

# 蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲:小兴安岭西北部 落马湖群中三叠世岩浆记录

付俊彧<sup>1</sup>, 那福超<sup>1\*</sup>, 李仰春<sup>2</sup>, 孙巍<sup>1</sup>, 钟辉<sup>1</sup>, 杨浩<sup>3</sup>, 杨晓平<sup>1</sup>, 张广宇<sup>1</sup>,  
刘英才<sup>1</sup>, 杨雅军<sup>1</sup>

FU Junyu<sup>1</sup>, NA Fuchao<sup>1\*</sup>, LI Yangchun<sup>2</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, ZHONG Hui<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>,  
YANG Xiaoping<sup>1</sup>, ZHANG Guangyu<sup>1</sup>, LIU Yingcai<sup>1</sup>, YANG Yajun<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 110037;

3. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061

1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 110037, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China

**摘要:**小兴安岭西北部出露的落马湖群被认为是兴安地块新元古代变质基底的组成部分。通过对卧都河乡附近的落马湖群黑云角闪斜长片麻岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得  $246 \pm 1$  Ma 形成年龄, 认为落马湖群是一套包含不同时代地质体的构造杂岩。黑云角闪斜长片麻岩的岩相学及岩石地球化学研究表明, 其原岩为基性岩浆岩, 具有较高的 MgO、TFeO 含量及 Mg<sup>#</sup> 值, 相对富 Na<sub>2</sub>O, 低 K<sub>2</sub>O, 中等的 Cr、Ni、Co 含量, 与下地壳平均成分类似; 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、Th, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P、Hf; 锆石原位  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 +9.55 ~ +14.43 之间, Hf 同位素单阶段模式年龄 ( $t_{\text{DM1}}$ ) 和二阶段模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 分别介于 319 ~ 520 Ma 和 350 ~ 666 Ma 之间, Hf 同位素组成与中亚造山带兴安岛弧显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成类似; 岩浆源自“水化”古生代多宝山岛弧带增生岩石圈地幔的部分熔融并有陆壳物质混染, 与蒙古-鄂霍茨克洋板块南向俯冲有关, 可能受到北北东向陆内转换构造带控制。

**关键词:**卧都河地区; 落马湖群; 黑云角闪斜长片麻岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 中三叠世

**中图分类号:** P534.51; P588.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)06-0889-16

**Fu J Y, Na F C, Li Y C, Sun W, Zhong H, Yang H, Yang X P, Zhang G Y, Liu Y C, Yang Y J. Southward subduction of the Mongolian-Okhotsk Ocean: Middle Triassic magmatic records of the “Luomahu Group” in northwest of Lesser Khingan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 889-904**

**Abstract:** Luomahu Group outcropped in the northwest of Lesser Xing'an Range is considered to be part of the Neoproterozoic metamorphic basement of the Xing'an Massif. Based on zircon U-Pb dating of the biotite-hornblende-plagioclase gneiss from the Luomahu Group outcropped near Woduhe Township, the results show that the age of protolith is  $246 \pm 1$  Ma. Combined with the related regional research data, it is suggested that the Luomahu Group is a set of tectonic complex containing geological bodies of

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2021-05-23

资助项目: 中国地质调查局项目《国家地质大数据汇聚与管理》(编号: DD20190383)、《中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制》(编号: DD20190360)、《全国陆域及海区地质图件更新与共享》(编号: DD20190372)、《东北基础地质综合调查与片区总结》(编号: 1212011220435)

作者简介: 付俊彧(1966-), 男, 教授级高工, 地质学专业。E-mail: fzyzy@163.com

\* 通信作者: 那福超(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 构造地质学专业。E-mail: 350413595@qq.com

different ages. The petrography and geochemistry of the biotite-hornblende-plagioclase gneiss indicate that the protolith is a basic magmatic rock, rich in MgO, TFeO and Mg# value, relatively rich in Na<sub>2</sub>O, low in K<sub>2</sub>O, and mediate contents of Cr, Ni and Co, similar to the average composition of the lower crust. In addition, large ion lithophile elements Rb, Ba, Sr, Th are enriched, and high field strength elements Nb, Ta, Ti, P, Hf are depleted. The in-situ  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircons range from +9.55 to +14.43, and the Hf isotope single-stage model ages ( $t_{\text{DM1}}$ ) and two-stage model ages ( $t_{\text{DM2}}$ ) are 319~520 Ma and 350~666 Ma, respectively. The Hf isotopic composition is similar to the Phanerozoic igneous rocks of Xing'an island arc in Central Asia Orogenic Belt. It is suggested that the magma was originated from the partial melting of the "hydrated" Paleozoic hyperplasia lithospheric mantle and was mixed with continental crust materials in the Duobaoshan island arc zone, related to the southward subduction of the Mongolia-Okhotsk Ocean plate and controlled by the NNE trending intracontinental transform tectonic belt.

**Key words:** Woduhe area; Luomahu Group; biotite-hornblende-plagioclase gneiss; zircon U-Pb age; Hf isotope; Middle Triassic

中国东北地区主体位于中亚造山带东段与西太平洋陆缘活动带的叠加部位。古生代古亚洲洋构造域由一系列微陆块及其间的拼贴增生带组成;其中微陆块自北西向南东依次为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯-兴凯地块<sup>[1-4]</sup>;兴华渡口岩群、倭勒根岩群、零点群、落马湖岩群被认为是额尔古纳地块及兴安地块的前寒武纪变质基底<sup>[5]</sup>;中生代发育强烈的构造岩浆活动,使前中生代尤其前寒武纪变质岩系残留较少,多呈孤岛状或残块状零星出露于中生代岩浆岩中。由于变质变形和后期岩浆作用的强烈改造,以及露头无顶无底、残缺不全,关于这些变质基底的年代一直以来争议较大,制约了对区域构造演化的认识。近年的研究表明,古元古代兴华渡口岩群是以中-新元古代为主并包含其他不同时代地质体的变质杂岩<sup>[6-11]</sup>;原新元古代倭勒根岩群、原零点群也包含有新元古代和奥陶纪-志留纪的地质体,甚至部分为蛇绿构造混杂岩带的组成部分<sup>[12-14]</sup>。位于兴安地块东南缘古生代多宝山岛弧带中的新元古代落马湖岩群,同样因为缺少顶底及化石依据,对其时代认识也存在分歧<sup>[15-17]</sup>。落马湖岩群是多宝山岛弧带、多宝山铜-金-铜多金属矿集区重要的地质单元,其形成时代的准确厘定,对岛弧带的形成演化、矿集区构造-成矿作用研究具有重要意义。鉴于此,本次对多宝山矿集区西缘卧都河地区的落马湖群嘎拉山组黑云角闪斜长片麻岩进行锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素和全岩地球化学研究,并对其形成构造背景进行探讨。

## 1 地质背景及样品描述

### 1.1 地质背景

研究区位于小兴安岭西北部与大兴安岭接合

部位的卧都河地区,坐落于嫩江-开鲁断裂带北段上(图 1-a)。古生代属兴安地块东南缘的多宝山岛弧带,中生代叠加晚三叠世-早侏罗世深成侵入岩。研究区主要出露奥陶系-志留系海相中基性火山岩-碎屑岩夹碳酸盐岩建造,泥盆系-下石炭统海相及海陆交互碎屑岩夹火山岩及碳酸盐建造等弧盆演化阶段的地层,以及大面积分布的晚三叠世-早侏罗世花岗岩;而中深变质的古元古代兴华渡口岩群及中浅变质的新元古代落马湖岩群零星出露,多呈孤岛状或残块状分布于晚三叠世-早侏罗世花岗岩中;沿北北东向的嫩江断裂带,发育晚二叠世花朵山组陆相中-酸性火山岩夹碎屑沉积岩和早三叠世老龙头组陆相杂色-紫色砾岩-砂岩-千枚状板岩组合,零星出露中侏罗世七林河组粗碎屑岩夹含煤沉积;受嫩江-开鲁断裂带控制,发育北北东向早白垩世火山断陷盆地,充填中-基性火山岩夹碎屑含煤沉积,伴有同时期花岗岩类侵入。本次研究的落马湖群嘎拉山岩组位于黑龙江省黑河市卧都河乡驻地附近、嫩江断裂带次级断裂(卧都河断裂)带上;露头可见黑云角闪斜长片麻岩及二云母片岩,二者构造协调并被闪长玢岩侵入,与北西侧晚三叠世-早侏罗世花岗岩之间的接触带发育接触变质<sup>①</sup>,与南东侧北宽河岩组细碎屑岩夹火山凝灰岩沉积之间推测为断层接触(图 1-b)。

### 1.2 样品描述

样品采自落马湖岩群嘎拉山岩组靠近晚三叠世-早侏罗世花岗岩岩体一侧,岩性为黑云角闪斜长片麻岩(17W07),地理坐标:北纬 50°35'13"、东经 125°51'20";其与下伏二云片岩构造协调,片(麻)理产状为 170°∠55°;岩石为灰黑色,弱片麻状构造(图 2),变余斑状结构、半自形柱状结构,鳞片状变晶、柱粒状变晶结构(图 2-b);变余斑晶主要为斜长





与黑云母一起构成片麻理,粒径为 0.1~0.5 mm;斜长石大部分重结晶为均匀细小的他形粒状(粒径 0.05~0.2 mm),彼此镶嵌。副矿物为长柱状、针柱状磷灰石及他形粒状榍石。岩石矿物组成及变余斑状结构特征暗示,原岩应为中基性岩浆岩。

## 2 分析方法

### 2.1 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素测试

锆石挑选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室采用常规方法进行,样品粉碎至 80 目,经水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘之后,在双目镜下挑选晶形较好、透明且无明显裂痕的锆石颗粒。锆石样品制靶、阴极发光(CL)图像采集由北京铅年领航科技有限公司完成;将挑选出的锆石颗粒置于双面胶上,灌上环氧树脂制靶,将其固化并打磨磨光,使锆石内部结构露出,用于 CL 图像采集及锆石微区单点 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。

