作用造 成(Wilson,1989)。东乌旗角闪石岩样品的 Nb/Ta 比值为 16.09~24.15,平均为 20.15,高于大陆地壳 值(Nb/Ta=11),且一般认为 La/Sm>4.5 指示岩 浆源区受到了地壳物质的混染,东乌旗角闪石岩的 La/Sm 值为 1.86~3.04,表明受地壳混染程度较 低。Th、U 在中上地壳中含量较高(Taylor et al., 1985),而东乌旗角闪石岩则表现出 Th、U 的相对 亏损,也显示源区受地壳物质混染的程度较弱。

6件角闪石岩样品具有较低的 Nb/La 比值 (0.36~0.44)和 Nb/Ce 比值(0.13~0.16),相对于 原始地幔、平均地壳和平均下地壳的 Nb/La 比值 (1.02, 0.69, 0.83)和 Nb/Ce 比值(0.40, 0.33,



图 7 内蒙古东乌旗角闪石岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>与 岩浆来源关系图(据 Jiang Changyi et al., 1984 修改) Fig. 7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Diagram of crystal-chemical genesis of hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia (modified after Jiang Changyi et al., 1984)

0.39)(Taylor et al., 1985)还要低,岩体高场强元素 地球化学特征反映其源区特征而非地壳混染作用。 在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中(图 8a),样品落在弱俯冲 区域,偏离洋中脊-洋岛玄武岩演化线,表明源区受 俯冲组分影响(Pearce, 2008);在 Ba/Th-Th/Nb 图 解中(图 8b),样品显示源区有含水流体加入的趋 势;在 Nb/Zr-Th/Zr 图解中(图 8c),样品投点位于 流体俯冲交代和熔体俯冲交代之间,以上特征表明 有含水俯冲流体或熔体俯冲改造上覆地幔源区,从 而形成富水的角闪石岩。

东乌旗角闪石岩中锆石的<sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf 比值为 0.282789~0.283017,对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值+7.47~ +15.54, $\epsilon_{Hf}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄关系图(图 9)显示  $\epsilon_{Hf}(t)$ 值在亏损地幔线附近,表现出弱富集至弱亏损的特征,表明角闪石岩母岩岩浆来源于亏损地幔源 区,在上升过程中几乎没有或很少受到壳源物质的 混染。

#### 4.2 构造背景

前人对古亚洲洋闭合时间有着不同的认识,部 分学者认为闭合时间为晚泥盆世一早石炭世(Tang et al.,1990;Xu Bei et al.,2015),而 Xiao Wenjiao et al.(2018)认为其闭合时间应为二叠纪晚期。研 究区内发育了大规模的石炭—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。

东乌旗角闪石岩呈包体状就位于早二叠世灰白 色中细粒二长花岗岩中,其围岩显示了伸展环境的 后造山 I 型花岗岩特征,为贺根山洋盆闭合后的后









Inner Mongolia (after Yang Jinhui et al. ,2006)

造山阶段产物。Tong Ying et al. (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 两个洋盆体系,其间由锡林浩特古陆分隔。南部的 西拉木伦洋盆到中二叠世晚期—三叠纪在西拉木伦 河一带才最终闭合(Li Jinyi et al., 2007)。而北部 贺根山洋盆闭合较早,主要依据有以下几点:Li 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;西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的岩 石组合也反映了岩浆来自亏损地幔,可能是俯冲作 用所形成的(Li Yingjie et al., 2015)。Hong Dawei et al. (2000)认为苏左旗一东乌旗发育的中二叠世 碱性花岗岩带(286~276 Ma)指示中二叠世该区已 转入碰撞后伸展阶段;具明显造山变形特征的宝力 高庙组中流纹岩的 U-Pb 年龄为 320±7 Ma (Xin Houtian et al., 2011),片麻状闪长岩的 U-Pb 年龄 为 319±1 Ma,表明东乌旗地区的陆陆碰撞作用应 发生在约 320~310 Ma,在时代上与本文角闪石岩 的构造阶段(310±1 Ma)相当。

