

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0022—13

孙永刚, 李碧乐, 谢实学, 等. 额尔古纳地块北段霍洛台地区辉绿岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征和构造背景 [J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 22–34. DOI: 10.3969/j.issn.1004–5589.2025.01.002.

SUN Y G, LI B L, XIE S X, et al. Zircon U-Pb dating, petrogeochemical characteristics and tectonic setting of diabase in Huoluotai area, northern segment of Erguna Block [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 22–34. DOI: 10.3969/j.issn.1004–5589.2025.01.002.

额尔古纳地块北段霍洛台地区辉绿岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征和构造背景

孙永刚¹, 李碧乐^{2*}, 谢实学¹, 靳皇玉³, 凌世伟¹, 李焕纪¹

1. 宿州学院 资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000;

2. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

3. 吉林省地质调查院, 长春 130102

摘要: 为探讨大兴安岭地区早白垩世大规模岩浆活动形成的地球动力学机制, 笔者选取大兴安岭额尔古纳地块北段霍洛台地区辉绿岩为研究对象, 通过对霍洛台地区辉绿岩进行岩石地球化学特征及锆石 U-Pb 定年的研究, 查明其形成时代、岩石成因和构造背景。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果表明霍洛台地区辉绿岩的加权平均年龄为 (135.1 ± 3.6) Ma, 代表辉绿岩的结晶年龄为早白垩世。全岩地球化学数据显示, 霍洛台辉绿岩具有低 $w(\text{SiO}_2)$ ($48.84\% \sim 52.11\%$), 高 $w(\text{MgO})$ ($5.13\% \sim 6.85\%$) 和 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ($7.45\% \sim 8.60\%$) 的特征; 其 Eu 异常不明显或具有弱的负异常特征 ($\delta\text{Eu} = 0.83 \sim 1.06$), 富集大离子亲石元素 (如 Ba、Sr 和 K), 亏损高场强元素 (如 Zr、Ta、Nb 和 Th)。霍洛台地区辉绿岩受到分离结晶、地壳混染和堆晶作用的影响有限。Nb/Yb-Th/Yb 图解显示霍洛台地区辉绿岩落在俯冲改造的岩石圈地幔起源的原始镁铁质熔体区域, Th/Nb-Ba/Th 和 Th/Yb-Ba/La 图解显示霍洛台地区辉绿岩的岩浆源区被板片流体改造, La/Nb-La/Ba 图解显示霍洛台地区辉绿岩的岩浆源区为岩石圈地幔源区。上述地球化学特征表明霍洛台地区辉绿岩起源于俯冲板片流体交代的岩石圈地幔源区。结合前人研究成果, 认为大兴安岭额尔古纳地块北段霍洛台地区辉绿岩的形成与古太平洋板块的回卷过程密切相关。

关键词: 辉绿岩; 地球化学特征; 构造背景; 锆石 U-Pb 定年; 早白垩世; 霍洛台地区; 额尔古纳地块

中图分类号: P595; P597

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1004–5589.2025.01.002

Zircon U-Pb dating, petrogeochemical characteristics and tectonic setting of diabase in Huoluotai area, northern segment of Erguna Block

SUN Yonggang¹, LI Bile^{2*}, XIE Shixue¹, JIN Huangyu³, LING Shiwei¹, LI Huanji¹

收稿日期/Received: 2024-07-09; 修订日期/Revised: 2024-09-03; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 2024 年度安徽省教育厅高校自然科学重点科研项目 (2024AH051826); 宿州学院 2022 年博士科研启动基金项目 (2022BSK009); 宿州学院 2023 年博士后科研启动基金项目 (2023BSH001)

第一作者: 孙永刚 (1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事矿产勘查和岩石地球化学研究。E-mail: xg429805791@163.com

* 通信作者: 李碧乐 (1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事热液矿床成矿理论及预测研究。E-mail: libl@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China;

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

3. Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun 130102, China

Abstract: To explore the geodynamic mechanisms of the large-scale magmatic activity during Early Cretaceous in Da Hinggan Ling (Mts.), the authors focused on diabase in Huoluotai area in northern segment of Erguna Block, Da Hinggan Ling (Mts.), through the study of petrogeochemical characteristics and zircon U-Pb dating of diabase in Huoluotai area, aimed to determine its formation age, petrogenesis, and tectonic setting. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results show that the weighted average age of diabase in Huoluotai area is (135.1 ± 3.6) Ma, indicating that the crystallization age of diabase is Early Cretaceous. Whole rock geochemical data reveal that diabase in Huoluotai area is characterized by low $w(\text{SiO}_2)$ (48.84%–52.11%), high $w(\text{MgO})$ (5.13%–6.85%) and $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (7.45%–8.60%). The Eu anomaly of diabase is insignificant or exhibits a weak negative anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.83\text{--}1.06$). The diabase is enriched in large ion lithophile elements (such as Ba, Sr, and K), and depleted in high field strength elements (such as Zr, Ta, Nb, and Th). Diabase in Huoluotai area is only minimally influenced by fractional crystallization, crustal contamination, and accumulation processes. The Nb/Yb-Th/Yb diagram shows that diabase in Huoluotai area falls within the area of primitive mafic melts derived from subduction-modified lithospheric mantle. The Th/Nb-Ba/Th and Th/Yb-Ba/La diagrams indicate that the magma source of diabase in Huoluotai area was modified by fluids derived from subducted slabs. The La/Nb-La/Ba diagram reveals that the magma source of diabase in Huoluotai area is from the lithospheric mantle. The above geochemical characteristics indicate that diabase in Huoluotai area originated from a lithospheric mantle source metasomatized by fluids derived from subducted slabs. Combined with previous research, it is concluded that the formation of diabase in Huoluotai area in northern segment of Erguna Block, Da Hinggan Ling (Mts.) is closely related to the rollback process of the Paleo-Pacific Plate.