锆石 U-Pb(LA-ICP-MS)定年测试和微区原位 Hf 同位素分析均在北京科荟测试技术有限公司完成。锆石定年分析所用仪器为 AnalytikJena PQMS Elite 型 ICP-MS 及与之配套的 ESI NWR 193 nm 准分子激光剥蚀系统;激光剥蚀所用斑束直径为 25  $\mu\text{m}$ ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.01  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,以氦为载气。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,测试前先用锆石标样 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以标样 GJ-1 为外标,微量元素含量利用 NIST 610 为外标、Si 为内标的方法进行定量计算<sup>[19]</sup>。测试过程中,每

测定 10 个样品前后重复测定 2 个锆石标样 GJ-1,并测量 1 个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。详细实验测试过程参见侯可军等<sup>[20]</sup>。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMS DataCal 完成<sup>[19]</sup>。锆石 U-Pb 谐和图的绘制应用 Isoplot 程序完成<sup>[21]</sup>。测试数据、年龄加权平均值的误差均为  $1\sigma$ 。锆石微区原位 Hf 同位素分析利用 NWR 213 nm 固体激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的斑束直径一般为 40  $\mu\text{m}$ ,能量密度为 7~8  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,频率为 10 Hz,激光剥蚀物质以高纯氦为载气送入 Neptune Plus(MC-ICPMS),接收器配置与溶液进样方式相同。

### 2.2 全岩主量及微量元素分析

全岩的主量、微量元素均由自然资源部东北矿产资源监督检测中心分析完成。主量元素用 X 射线荧光光谱(XRF)方法完成,精度为 1%~5%;微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析完成,精度一般优于 10%。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年

选取黑云角闪斜长片麻岩中的 60 颗锆石进行测试(表 1)。锆石 CL 图像(图 3)显示多为灰色~灰白色长柱状晶,部分为等轴状,粒径介于 100~200  $\mu\text{m}$  之间,长短轴比为 1:1~3:1;这些锆石均发育振荡环带,并主要为宽板状(如测点 5、11、25)或带状(如测点 4、20、30、34)环带结构,锆石 Th/U 值介于

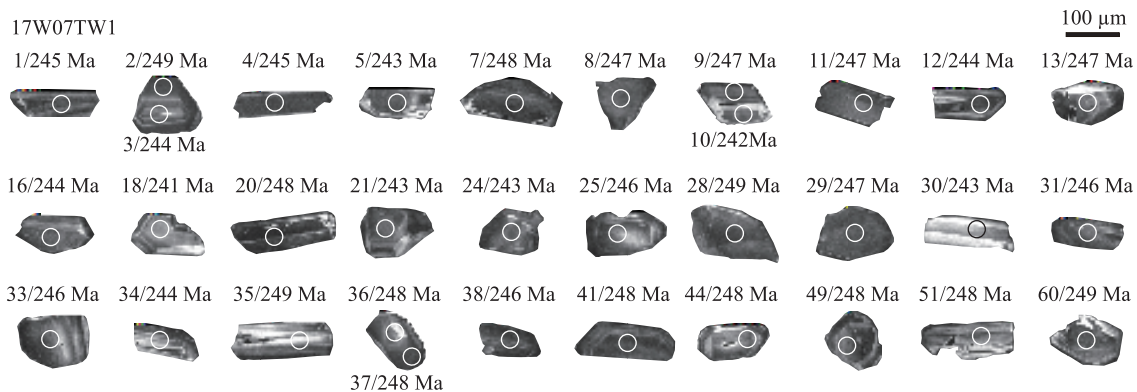


图3 黑云角闪斜长片麻岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of the selected zircons in the biotite-hornblende-plagioclase gneiss



表 1 黑云角闪斜长片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of the biotite-hornblende-plagioclase gneiss

测点号	元素含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值			年龄/Ma			谐和度						
	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$							
01	1013	1542	315	4.90	0.0546	0.0028	0.2937	0.0161	0.0388	0.0005	394	117	261	13	245	3	93%
02	323	450	187	2.41	0.0508	0.0021	0.2759	0.0115	0.0393	0.0005	235	64	247	9	249	3	99%
03	378	551	200	2.76	0.0483	0.0018	0.2568	0.0100	0.0385	0.0005	122	95	232	8	244	3	95%
04	572	783	240	3.26	0.0496	0.0025	0.2634	0.0132	0.0387	0.0011	176	123	237	11	245	7	96%
05	316	450	181	2.49	0.0479	0.0021	0.2523	0.0106	0.0385	0.0006	100	91	228	9	243	4	93%
06	389	480	205	2.34	0.0766	0.0034	0.3961	0.0203	0.0383	0.0015	1110	87	339	15	242	10	66%
07	393	555	216	2.57	0.0512	0.0017	0.2765	0.0098	0.0392	0.0007	250	76	248	8	248	4	99%
08	454	651	227	2.86	0.0507	0.0017	0.2760	0.0111	0.0391	0.0007	228	78	247	9	247	4	99%
09	308	440	187	2.35	0.0498	0.0022	0.2664	0.0112	0.0391	0.0006	187	104	240	9	247	4	97%
10	413	589	225	2.61	0.0508	0.0020	0.2675	0.0106	0.0383	0.0006	235	93	241	9	242	4	99%
11	906	1339	290	4.63	0.0502	0.0017	0.2712	0.0096	0.0390	0.0005	206	78	244	8	247	3	98%
12	160	197	277	0.71	0.0513	0.0017	0.2718	0.0090	0.0385	0.0005	254	78	244	7	244	3	99%
13	289	427	184	2.32	0.0517	0.0020	0.2764	0.0103	0.0390	0.0005	272	89	248	8	247	3	99%
14	511	702	226	3.10	0.0630	0.0035	0.3437	0.0224	0.0386	0.0007	709	117	300	17	244	4	79%
15	466	483	382	1.26	0.0709	0.0027	0.3685	0.0155	0.0375	0.0006	967	78	319	12	237	4	70%
16	297	415	172	2.42	0.0507	0.0022	0.2700	0.0121	0.0386	0.0005	228	100	243	10	244	3	99%
17	479	695	235	2.96	0.0636	0.0028	0.3378	0.0166	0.0382	0.0005	728	94	296	13	242	3	80%
18	303	441	175	2.52	0.0506	0.0023	0.2647	0.0118	0.0380	0.0005	233	104	238	9	241	3	99%
19	694	1009	247	4.09	0.0658	0.0050	0.3526	0.0252	0.0390	0.0007	798	160	307	19	247	5	78%
20	932	1266	369	3.43	0.0519	0.0017	0.2816	0.0099	0.0393	0.0005	280	71	252	8	248	3	98%
21	356	489	185	2.65	0.0532	0.0019	0.2807	0.0099	0.0384	0.0005	345	83	251	8	243	3	96%
22	512	662	222	2.98	0.0748	0.0037	0.4040	0.0229	0.0384	0.0006	1065	100	345	17	243	4	65%
23	501	645	331	1.95	0.0816	0.0054	0.4567	0.0399	0.0389	0.0009	1236	131	382	28	246	6	56%
24	1154	1685	357	4.73	0.0552	0.0020	0.2934	0.0108	0.0384	0.0005	420	79	261	8	243	3	92%
25	767	1075	316	3.40	0.0555	0.0019	0.2966	0.0096	0.0389	0.0006	432	69	264	7	246	4	93%
26	15885	1338	473	2.83	0.6178	0.0776	14.9066	1.6809	0.1463	0.0145	4550	196	2809	107	880	82	-5%
27	802	1107	269	4.11	0.0701	0.0027	0.3810	0.0151	0.0393	0.0005	931	81	328	11	248	3	72%
28	317	440	177	2.49	0.0568	0.0028	0.3053	0.0132	0.0393	0.0006	483	107	271	10	249	4	91%
29	594	869	211	4.12	0.0560	0.0025	0.3032	0.0164	0.0391	0.0010	450	98	269	13	247	6	91%