在角闪石岩 AFM 图解(图 10)中,样品投于与 岛弧有关的堆晶岩区域内;角闪石岩 Ti-Zr 图解中, 样品均落入火山弧玄武岩区域内(图 11),Pearce (1982)提出利用 Th/Yb 与 Ta/Yb 之间的差异来判 别岩浆是否形成于火山弧环境,在 Th/Yb-Ta/Yb 图解中(图 12a),样品均落于 VAB(火山弧玄武岩) 区域内;在 Zr/Y-Zr 图解中(图 12b),样品同样落于 A 区(火山弧玄武岩),并有向 MORB 和板内玄武岩 区域靠近的趋势,因此,东乌旗角闪石岩可能形成于 俯冲碰撞背景下,在时代上已接近于造山后伸展 阶段。

结合区域研究成果,本文认为兴蒙造山带晚古 生代构造演化主要表现为三个阶段:第一阶段是洋 壳俯冲和板块碰撞阶段(335~305 Ma),主要表现 为:SSZ型蛇绿岩和洋内弧(Li Yingjie et al., 2018,2020),来源于俯冲洋壳的含水流体或熔体改 造上覆地幔源区,形成角闪石岩,大规模的陆缘弧中 酸性火山和少量的侵入岩,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 (Li Yingjie et al.,2018)。第二阶段是造山后伸展阶段 (305~290 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



图 10 内蒙古东乌旗角闪石岩 AFM 图解 (据 Zhang Qi et al., 2014)

Fig. 10 AFM diagram of hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia (after Zhang Qi et al. ,2014)





Fig. 11 Ti-Zr diagram of hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia (after Wang Jian et al. ,2016)

岗岩为主(Cheng Yinhang et al.,2019)。第三阶段是非 造山阶段(290~270 Ma),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(Cheng Yinhang et al.,2014; Li Min et al.,2015)。

### 5 结论

(1)东乌旗角闪石岩锆石 U-Pb 年龄为 310±1 Ma,表明其形成于晚石炭世。

(2)电子探针结果表明,东乌旗角闪石岩属钙角 闪石组的镁角闪石,主量元素显示贫 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、 K<sub>2</sub>O,富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFeO、MgO、CaO,相对于原始地幔 富集大离子亲石元素 (Rb、K),相对亏损高场强元 素 (Nb、Ta、Ti),岩石稀土总量较高 ( $\Sigma$  REE =



图 12 内蒙古东乌旗角闪石岩 Th/Yb-Ta-Yb 图解 (a,据 Pearce, 1982 和 Zr/Y-Zr 图解(b,据 Pearce et al.,1979) Fig. 12 Th/Yb-Ta-Yb (a, after Pearce,1982) and Zr/Y-Zr diagrams (b, after Pearce et al.,1979) of hornblendite in Dong Ujimqi, Inner Mongolia VAB—火山弧玄武岩(IAT—岛弧拉斑玄武岩,CAB—钙碱性玄武岩, SHO—橄榄粗安岩);MORB—洋中脊拉斑玄武岩;WPB—板内玄武岩 (TH—拉斑玄武质,TR—过渡,ALK—碱性) VAB—Volcanic arc basalt (IAT—island arc tholeiite, CAB—calc alkaline basalt, SHO—mugearite);

MORB—mid ocean ridge basalt; WPB—intraplate (TH—tholeiitic,TR—transition,ALK—alkalinity)

66.  $80 \times 10^{-6} \sim 111.54 \times 10^{-6}$ ), 轻稀土(LREE) 相 对于重稀土(HREE) 富集, 轻重稀土比值(LREE/ HREE) 为 1. 42 ~ 1. 83。角闪石岩中锆石<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf比值为 0. 282833~0. 283044,  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值为 7. 47 ~15.54, 地壳模式年龄( $T_{\rm DM1}$ )为 847~332 Ma,表 明其源区主要为亏损地幔。

(3)在 Ti-Zr 图解、Th/Yb-Ta-Yb 图解和 Zr/Y-Zr 图解中,样品均落入火山弧区域,结合区内研究 成果,认为东乌旗角闪石岩形成于古亚洲洋俯冲 环境。

致谢: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!