续表 1

测点号	元素含量/ $10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度		
	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
30	119	167	84	1.99	0.0536	0.0035	0.2760	0.0153	0.0384	0.0007	150	247	12	243	5	98%
31	608	888	256	3.47	0.0560	0.0020	0.2996	0.0108	0.0389	0.0005	80	266	8	246	3	92%
32	438	352	205	1.72	0.1354	0.0057	0.7281	0.0349	0.0383	0.0006	73	555	21	242	4	21%
33	204	292	131	2.23	0.0570	0.0032	0.3052	0.0175	0.0390	0.0008	122	270	14	246	5	90%
34	604	894	247	3.62	0.0542	0.0022	0.2885	0.0121	0.0387	0.0007	95	257	10	244	4	94%
35	531	751	232	3.24	0.0521	0.0021	0.2823	0.0115	0.0394	0.0006	99	253	9	249	4	98%
36	261	379	162	2.34	0.0492	0.0021	0.2664	0.0115	0.0392	0.0005	96	240	9	248	3	96%
37	354	503	221	2.28	0.0493	0.0019	0.2648	0.0096	0.0392	0.0005	86	239	8	248	3	96%
38	571	843	264	3.20	0.0532	0.0018	0.2868	0.0104	0.0389	0.0005	74	256	8	246	3	96%
39	580	856	234	3.66	0.0631	0.0029	0.3295	0.0137	0.0382	0.0006	98	289	10	241	4	82%
40	400	527	163	3.24	0.0743	0.0034	0.4121	0.0226	0.0394	0.0007	92	350	16	249	5	66%
41	710	1056	267	3.96	0.0517	0.0019	0.2790	0.0109	0.0392	0.0006	90	250	9	248	4	99%
42	404	446	363	1.23	0.0695	0.0029	0.3754	0.0178	0.0387	0.0006	86	324	13	245	4	72%
43	690	891	242	3.69	0.0946	0.0057	0.5192	0.0341	0.0394	0.0004	114	425	23	249	3	47%
44	987	1390	315	4.41	0.0539	0.0017	0.2895	0.0083	0.0392	0.0005	72	258	7	248	3	96%
45	318	357	149	2.39	0.0767	0.0034	0.4122	0.0185	0.0391	0.0006	122	350	13	247	4	65%
46	530	454	157	2.88	0.2038	0.0309	1.2054	0.2174	0.0401	0.0022	249	803	100	253	14	-5%
47	878	1245	310	4.01	0.0892	0.0089	0.5255	0.0693	0.0392	0.0013	191	429	46	248	8	46%
48	552	731	221	3.30	0.0898	0.0036	0.4810	0.0204	0.0385	0.0004	76	399	14	244	3	51%
49	271	367	165	2.23	0.0547	0.0022	0.2940	0.0119	0.0392	0.0006	91	262	9	248	4	94%
50	287	266	178	1.50	0.1220	0.0113	0.7371	0.0783	0.0393	0.0009	165	561	46	249	6	22%
51	253	323	164	1.97	0.0546	0.0034	0.2973	0.0223	0.0391	0.0012	139	264	17	248	7	93%
52	596	774	290	2.67	0.0744	0.0050	0.4285	0.0444	0.0395	0.0013	131	362	32	250	8	63%
53	448	493	183	2.70	0.1209	0.0106	0.6493	0.0613	0.0384	0.0007	157	508	38	243	4	29%
54	403	581	213	2.72	0.0604	0.0030	0.3273	0.0181	0.0394	0.0010	109	288	14	249	6	85%
55	736	1077	302	3.56	0.0593	0.0019	0.3194	0.0131	0.0388	0.0008	75	281	10	245	5	86%
56	368	433	150	2.88	0.1012	0.0126	0.5914	0.0898	0.0387	0.0010	233	472	57	245	6	36%
57	316	442	151	2.93	0.0669	0.0037	0.3502	0.0203	0.0381	0.0011	113	305	15	241	7	76%
58	484	591	201	2.94	0.0722	0.0041	0.3812	0.0232	0.0382	0.0007	117	328	17	242	4	69%
59	568	665	301	2.21	0.1299	0.0136	0.7200	0.0879	0.0386	0.0011	186	551	52	244	7	22%
60	310	422	202	2.09	0.0526	0.0022	0.2872	0.0134	0.0393	0.0008	127	256	11	249	5	97%

0.7~4.9 之间,显示基性岩浆锆石特点<sup>[22]</sup>。在 60 个测点中,多数锆石存在铅丢失情况,有 27 个测点偏离谐和线,其余 33 个测点位于谐和线上及其附近且集中分布,其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄介于 241~249 Ma 之间,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值为 246 ± 1 Ma (MSWD=0.41, n=33) (图 4),指示黑云角闪斜长片麻岩的原岩形成时代为中三叠世早期。

### 3.2 锆石 Hf 同位素

在测年工作基础上,选取表面年龄谐和度较高的 25 颗锆石进行了原位 Hf 同位素测试(表 2)。锆石微区 Hf 同位素特征:<sup>176</sup>Yb/<sup>177</sup>Hf 值介于 0.037117~0.295212 之间(平均 0.105720),<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值介于

0.001065~0.010029 之间(平均 0.003191),<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值介于 0.282900~0.283051 之间(平均 0.282985);以成岩年龄 246 Ma 计算的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 +9.55~+14.43 之间(平均+12.42),位于亏损地幔演化线与球粒陨石演化线之间,与兴安岛弧显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成相似(图 5)<sup>[23]</sup>;Hf 同位素单阶段模式年龄( $t_{\text{DM1}}$ )和二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )分别介于 319~520 Ma 和 350~666 Ma 之间,明显大于岩石形成年龄,反映岩浆源自古生代从亏损地幔增生的物质,或者幔源岩浆受到地壳物质的混染<sup>[24]</sup>。 $f_{\text{Lu/Hf}}$  值为 -0.70~-0.97(平均-0.90),变化范围较大,反映源区物质的不均一性。

表 2 黑云角闪斜长片麻岩锆石 Lu-Hf 同位素组成分析结果

Table 2 Lu-Hf isotopic compositions of zircons from biotite-hornblende-plagioclase gneiss

测点号	年龄/Ma	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	$I_{\text{Hf}}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$ /Ma	$t_{\text{DM2}}$ /Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
2	246	0.079822	0.002212	0.282977	0.282966	7.24	12.27	403	489	-0.93
4	246	0.295212	0.010029	0.283046	0.283000	9.7	13.48	383	412	-0.70
5	246	0.105878	0.002756	0.282968	0.282955	6.92	11.88	423	516	-0.92
7	246	0.172703	0.005125	0.283051	0.283027	9.87	14.43	319	350	-0.85
9	246	0.078799	0.002163	0.283014	0.283004	8.57	13.62	347	402	-0.93
10	246	0.086123	0.002557	0.282900	0.282889	4.54	9.55	520	666	-0.92
11	246	0.182131	0.005819	0.283037	0.283010	9.37	13.83	349	389	-0.82
12	246	0.037117	0.001065	0.282923	0.282918	5.35	10.57	467	599	-0.97
13	246	0.049653	0.001423	0.282950	0.282943	6.28	11.46	433	541	-0.96
16	246	0.094981	0.003008	0.282928	0.282915	5.53	10.47	485	607	-0.91
18	246	0.105695	0.003701	0.283007	0.282990	8.33	13.12	373	434	-0.89
21	246	0.097635	0.002632	0.283012	0.283000	8.47	13.48	356	414	-0.92
24	246	0.126160	0.003550	0.282986	0.282969	7.56	12.38	405	483	-0.89
25	246	0.129967	0.003680	0.283020	0.283003	8.76	13.58	354	406	-0.89
30	246	0.055962	0.001667	0.282985	0.282977	7.54	12.66	385	464	-0.95
31	246	0.132918	0.004270	0.283013	0.282994	8.54	13.26	370	427	-0.87
33	246	0.040373	0.001265	0.282968	0.282962	6.94	12.13	405	498	-0.96
34	246	0.069740	0.002091	0.282974	0.282965	7.16	12.24	405	493	-0.94
35	246	0.096123	0.002688	0.282950	0.282937	6.29	11.25	448	554	-0.92
36	246	0.102602	0.003079	0.283031	0.283017	9.17	14.08	331	374	-0.91
37	246	0.063589	0.001910	0.282976	0.282967	7.2	12.31	401	488	-0.94
38	246	0.109878	0.003315	0.282945	0.282930	6.12	11.00	464	573	-0.90
41	246	0.152045	0.004371	0.282988	0.282968	7.64	12.34	411	486	-0.87
49	246	0.098409	0.002811	0.283003	0.282990	8.18	13.12	370	435	-0.92
60	246	0.079493	0.002579	0.282972	0.282960	7.08	12.06	414	503	-0.92



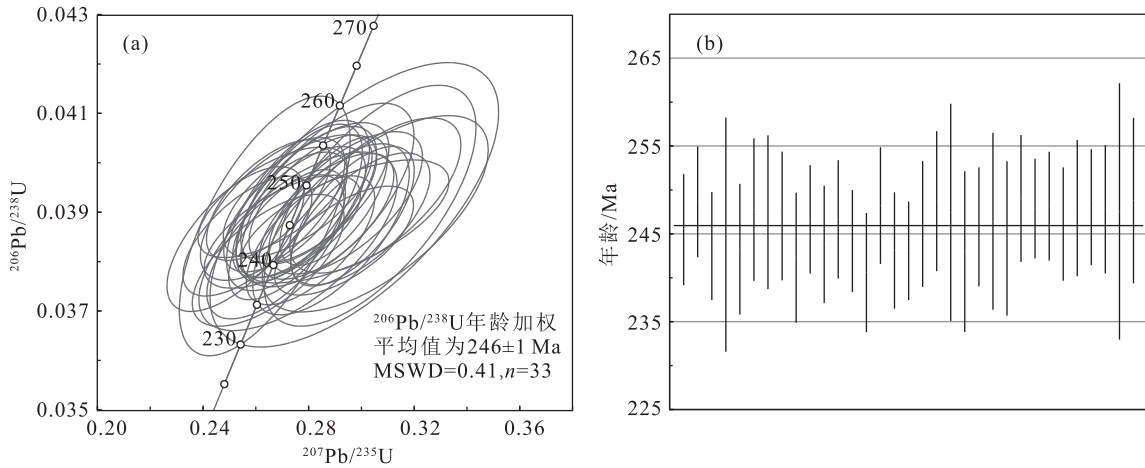


图4 黑云角闪斜长片麻岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb zircon concordia diagrams of the biotite-hornblende-plagioclase gneiss

3.3 岩石地球化学特征

黑云角闪斜长片麻岩 4 件样品的分析结果见表 3。SiO<sub>2</sub> 含量变化较小, 介于 50.09% ~ 53.61% 之间 (平均为 52.27%), 为基性岩浆岩; TiO<sub>2</sub> 含量介于

0.91% ~ 1.05% 之间, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量介于 14.53% ~ 16.68% 之间, 富 MgO (5.53% ~ 7.51%)、TFeO (7.67% ~ 8.8%), CaO (5.49% ~ 9.24%) 含量中等, 相对富 Na<sub>2</sub>O (3.71% ~ 4.85%), 低 K<sub>2</sub>O (0.35% ~

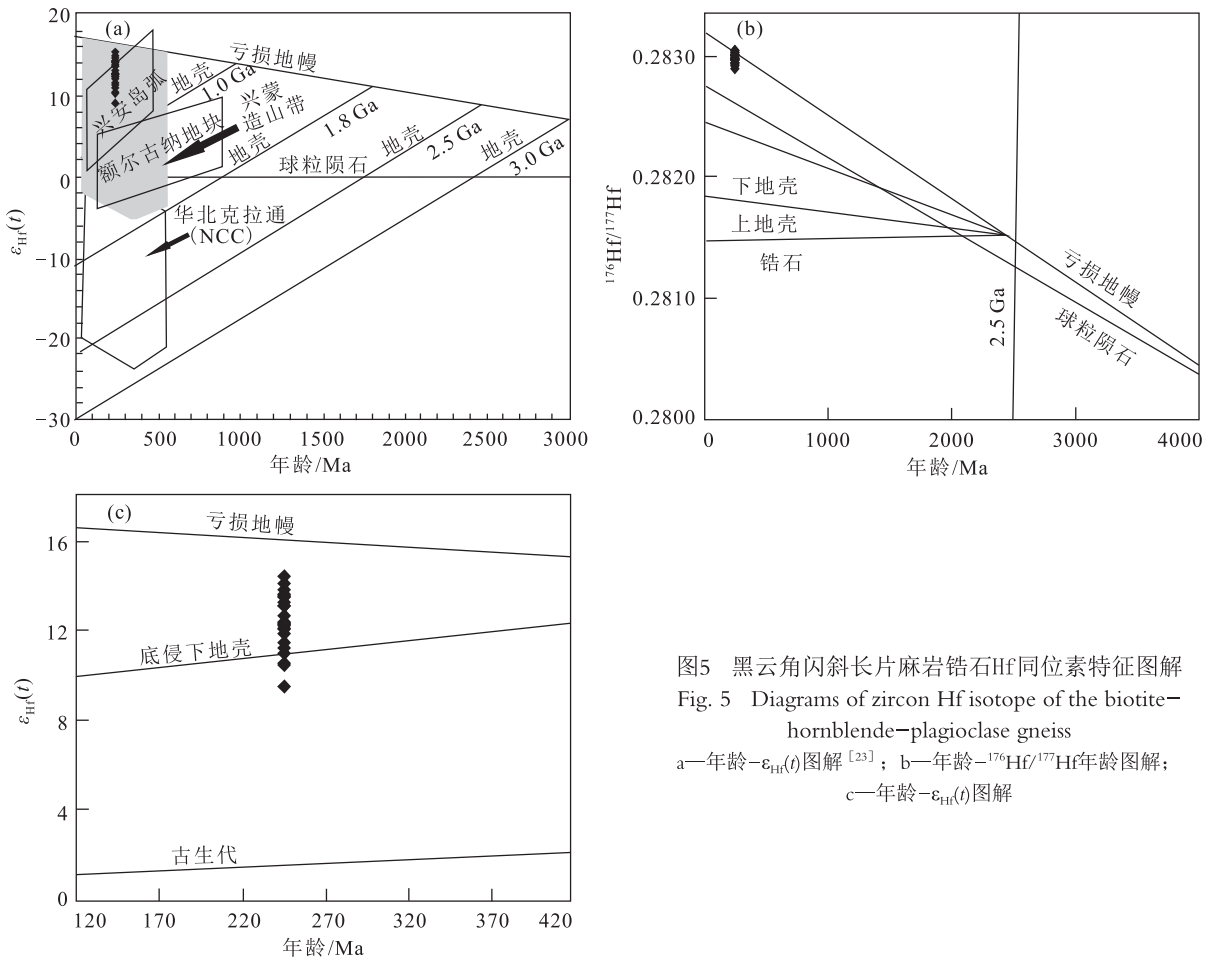


图5 黑云角闪斜长片麻岩锆石 Hf 同位素特征图解  
Fig. 5 Diagrams of zircon Hf isotope of the biotite-hornblende-plagioclase gneiss  
a—年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 图解<sup>[23]</sup>; b—年龄- $^{176}Hf/^{177}Hf$ 年龄图解;  
c—年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 图解

2.37%);  $Mg^{\#}$  值 ( $100Mg^{2+}/(Mg^{2+}+TFe^{2+})$ ) 变化在 54.2~62.3 之间 (平均 57.8);  $TFeO/MgO$  值介于 1.08~1.51 之间; 里特曼指数为 2.17~4.70 (平均 3.55), 显示为钙碱-碱钙性岩石系列。在 TAS 图解 (图 6-a) 中, 样品点落入亚碱性玄武岩与碱性玄武岩过渡区; 在  $Nb/Y-Zr/TiO_2$  图解 (图 6-b) 中落入亚碱性玄武岩的玄武安山岩区域。岩石化学组成与 Condie 等下陆壳平均组分相似<sup>[27]</sup>; 与高铝玄武岩相比, 具有较高的  $K_2O$  含量, 而与橄榄安粗岩相比,  $K_2O$  含量明显较低,  $MgO$  含量较高, 与大陆裂谷碱性玄武岩相比, 具较高的  $SiO_2$  含量, 但  $TiO_2$  含量明显较低<sup>[28]</sup>。

稀土元素总量介于  $140.08 \times 10^{-6} \sim 335.85 \times 10^{-6}$  之间; 富集轻稀土元素 ( $LREE/HREE = 6.53 \sim 11.63$ );  $\delta Ce = 0.95 \sim 1.0$ , 未见异常;  $\delta Eu = 0.67 \sim$

1.01 (平均为 0.89), 显示弱的负异常或基本没有异常。在球粒陨石标准化图解 (图 7-a) 上, 显示为右倾型, 轻重稀土元素分馏较明显 ( $La_N/Yb_N = 4.95 \sim 12.68$ ); 重稀土元素 (HREE) 平坦, 内部未见分异。微量元素方面, 具有异常高的 Sr ( $1500 \times 10^{-6} \sim 2100 \times 10^{-6}$ )、Ba ( $161 \times 10^{-6} \sim 729 \times 10^{-6}$ ) 含量, 较高的 Cr ( $80.35 \times 10^{-6} \sim 87 \times 10^{-6}$ )、Co ( $33.52 \times 10^{-6} \sim 56.34 \times 10^{-6}$ )、Ni ( $24.66 \times 10^{-6} \sim 54.72 \times 10^{-6}$ ) 含量, 但明显低于原始地幔派生的基性岩浆。在原始地幔标准化<sup>[29]</sup>蛛网图上, 富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、Ba、Sr、Th, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti、P、Zr、Hf 等, 与 OIB、N-MORB 和 E-MORB 的特征截然不同 (图 7-b), 具有活动大陆边缘或岛弧环境岩浆岩的地球化学特征<sup>[30-31]</sup>。

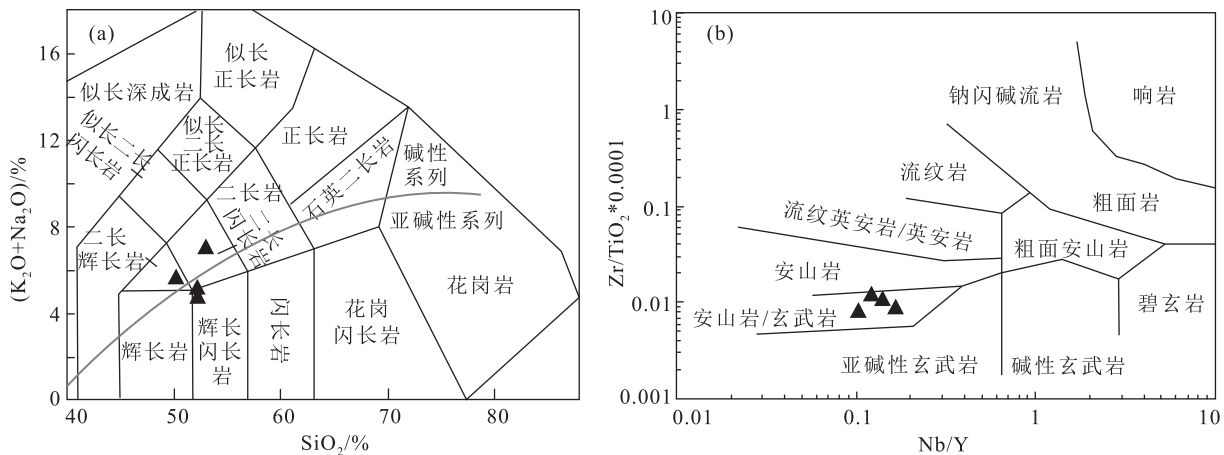


图 6 黑云角闪斜长片麻岩 TAS(a) 与  $Nb/Y-Zr/TiO_2$ (b) 图解

(a, b 底图分别据参考文献 [25] [26])

Fig. 6 TAS (a) and  $Nb/Y-Zr/TiO_2$  (b) diagrams of biotite-hornblende-plagioclase gneiss

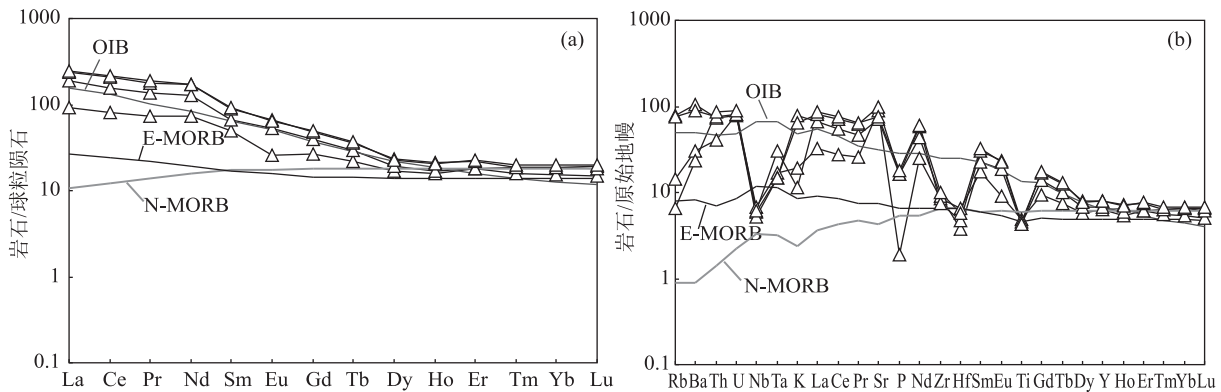


图 7 黑云角闪斜长片麻岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和原始地幔标准化蛛网图 (b)