#### References

- All Members of the IMA-CNMMN Amphibole Professional Committee. 2001. Amphibole nomenclature-International Association of Mineralogy New Mineral and Mineral Named Committee Hornblende Pr-ofessional Committee's report. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(1): 84~100(in Chinese with English abstract).
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P., ed, Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier Amsterdam, 63~144.
- Cheng Yinghang, Duan Linfeng, Wang Shaoyi, Li Ying, Teng Xuejian, Zhang Tianfu. 2019. Termination of the Hegenshan Orogen in the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt, North China: geochemical and zircon U-Pb geochronological constraints from Early Permian mafic dykes. Geological Journal, 55(1): 845 ~861.
- Cheng Yinhang, Li Min, Zhang Tianfu, Li Yanfeng, Li Ying, Niu Wenchao, Teng Xunjian, Peng Lina, Liu Yang, Hu Xiaojia. 2015. Late Paleozoic crustal extensional regime on the Southeastern Siberian Plate; new evidences from geochronology and geochemistry of the bojite in the Dong Ujimqi. Acta Geologica Sinica, 89(02): 262~271(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, Li Min, Zhang Tianfu. 2014. Early permian East-Ujimqin mafic-ultramafic and granitic rocks from the Xing'an-Mongolian Orogenic, North China: origin, chronology, and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 96: 361~373.
- Cheng Yinhang, Zhang Xiawei, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Ying, Zhang Tianfu, Teng Xuejian. 2020. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Late Carboniferous pyroxene peridotite in Dong Ujimqi Inner Mongolia and its tectonic significance. Earth Science, 45(3): 844~855.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian. 2011. Zircon Hf isotope analysis by LA-MC-ICP-MS. Geological Bulletin of China, 30 (10): 1508~1513 (in Chinese with English abstract).
- Hanyu T, Tatsumi Y, Nakai S, Chang Q, Miyazaki T, Sato K, Tani K, Shibata T, Yoshida T. 2006. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan Arc for the Last 25 Myr: constraints from geochemistry. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 7(8): 1~29.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive  $\epsilon_{Nd}(t)$  granitoids in the Da Xing-gan Mts— Monggolia orogenic belt and growth continental crust. Earth Science Frontiers, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, An Sanyuan. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rock and their petrogenesis Significance. Journal of Mineralogy and Petrology, 4(3): 1~9 (in Chinese with English ab-stract).
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names. Mineralogical Magazine, 61(405): 295~321.
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons. Geological Survey and Research, 32(3):  $161 \sim 174$  (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, Li Yaping, Wang Yanbin. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syncollisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleoplates. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 565~582(in Chinese with English abstract).

- Li Min, Li Min, Cheng Yinhang, Li Yanfeng. 2015. Characteristics and geological significance of chronology and geochemistry of Bayandulan monzonitic granites in Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia. Geological Science and Technology Information, 34 (4):  $6 \sim 14$  (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, Dong Peipei. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi Ujimqi Banner, Inner-Mongolia. Acta Petrologica Sinca, 31(5): 1461~1470(in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, Wang Jinfang, Dong Peipei, Li Hongyang. 2018. Super-subduction zone ophiolotes from Inner Mongolia, North China: implications for the tectonic history of the southeastern Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 59: 126~143.
- Li Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, Wang Jinfang, Dong Peipei, Li Hongyang. 2020. Subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in central Inner Mongolia. Earth and Planetary Science Letters, 535: 116087.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced meltperidotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zirons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1/2): 537~571.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy & Petrology, 69: 33~47.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalt with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100(1-4): 14-48.
- Ren Qiang, Zhang Shihong, Gao Yangjun, Zhao Hanqing, Wu Huaichun, Yang Tianshui, Li Haiyan. 2020. New Middle-Late Permian paleomagnetic and geochronological results from Inner Mongolia and their paleogeographic implications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, Norry M J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interaction. Geological Society London Specical Publications, 68(1): 41~60.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society Special Publication, 42: 313 ~345.
- Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, Shi Xingjun, Zhang Jianjun. 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications. Acta Geoscientica Sinica, 31(3): 395~412 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Sun Fengyue, Li Bile, Wang Yingde, Li Ruihua. 2016. Age, petrogenesis and tectonic implications of Permian hornblendite in Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. Earth Science, 41 (5): 792 ~ 808 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Hou Qingye, Wang Jin, Chen Yuelong, Liu Jinbao, Wang Zhong, Li Dapeng. 2013. SHRIMP geochronology and Hf isotopes of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia. Geoscience, 27(1): 67~78 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan. 2000. The petrologic characteristics of hornblendite in Danailingou, Inner Mongolia. Geological Review, 46(3): 301~306(in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. Kluwer Academic Publishers, 7~12.
- 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 the British Tertiary Volcanic Province. Earth and Planetary Science Letters,  $50: 11 \sim 30$ .

- Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, Eggins S M. 2001. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes. Earth and Planetary Science Letter, 192(3):331~346.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49 (15): 1554  $\sim$  1569 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Han Chunming, Liu Wei, Wan Bo, Zhang Ji'en, Ao Songjian, Zhang Zhiyong, Song Dongfang. 2018. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia Collage in Central Asia. Earth-Science Reviews, 186: 94~128.
- Xin Houtian, Teng Xuejian, Cheng Yinhang. 2011. Stratigraphic subdivision and isotopes geochronology study on the Baoligaomiao Formation in the Dong Ujimqi, Inner Mongolia. Geological Survey and Research, 34(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Wang Yanyang, Liao Wen, Luo Zhiwen, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng. 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt (XMOB) in north China. Journal of Asian Earth Sciences, 97, 183~196.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, Wilde S A, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. Earth and Planetary Science Letters, 246(3-4): 336~352.
- Zhang Jian, Chen Jinsheng, Li Boyang, Gao Yan, Zhang Yanlong. 2011. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Late Paleozoic granites in Taerqi area, Inner Mongolia. Geology in China, 30 (4): 521~531 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Lv Xinbiao, Liu Ge, Chen Jun, Chen Chao, Gao Qi, Liu Hong. 2013. Characteristics and genesis of continental back-arc A-type granites in the eastern segment of the Inner Mongolia-Da Hinggan Mountains orogenic belt. Geology in China, 40(3): 869~884 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Zhang Jian, Qu Qiang, Gao Qingxiu. 2013. U-Pb age of zircon from the syenogranite in Adelagawula, Inner Mongolia. Geology and Resources, 22 (4): 308 ~ 312 (in Chinese with English abstract).
  - 参考文献
- IMA-CNMMN角闪石专业委员会全体成员.2001.角闪石命名法-国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告.岩石矿物学杂志,20(1):84~100.
- 程银行,李敏,张天福,李艳锋,李影,牛文超,滕学建,彭丽娜,刘洋, 胡晓佳.2015.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.地质学报,89(2): 262~271.
- 程银行,张夏炜,王少轶,奥琮,李影,张天福,滕学建.2020.东乌旗 晚石炭世辉石橄榄岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学.地球科学,45 (3):844~855.

耿建珍,李怀坤,张健,周红英,李惠民.2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报,30(10):1508~1513.