(标准化数据据参考文献 [29])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-elements spider diagram (b) of the biotite hornblende plagioclase gneiss

N-MORB—N 型洋中脊玄武岩; E-MORB—E 型洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

## 4 讨论

## 4.1 形成时代

落马湖群主要出露于嫩江断裂带以东,小兴安岭西北部的嘎拉山林场、三卡—白石砬子一带,多呈孤岛状或残块状分布于中生代侵入岩中;《黑龙江省岩石地层》<sup>[32]</sup>根据其岩石组合、变形变质特征,自下而上划分为铁帽山组、嘎拉山组及北宽河组。铁帽山组为一套含矽线石、十字石、石榴子石等特征变质矿物的黑云斜长变粒岩、片岩、片麻岩及白色大理岩的中深变质岩组合;嘎拉山组为一套含十字石、石榴子石特征变质矿物的二云石英片岩、二云片岩、白云(绢云)片岩、变粒岩等中浅变质岩组合;北宽河组为一套绢云板岩、千枚岩、片理化凝灰

质砂岩、片理化中酸性火山岩、微晶片岩、长英质角闪岩组合。卧都河幅、黑河市幅 1:25 万区域调查报告<sup>①</sup>将铁帽山组及嘎拉山组中含十字石的角闪岩相变质部分划为古元古代兴华渡口岩群,含石榴子石部分仍保留为嘎拉山岩组。由于早中生代巨量深成侵入岩“吞噬”及晚中生代大面积火山岩覆盖,加上植被发育等因素,所见各组间均为断层接触;1:20 万三道卡—白石砬子幅区域地质调查,三道卡地区北宽河组获得 Rb-Sr 等时线年龄为 501 Ma<sup>②</sup>,1:5 万新峰幅等四幅区域地质调查据黑河张地营子一带北宽河组细碎屑沉积岩中产疑源类化石 *Trachysphaeridium*-*Baltisphaeridium* 组合<sup>③[15]</sup>,将其时代置于新元古代—早寒武世。本次研究的落马湖岩群出露于卧都河乡驻地北附近(图 1),所见岩性自

表 3 黑云角闪斜长片麻岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Major, trace and rare earth element contents of biotite-hornblende-plagioclase gneiss

样号	b1	b2	b4	b5	样号	b1	b2	b4	b5
SiO <sub>2</sub>	52.76	53.61	50.09	52.6	Ho	0.9	0.96	1.18	1.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.53	16.68	15.87	16.3	Er	2.95	2.94	3.63	3.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2	1.74	1.55	0.88	Tm	0.47	0.41	0.48	0.5
FeO	7.01	6.11	7.41	7.55	Yb	3.18	2.64	3.18	3.34
MgO	7.51	5.81	6.56	5.53	Lu	0.49	0.38	0.46	0.5
TiO <sub>2</sub>	1.05	0.93	0.98	0.91	Ba	209.42	729.79	622.73	161.72
CaO	9.24	5.49	8.66	8.83	Rb	9.02	49.96	47.49	4.14
K <sub>2</sub> O	0.57	2.37	1.95	0.35	Sr	1900	1500	2100	1600
Na <sub>2</sub> O	4.03	4.69	3.71	4.85	Th	3.48	6.25	6.4	7.29
MnO	0.31	0.19	0.3	0.23	U	1.7	1.64	1.69	1.9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.36	0.35	0.4	Zr	94.52	102.29	82.91	113.22
烧失量	1.59	1.97	2.4	1.3	Hf	2.02	1.14	1.47	1.75
总计	99.84	99.95	99.82	99.73	Nb	4.83	4.27	3.7	4.41
Mg <sup>#</sup>	62.3	57.5	57	54.2	Ta	0.7	0.61	0.61	1.24
TFeO/MgO	1.08	1.32	1.34	1.51	Li	19.94	72.9	85.83	17.84
σ	2.17	4.7	4.51	2.81	Be	1.82	1.86	2.11	1.85
Y	29.14	30.46	35.76	36.44	Sc	23.96	11.55	16.31	12.36
La	21.94	45.34	56.23	58.55	V	102.89	144.85	169.71	164.47
Ce	49.03	95.71	126.97	133.69	Cr	86.86	87	86.46	80.35
Pr	7.07	13	17.01	18.02	Co	33.52	43.58	56.34	46.46
Nd	34.22	58.81	79.12	80.98	Ni	24.66	54.72	41.58	36.01
Sm	7.7	10.05	13.55	14.24	ΣREE	140.08	247.48	322.82	335.85
Eu	1.51	3.09	3.9	3.78	LREE/HREE	6.53	10.52	11.39	11.63
Gd	5.51	8.15	9.91	10.23	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	4.95	12.33	12.68	12.59
Tb	0.81	1.1	1.34	1.38	δEu	0.67	1.01	0.98	0.91
Dy	4.29	4.91	5.88	5.76	δCe	0.96	0.95	1	1

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>



北东向带状出露晚三叠世—早侏罗世花岗岩, 往南东依次见二云母片岩、黑云角闪斜长片麻岩、变粉砂岩及泥质粉砂岩; 黑云角闪斜长片麻岩与二云片岩构造协调, 但与变粉砂岩未见接触, 推测二者为断层接触。黑云角闪斜长片麻岩测年结果为  $246 \pm 1$  Ma, 表明其原岩形成于中三叠世早期; 在其南东侧出露的含疑源类化石 *Leiosphaeridia* sp. 的变粉砂质泥岩中获得碎屑锆石最小年龄加权平均值为  $485 \pm 5$  Ma, 表明样品层位沉积上限为早奥陶世(待发表数据)。黑云角闪斜长片麻岩中见变余斑状结构, 变余斑晶粒径为  $0.1 \sim 1$  mm, 而重结晶基质粒径为  $0.05 \sim 0.2$  mm, 岩石化学分析  $\text{SiO}_2$  含量介于  $50.09\% \sim 53.61\%$  之间, 出现副矿物长柱状磷灰石、他形榍石等, 表明其原岩应为中基性岩脉, 是中三叠世构造-岩浆事件的反映, 并遭受后期构造-热事件改造。

落马湖岩群主要出露于嫩江-开鲁断裂带东侧, 较集中出露于嘎拉山林场、三道卡—白石砬子及张地营子—新生乡一带。黄永为等<sup>[33]</sup>在三道卡—白石砬子一带落马湖群中发现早奥陶世牙形石化石: *Drepanodus orcadus*、*Reutterodus depress.*, 表明其形成于早奥陶世; 赵院东等<sup>[17]</sup>获得三道卡及张地营子一带落马湖岩群二云片岩碎屑锆石最小年龄介于  $406 \sim 411$  Ma 之间, 认为其形成时代上限为早泥盆世早期; 孙巍<sup>[16]</sup>在呼玛县嘎拉山林场西南落马湖群褐色二云石英片岩碎屑锆石最小年龄峰值的加权平均值为  $420 \pm 4$  Ma, 认为其形成时代上限为志留纪拉德洛期; Miao 等<sup>[34]</sup>研究了嘎拉山村南落马湖群黑云角闪斜长片麻岩及侵入其中的强变形的长英质脉岩年代学, 获得前者形成年龄为  $175 \pm 3$  Ma, 后者年龄为  $159 \pm 3$  Ma, 认为落马湖群原岩形成时代为约 180 Ma 的中生代。

上述研究成果表明, 落马湖岩群包含了早奥陶世—早中生代不同时代的地质体, 是一套变质作用及变形作用差异较大的变质杂岩。这种差异可能与其所处不同构造部位及早中生代侵入岩体空间位置有关。

#### 4.2 岩浆源区

岩石化学分析表明, 黑云角闪斜长片麻岩原岩  $\text{SiO}_2$  含量介于  $50.09\% \sim 53.61\%$  之间(平均为  $52.27\%$ ), 为基性偏中性岩浆岩。一般认为, 基性岩是由上地幔部分熔融产生的玄武质岩浆或其演化的岩浆结晶的产物; 岩石地球化学特征, 主要受到

岩浆源区成分及岩浆演化过程的制约; 因而通过岩石地球化学组分特征分析, 可以推测岩浆的可能源区。研究样品属碱钙性-钙碱性岩石, 具有较高的  $\text{MgO}$  ( $5.53\% \sim 7.51\%$ )、 $\text{TFeO}$  ( $7.67\% \sim 8.8\%$ ) 含量及高的  $\text{Mg}^\#$  ( $54.2 \sim 62.3$ , 平均为  $57.8$ ) 值, 具有幔源岩浆的特点。在稀土元素配分图上, 重稀土元素配分曲线平坦, Y、Yb 无异常, 反映岩浆源区石榴子石未参与岩浆的平衡, 岩浆应形成于上地幔石榴子石橄榄岩相以浅。

样品锆石原位 Hf 同位素和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值位于亏损地幔演化线与球粒陨石演化线之间(图 5-a、b), 与中亚造山带兴安岛弧显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成类似<sup>[23, 35]</sup>; 单阶段模式年龄 ( $t_{\text{DM1}} = 319$  Ma  $\sim$  520 Ma) 明显老于岩石成岩年龄, 在  $t - \varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解(图 5-c)中, 样品点主要位于亏损地幔演化线与底侵下地壳演化线之间, 反映岩浆主要源自古生代亏损地幔增生的物质, 并有陆壳物质的贡献。岩石的  $\text{Mg}^\#$  值(平均  $57.8$ ) 明显低于玄武岩原生岩浆的值 ( $68 \sim 75$ )<sup>[36]</sup>, 相容元素  $\text{Cr}$  ( $80.35 \times 10^{-6} \sim 87 \times 10^{-6}$ )、 $\text{Co}$  ( $33.52 \times 10^{-6} \sim 56.34 \times 10^{-6}$ )、 $\text{Ni}$  ( $24.66 \times 10^{-6} \sim 54.72 \times 10^{-6}$ ) 含量也明显低于原始地幔派生的基性岩浆,  $\delta\text{Eu} = 0.67 \sim 1.01$  (平均  $0.89$ )。这种地球化学特征反映岩浆或经历了弱的结晶分异作用, 或遭受了地壳混染; 样品中异常高的 Sr 含量 ( $1500 \times 10^{-6} \sim 2100 \times 10^{-6}$ ) 证明后者的可能性更大<sup>[30]</sup>。520  $\sim$  319 Ma 是兴安地块东南缘多宝山岛弧带形成演化、陆壳增生的最重要时期, 构成多宝山岛弧带主体的奥陶纪及泥盆纪岩浆岩具有高的 Sr ( $129 \times 10^{-6} \sim 1230 \times 10^{-6}$ )、Ba ( $127 \times 10^{-6} \sim 2120 \times 10^{-6}$ ) 含量<sup>①[37]</sup>。而研究区位于多宝山岛弧带之上, 黑云角闪斜长片麻岩原岩地球化学及 Hf 同位素特征, 反映岩浆源与多宝山岛弧古生代增生岩石圈地幔部分熔融及陆壳物质参与密切相关, 这与样品富集不相容元素、岩石偏碱性特点吻合<sup>[38]</sup>; 样品  $f_{\text{Lw/Hf}}$  值介于  $-0.70 \sim -0.97$  之间(平均  $-0.90$ ), 变化范围较大, 可能是岛弧带增生带物质复杂的反映。

样品 Hf 同位素特征, 与出露于多宝山岛弧带东南缘玄武安山岩(242 Ma) 具有基本相同的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 ( $+8.5 \sim +12.7$ ) 及 Hf 同位素模式年龄 ( $t_{\text{DM1}} = 382 \sim 555$  Ma)<sup>[39]</sup>; 与出露于兴安地块西南阿尔山南部明水地区花岗闪长岩-二长花岗岩(243  $\sim$  240 Ma) 的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 ( $+6.55 \sim +12.19$ ) 及 Hf 同位素模式

年龄( $t_{DM2} = 595 \sim 1107$  Ma)<sup>[40]</sup>有一定差别;但与出露于额尔古纳地块东部的呼玛察哈岩体(花岗闪长岩-正长花岗岩, 236~240 Ma)具有明显不同的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-3.94~+2.19)及Hf同位素模式年龄( $t_{DM2} = 1.1 \sim 1.5$  Ga)<sup>[41]</sup>。进一步佐证了多宝山岛弧带古生代增生岩石圈物质为岩浆源区之一的认识。

综合上述特征,认为岩浆源自古生代增生岩石圈地幔的部分熔融并遭到地壳的混染。

#### 4.3 构造背景

黑云角闪斜长片麻岩样品投图结果表明,在Zr-Nb-Y图解(图8-a)中,样品点落入N-MORB区域,在Th-Hf-Nb图解(图8-b)中,进入火山弧玄武岩区,在Nb/Zr-Th/Zr图解<sup>[44]</sup>(图9-a)中,落入陆缘弧玄武岩与陆-陆碰撞带玄武岩接合部位,在Nb/Yb-Th/Yb图解<sup>[45]</sup>(图9-b)中,显示为大陆弧构造背景。这与岩石富集LREE( $La_N/Yb_N = 4.95 \sim 12.68$ )和大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Sr、Th,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti、P、Zr、Hf反映的活动大陆边缘或者岛弧环境基本一致,尤其是Nb、Ta的亏损被认为是板块俯冲环境岩浆岩的典型特征<sup>[46]</sup>。在Th/Yb-U/Th图解<sup>[47]</sup>(图10)上,反映俯冲沉积物熔体参与了岩浆的形成。因此,其形成构造背景应为与俯冲活动相关的活动大陆边缘。

中亚造山带东段的大兴安岭地区,早-中三叠世总体处于华北板块与西伯利亚板块相向汇聚挤

压的重要时期,在南部华北克拉通北缘形成了沿西拉木伦-长春-延吉结合带近东西向展布的巨型侵入岩带<sup>[4]</sup>,而在北部额尔古纳-兴安地块上形成2条岩浆岩带,一条为主要沿满洲里-奇乾一带北东向展布的侵入岩带,另一条是包括研究区在内的音德尔-呼玛一带北东向的岩浆岩带(图1-a)。南部侵入岩带被认为与华北克拉通和北侧造山区“微陆块群”碰撞有关,形成于同碰撞-后碰撞伸展构造背景<sup>[48-53]</sup>;北部侵入岩带或被认为与蒙古-鄂霍茨克洋板块南向俯冲有关<sup>[54-58]</sup>,或被认为形成于华北板块与西伯利亚板块碰撞造山后的伸展构造背景<sup>[40-41, 59]</sup>。

大洋板块向大陆板块俯冲,通常在大陆边缘近俯冲带发育平行俯冲带的火山岩带,在紧邻的内陆地区形成平行俯冲带的深成侵入岩带,共同构成弧岩浆岩带。沿额尔古纳地块西缘(奇乾-满洲里一带)平行蒙古-鄂霍茨克构造带出露的早-中三叠世侵入岩带,为一套钙碱性-高钾钙碱性侵入岩组合(闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩,少量辉石闪长岩)<sup>[54, 59]</sup>。该侵入岩带向西南延入蒙古国境内,与侨巴山-赛音山达一线早-中三叠世火山-侵入岩带相接,构成与蒙古-鄂霍茨克洋板块南东向俯冲有关的陆缘岩浆弧<sup>[54, 57]</sup>。而包括研究区在内的中三叠世呼玛-音德尔一带北东向的岩浆岩带,位于兴安地块东缘,为一套碱

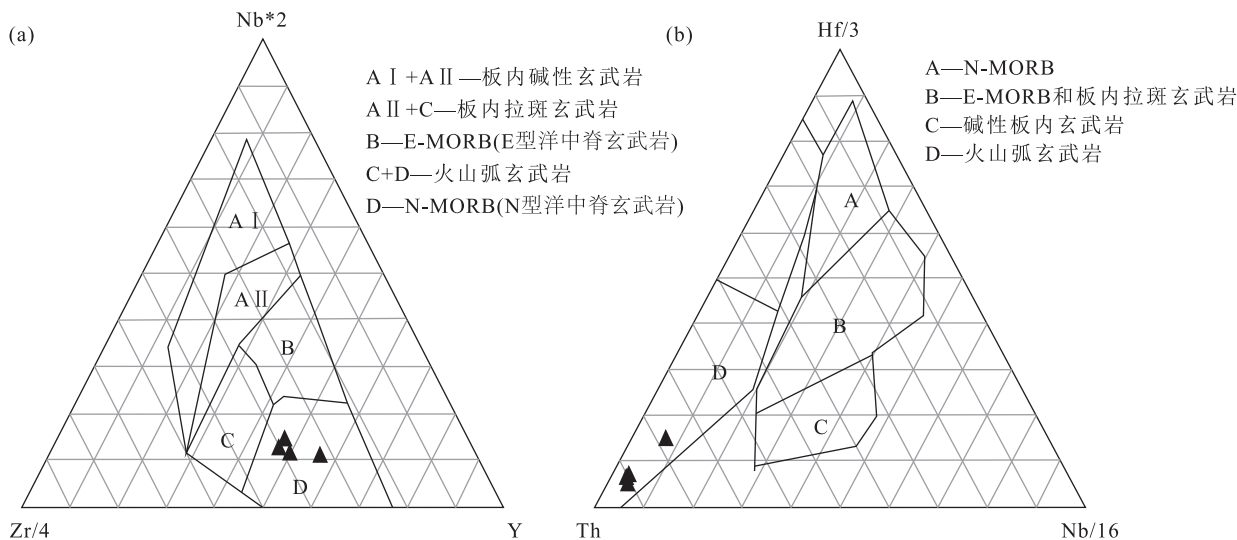


图8 Zr/4-Nb\*2-Y图解(a)和Th-Hf/3-Nb/16图解(b)

(a,b底图分别参考文献[42][43])