- 洪大卫,王式洸,谢锡林,张季生.2000.兴蒙造山带正 ε<sub>Nd</sub>(t)值花岗 岩的成因和大陆地壳生长.地学前缘,7(2):441~456.
- 姜常义,安三元.1984.论火成岩中钙质角闪石的化学成分及其岩石 学意义.矿物岩石,4(3):10~15.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研 究,32(3):161~174.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, , 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器 等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄 的研究. 矿物学报, 29(S1):600~601.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,李亚萍,王彦斌.2007.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,岩石学报,23(3):565~582.
- 李敏,李敏,程银行,李艳锋.2015.内蒙古东乌旗巴彦都兰二长花岗 岩年代学、地球化学特征及其地质意义.地质科技情报,34(4): 6~14.
- 李英杰,王金芳,李红阳,董培培.2015.内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇 绿岩的识别.岩石学报,31(5):1461~1470.
- 梁玉伟,余存林,沈国珍,孙庆茹,李进文,杨郧城,佘宏全,张斌,谭 刚.2013.内蒙古东乌旗索纳嘎铅锌银矿区花岗岩地球化学特 征及其构造与成矿意义.中国地质,40(3):767~779.
- 田健,张永,滕学建,刘洋,滕飞,郭硕,何鹏,王文龙.2019. 内蒙古狼 山地区晚志留世二云母二长花岗岩体的厘定及其地质意义.地 质学报,93(3):661~673.
- 童英,洪大卫,王涛,史兴俊,张建军.2010.中蒙边境中段花岗岩时 空分布特征及构造和找矿意义.地球学报,31(3):395~412.
- 王健,孙丰月,李碧乐,王英德,李睿华.2016.内蒙乌拉特中期图古 日格二叠纪角闪石岩年龄、岩石成因及构造背景.地球科学,41 (5):792~808.
- 王树庆,胡晓佳,赵华雷.2019.内蒙古苏左旗洪格尔地区新发现晚 石炭世碱性花岗岩.地质调查与研究,42(2):81~85.
- 王新宇,侯青叶,王瑾,陈岳龙,刘金宝,王忠,李大鹏. 2013. 内蒙古 维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究. 现 代地质,27(1):67~78.
- 王玉往,王京彬,王莉娟.2000.内蒙古大乃林沟角闪石岩岩石学特征. 地质论评,46(3):301~306.
- 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.科学通报,49(16):1589~1604.
- 武跃勇,姜海蛟,寇帅.2016.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.地质调查与研究,39(1):1 ~14.
- 辛后田,滕学建,程银行.2011.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.地质调查与研究.34(1):1~9.
- 张健,陈井胜,李泊洋,高妍,张彦龙. 2011. 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. 世界地质,30 (4):521~531.
- 张磊,吕新彪,刘阁,陈俊,陈超,高奇,刘洪.2013.兴蒙造山带东段 大陆弧后A型花岗岩特征与成因.中国地质,40(3);869~884.
- 张玉清,张建,屈强,高清秀.2013.内蒙古阿德拉嘎乌拉正长花岗岩 锆石 U-Pb 年龄.地质与资源,22(4):308~312.

# Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Late Carboniferous hornblendite in Dong Ujimqi Inner Mongolia and its tectonic significance

ZHANG Xiawei<sup>1, 2)</sup>, CHENG Yinhang<sup>\*2)</sup>, LI Yingjie<sup>1)</sup>, XU Xu<sup>1)</sup>, TENG Xuejian<sup>2)</sup>, WANG Shaoyi<sup>2)</sup>, LI Ying<sup>2)</sup>, LIU Haidong<sup>3)</sup>

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

2) Tianjin Geological Survey Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3) School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

\* Corresponding author: weicheng1858@163.com

#### Abstract

This study undertookelectron microprobe, zirconU-Pb dating and petrographic, geochemical analyses onthehornblendite firstly recognized in the Bayandulan of Dong Ujimqi to understand the characteristics of the late Paleozoic mantle nature and structure. In these rocks, mainrockformingminerals are hornblende, someplagioclase and magnetite. The dating results indicate that the hornblendite formed in the Late Carboniferous  $310 \pm 1$  Ma. The geochemical data of the samples show SiO<sub>2</sub> (48.66% ~ 52.50%), MgO (11.53% ~13.10%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10.11% ~12.18%), Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O (2.21% ~3.13%, <3.5%, m/f (0.36~ 0.45), Mg<sup>#</sup> (70.27~74.54), TFeO(7.77% ~10.14%). The standardized distribution pattern of REE chondrites is right-leaning with relatively enriched LREE. The rocks are enriched in LILE (Rb, K), and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti), and there are obvious negative anomalies of Nb, Ta and Ti. Electron probe analyses results show that hornblende belongs to calcic amphibole and has the characteristics of mantle hornblende. The  $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$  values of zircons from the hornblendite vary between 7.47~15.54, and their Hf one-stage model ages vary from 847 to 332 Ma, implying that their magma source was derived from a depleted mantle. Combined with regional tectonic evolution, the hornblendite formed in the subduction setting of the Paleo-Asian Ocean. This discovery provides rock evidence for the late Paleozoic mantle tectonomagmatic evolution.

Key words: hornblendite; Late Carboniferous; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Xing'anling-Mongolian orogenic belt