Fig. 8 Zr/4-Nb\*2-Y (a) and Th-Hf/3-Hf-Nb/16 (b) diagrams

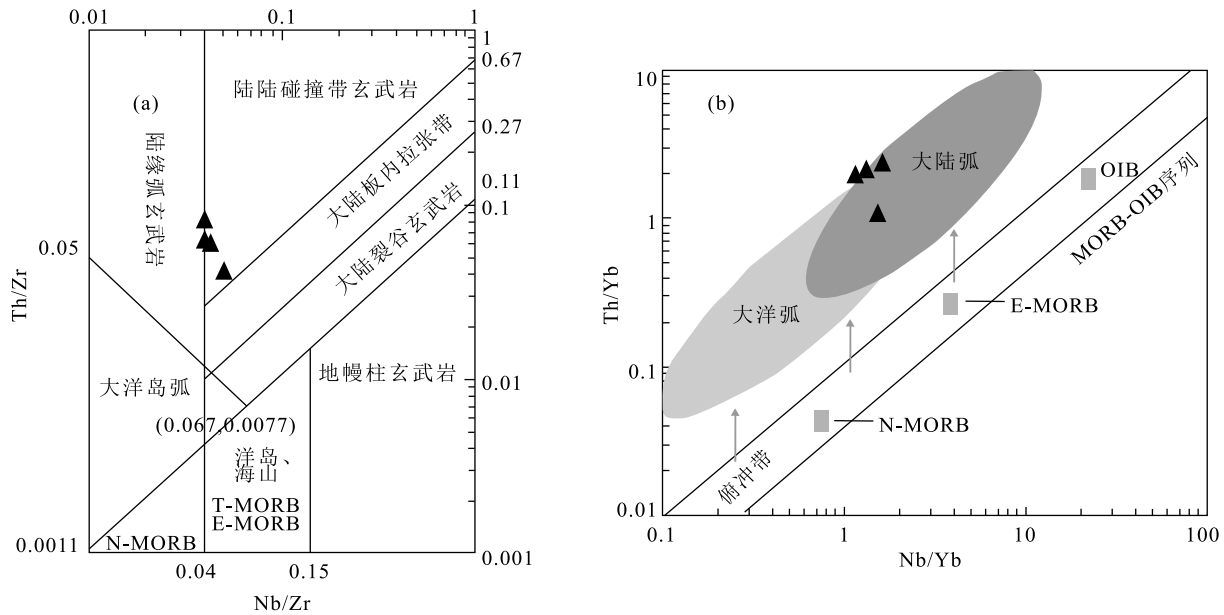


图 9 Nb/Zr-Th/Zr 图(a)和 Nb/Yb-Th/Yb 判别图(b)

(a,b 底图分别据参考文献[44][45])

Fig. 9 Nb/Zr-Th/Zr (a) and Nb/Yb-Th/Yb (b) diagrams

N-MORB—N 型洋中脊玄武岩; E-MORB—E 型洋中脊玄武岩; T-MORB—T 型洋脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

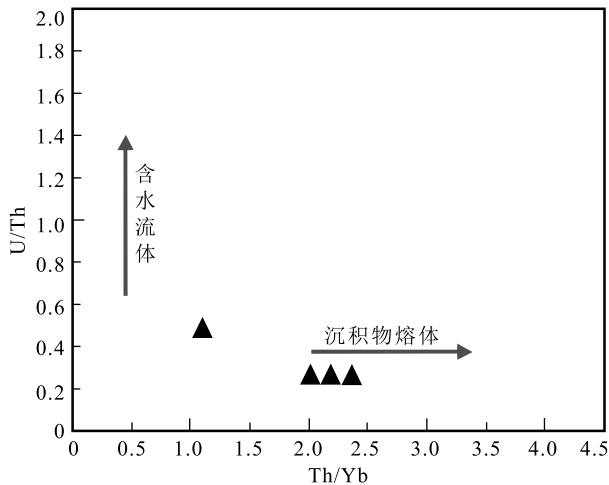


图 10 Th/Yb-U/Th 判别图(底图据参考文献[47])

Fig. 10 Th/Yb-U/Th discriminative diagram

钙性-高钾钙碱性火山-侵入岩组合(辉长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩、玄武安山岩)<sup>[39-41]</sup>。尽管其与前者基本平行,但其中同时发育火山岩,显然与前者不是同一条侵入岩带。这条带的岩浆活动明显较前者弱,并与北部蒙古-鄂霍茨克构造带大角度相交,前述构造环境判别其形成于俯冲相关的活动陆缘,那么如何更合理地理解其形成的构造背景?

蒙古-鄂霍茨克构造带为蒙古-鄂霍茨克洋于晚二叠世-白垩纪自西向东沿肯特-艾伦达瓦、南图库林格勒、扎格达迪构造带一线剪刀式闭合形成的构造带<sup>[56,60-62]</sup>④。在该构造带东部黑龙江-鄂霍茨克段的阿穆尔地区仍发育晚三叠世海相硅质岩、基性火山岩及泥质砂岩<sup>④⑤</sup>;在额尔古纳地块北部发育中-晚侏罗世漠河前陆盆地<sup>[63]</sup>、晚侏罗世-早白垩世自北向南运动的漠河推覆构造带<sup>[64-65]</sup>;在兴安地块东缘白石砬子地区早-中侏罗世仍发育与俯冲相关的 TTG 侵入岩<sup>[66]</sup>、孙吴地区具有增厚陆壳熔融特点的中侏罗世白云母花岗岩<sup>[67]</sup>。俄罗斯阿穆尔地区-大兴安岭北部-小兴安岭西北部地区自晚三叠世-早白垩世建造和构造改造连续发育的特点,说明晚三叠世-早白垩世包括研究区在内的这一地区一直处于汇聚构造背景。鉴于研究区在地理位置上更靠近蒙古-鄂霍茨克构造带,而远离南部西拉木伦-长春-延吉近东西向结合带,笔者认为,包括研究区在内的大兴安岭北部及小兴安岭西北部地区,在早-中三叠世主要遭受了蒙古-鄂霍茨克洋板块南向俯冲作用的影响。

大洋板块向大陆板块俯冲通常发育平行俯冲带的岩浆岩带,而沿转换断层带一般不发育岩浆活



动,仅在局部有“漏洞”的地区,发育少量的岩浆活动<sup>[38]</sup>。包括研究区在内的早—中三叠世呼玛—音德尔北东向岩浆岩带,与北部蒙古—鄂霍茨克构造带大角度相交,零星出露深成侵入岩<sup>[40-41]</sup>及中基性火山岩<sup>[39]</sup>(图 1-a),同时沿卧都河—音德尔一带发育线状展布的早三叠世陆相沉积盆地<sup>[4]</sup>。早—中三叠世这种沉积及岩浆建造空间展布、与北部蒙古—鄂霍茨克构造带近直交的空间关系,早—中三叠世岩浆活动受到蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的制约,以及前述中生代构造变形特点,可能暗示在内陆地区沿呼玛—音德尔一线发育一条早—中三叠世的转换构造带;转换构造带的形成主要受到蒙古—鄂霍茨克洋板块自西向东剪刀式闭合的制约,可能是转换构造带西侧较东侧南向走滑运动速率大导致的;在转换断层构造带局部张扭形成的“漏洞”地区,岩石圈地幔及古生代增生陆壳减压并受俯冲流体/熔体交代“水化”<sup>[38]</sup>熔融形成岩浆,并沿转换断裂带上侵(图 11),形成与蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲有关的岩浆侵入及火山活动。

黑云角闪斜长片麻岩原岩形成于 246 Ma 左右的中三叠世,为一套基性偏中性岩浆岩,是遭受后期变质作用改造的结果。包括研究区在内的小兴安岭北部地区属于中亚造山带的一部分,历经古生代弧—盆系演化、陆缘增生,在晚古生代晚期已进入

陆内环境。研究区出露的晚二叠世陆相中酸性火山—碎屑沉积、早三叠世陆相河—湖相碎屑沉积即是标志反映。中生代在研究区以北仍存在蒙古—鄂霍茨克洋构造带的强烈活动。

综合上述岩石地球化学判别、区域构造—岩浆建造特点,认为研究区黑云角闪斜长片麻岩原岩形成于活动陆缘构造背景,与蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲有关,可能受到北北东向陆内转换构造带的控制。

## 5 结 论

(1) 出露于小兴安岭西北部卧都河乡驻地附近的落马湖群嘎拉山组中的黑云角闪斜长片麻岩,原岩为基性岩浆岩,形成时代为 246 Ma 左右的中三叠世;其产状与围岩构造协调,是遭受后期构造改造的结果;落马湖群是一套包含有自早奥陶世—早中生代不同时代地质体的构造杂岩。

(2) 岩石地球化学特征表明,黑云角闪斜长片麻岩成分与下地壳平均成分类似;富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、Th,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P、Hf,原岩形成于活动大陆边缘构造背景;Hf 同位素示踪显示,其与兴安岛弧显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成类似,岩浆源自“水化”的古生代多宝山岛弧带增生岩石圈地幔的部分熔融并有陆壳物质的参与,与蒙古—鄂霍茨克洋板块南向俯冲有关,可

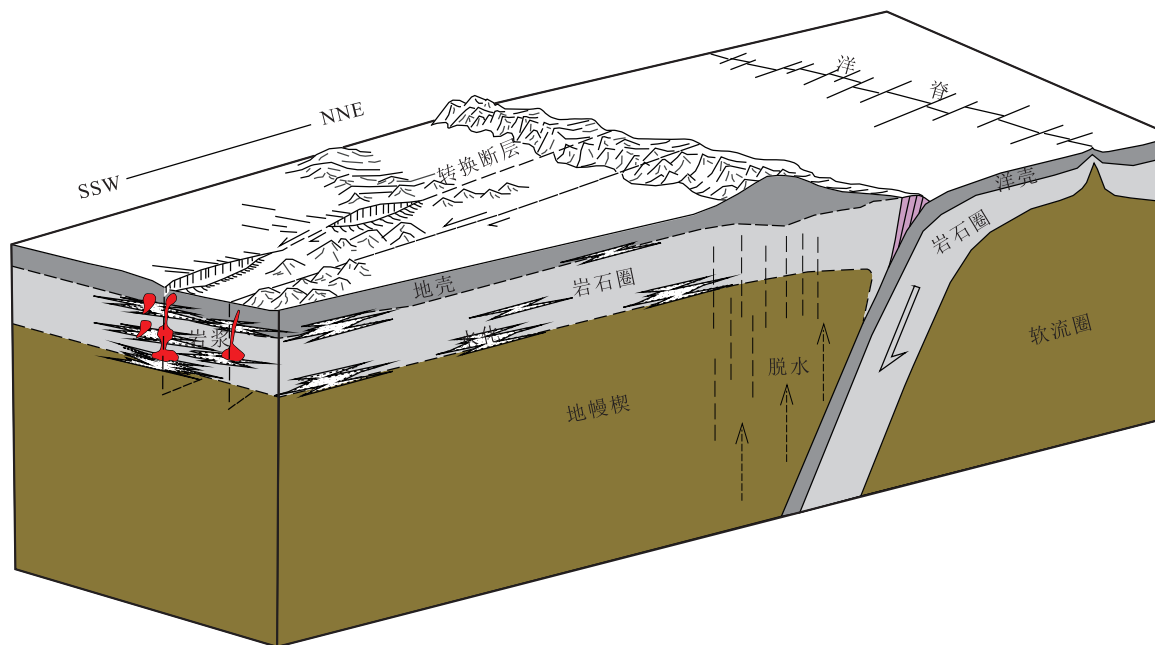


图 11 中三叠世呼玛—音德尔一带转换构造带模式图

Fig. 11 The pattern diagram of the Middle Triassic transformation tectonic belt in Huma-Yindal

能受到同时期北北东向陆内转换构造带的控制。

**致谢:** 样品测试分析过程中, 得到了东北矿产检测中心实验室、河北区域地质矿产调查研究所实验室、北京铀年领航科技有限公司、北京科荟测试技术有限公司等单位及个人的大力支持; 审稿专家对文稿提供了宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意。

## 参考文献

- [1] Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [2] 张兴洲, 周建波, 迟效国, 等. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(5): 719-725.
- [3] 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化 [J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 943-951.
- [4] 付俊彧, 朱群, 杨雅军, 等. 中华人民共和国地质图(东北)说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 2019: 105-143.
- [5] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [6] 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 [J]. *科学通报*, 2007, 52(5): 591-601.
- [7] Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. A >1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2011, 509(3/4): 280-292.
- [8] 周建波, 张兴洲, Wilde S A, 等. 中国东北~500Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1235-1245.
- [9] 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 内蒙古额尔古纳地块古元古代末期的岩浆记录——来自花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄证据 [J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 341-352.
- [10] Ge W C, Chen J S, Yang H, et al. Tectonic implications of new zircon U-Pb ages for the Xinghuadukou Complex, Erguna Massif, northern Great Xing'an Range, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 106: 169-185.
- [11] 赵院冬, 许逢明, 车继英, 等. 锆石 U-Pb 定年对大兴安岭东北部“兴华渡口群”形成时代和组成的约束 [J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 575-587.
- [12] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571-594.
- [13] 孙巍, 迟效国, 潘世语, 等. 大兴安岭北部新林地区倭勒根群大网子组锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(1): 176-185.
- [14] 杜兵盈, 冯志强, 刘宇威, 等. 大兴安岭环二库新元古代变质辉长岩的厘定及其地质意义 [J]. *世界地质*, 2017, 36(3): 751-762.
- [15] 表尚虎, 赵海滨, 付俊彧. 黑龙江黑河变质地层微古植物化石的发现 [J]. *中国区域地质*, 2000, 19(4): 445-447.
- [16] 孙巍. 兴安地块“前寒武纪变质岩系”——下古生界锆石年代学研究及其构造意义 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2014.
- [17] 赵院冬, 车继英, 许逢明, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系对兴安地块落马湖群原岩形成时代的约束 [J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 489-502.
- [18] 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 等. 中国兴蒙—吉黑地区岩石圈结构基本特征 [J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 816-823.
- [19] 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: 537-571.
- [20] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术 [J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
- [21] Ludwig K P. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California, 2003.
- [22] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [23] Yang J H, Wu F Y, 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: 336-352.
- [24] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [25] Irvine T H, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- [26] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28: 459-469.
- [27] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise Geochem*, 2003, (3): 1-64.
- [28] Condie K C. Plate tectonics and crustal evolution [M]. Pergamon Press, London, 1976: 1-288.
- [29] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [30] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 104-118.
- [31] Pearce J A. Trace element characteristics of lava from destructive plate boundaries [C] // Thorpe R S. Andesites: orogenic andesites and related rocks. New York: John Wiley and Sons, 1982: 525-548.
- [32] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [33] 黄永卫, 刘扬, 王喜臣, 等. 黑龙江北部多宝山矿区奥陶系的岩石特征和构造意义 [J]. *地质科学*, 2009, 44(1): 245-256.
- [34] Miao L C, Zhang F Q, Zhu M S, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of metamorphic complexes in the conjunction of the Greater and Lesser Xing'an ranges, NE China: Timing of formation and metamorphism and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 634-648.
- [35] 钱程, 汪岩, 陆露, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区斜长角闪岩年代学、地球化学和 Hf 同位素特征及其构造意义 [J]. *地球科学*, 2019, 44(10): 3193-3208.
- [36] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 11-21.
- [37] 刘军, 周振华, 何哲峰, 等. 黑龙江省铜山铜矿床英闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征 [J]. *矿床地质*, 2015, 34(2): 289-308.
- [38] 牛耀麟. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中东部中生代基性火山岩成因的新思路 [J]. *高校地质学报*, 2005, 11(1): 9-46.

- [39] Li Y, Xu W L, Wang F, et al. Triassic volcanism along the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial-temporal extent of the Mongol - Okhotsk tectonic regime [J]. *Gondwana Research*, 2017, 48: 205-223.
- [40] 刘希雯, 杨浩, 董玉, 等. 大兴安岭明水地区三叠纪花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2015, 34(2): 143-158.
- [41] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭北部察哈彦岩体的 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(5): 849-867.
- [42] Meschede M. A method of discriminating between different types of Mid-Ocean Ridge Basalt and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207-218.
- [43] 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.
- [44] 孙书勤, 张成江, 赵松江. 大陆板内构造环境的微量元素判别[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 104-109.
- [45] Pearce J A. Immobile element fingerprinting of ophiolites [J]. *Elements*, 2014, 10: 101-108.
- [46] Gill J B. *Orogenic andesites and plate tectonics*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981-358.
- [47] Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka arc petrogenesis[J]. *Geochemica et Cosmo Chimica*, 1997, 61: 577-600.
- [48] 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.
- [49] 高爽, 陈卫锋, 任全, 等. 内蒙古察右中旗地区万隆昌-大脑包花岗岩成因研究[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(1): 1-15.
- [50] 闫冬, 臧兴运, 马春生, 等. 吉林和龙地区勇新二长花岗岩的成因及形成构造环境探讨[J]. *世界地质*, 2018, 37(3): 724-736.
- [51] 王文龙, 滕学建, 刘洋, 等. 内蒙古狼山地区中三叠世早期 C 型埃达克岩的发现及其构造意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 220-233.
- [52] 张晓飞, 滕超, 周毅, 等. 内蒙古西乌旗地区晚二叠世—早中三叠世花岗岩年代学和地球化学特征及构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(8): 1903-1927.
- [53] 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 内蒙古阿尔塔拉中三叠世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 51-61.
- [54] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. *Lithos*, 2014, 184/187: 1-16.
- [55] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol - Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 218-240.
- [56] 黄始琪, 董树文, 胡健民, 等. 蒙古-鄂霍茨克构造带的形成与演化[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2192-2205.
- [57] 江思宏, 韩世炯, 陈郑辉, 等. 蒙古国铜矿床成矿规律[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(5): 1-19.
- [58] 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等. 蒙古国额尔登特大型铜-铅矿床年代学与成因研究[J]. *地球学报*, 2010, 31(3): 289-306.
- [59] 余安全, 梁玉伟, 李进文, 等. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(6): 1831-1864.
- [60] 莫中国, 韩美莲, 李锦轶. 蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 24(3): 50-64.
- [61] 吴根耀. 中亚造山带南带晚古生代演化: 兼论中蒙交界区中—晚二叠世残留海盆的形成[J]. *古地理学报*, 2014, 16(6): 907-919.
- [62] 黄始琪, 董树文, 张福勤, 等. 蒙古-鄂霍茨克构造带中段构造变形及动力学特征[J]. *地球学报*, 2014, 35(4): 415-424.
- [63] 和政军, 李锦轶, 莫中国, 等. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(12): 1219-1226.
- [64] 刘晓佳, 赵立国, 田璐, 等. 漠河逆冲推覆构造活动时代的 ESR 年龄证据[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(4): 299-303.
- [65] 赵书跃, 郑全波, 韩彦东. 漠河逆冲推覆构造中段地质特征与构造演化[J]. *地质通报*, 2016, 35(7): 1095-1105.
- [66] 赵院冬, 车继英, 吴大天, 等. 小兴安岭西北部早—中侏罗世 TTG 花岗岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(4): 1119-1137.
- [67] 李宇, 丁磊磊, 许文良, 等. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 55-66.
- ①黑龙江省地质调查研究院. 卧都河幅—黑河市幅 1: 25 万区域地质调查报告. 2009.
- ②黑龙江省地质矿产局. 三道卡—白石砬子幅 1: 20 万区域地质调查报告. 1986.
- ③黑龙江地质调查研究院. 新峰幅等四幅 1: 5 万区域地质调查报告. 2000.
- ④列. 依. 克拉斯内. 彭云彪. 黑龙江流域及邻区地质图说明书. 哈尔滨, 黑龙江省地质矿产局—俄罗斯科尔斯基全俄地质研究所, 1996: 31-34.
- ⑤Ministry of natural resources and ecology of the Russian federation federal agency on mineral resources. Geological map of Russia and adjoining water areas (1: 2 500 000). 2016.
- ⑥内蒙古地质调查院. 沙巴尔吐幅等六幅 1: 5 万区域地质调查报告. 2018.