Keywords: diabase; geochemical characteristics; tectonic setting; zircon U-Pb dating; Early Cretaceous; Huoluotai area; Erguna Block

0 引言

中国东北地区自东向西被牡丹江—依兰缝合带、贺根山—黑河缝合带和新林—喜桂图缝合带分割为佳木斯地块、松辽地块、兴安地块、额尔古纳地块(图1a)。在古生代,东北地区经历了古亚洲洋板块的俯冲及大洋闭合过程;而在中生代,蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系的重叠改造进一步影响了该地区的构造演化,导致岩浆活动频繁且构造演化复杂^[3]。

大兴安岭地区位于中国东北地区的西部,由松辽地块的西部、兴安地块和额尔古纳地块组成,该区中生代岩浆活动的时代^[4]及其形成的地球动力学机制^[5-10]一直是学者们近年来研究的重点,大兴安岭地区中生代岩浆活动可分为3个阶段:中—晚侏罗世(166~158 Ma)、早白垩世早期(145~138 Ma)和早白垩世晚期(133~106 Ma)^[4],但

是,引发大兴安岭地区早白垩世大规模岩浆活动的地球动力学机制还存在争议,主要有以下3种观点:①与地幔柱活动有关^[5-6];②与蒙古—鄂霍茨克洋闭合后引发岩石圈伸展崩塌所形成的地质环境有关^[7-8];③与古太平洋板块的俯冲及其后续影响有关^[9-10]。然而,以上认识多基于对中性酸性岩浆岩的研究,对基性岩浆岩却鲜有提及和关注^[11],由于对大兴安岭地区现有的基性侵入岩同位素测年工作相对偏少,导致对晚中生代基性岩浆活动的认识薄弱,该区晚中生代基性侵入岩形成的构造背景和岩石成因有待进一步明确。因此,笔者通过对大兴安岭额尔古纳地块北段霍洛台地区辉绿岩进行锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学特征研究,揭示霍洛台地区辉绿岩的形成时代、岩石成因和构造背景,以期为大兴安岭地区晚中生代构造岩浆演化的研究提供支持。

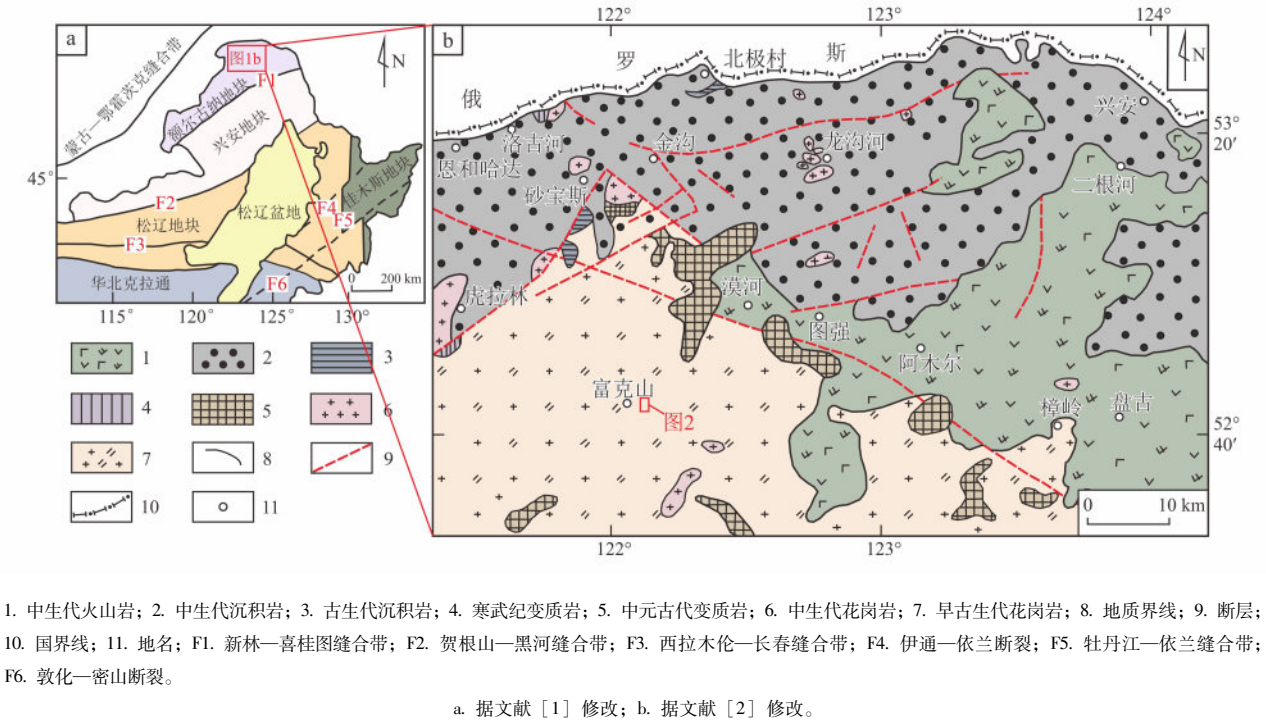


图 1 中国东北地区构造格架图 (a) 和额尔古纳地块北段区域地质图 (b)

Fig. 1 Tectonic framework of Northeast China (a) and regional geological map of northern segment of Erguna Block (b)

1 地质背景与样品特征

额尔古纳地块位于大兴安岭地区的西北部 (图 1a), 呈 NEE 向带状延伸, 长约 1 500 km。西南部与蒙古国的艾伦达地块连接, 西北部延展至俄罗斯的岗仁地块, 东南部则由新林—喜桂图缝合带与兴安地块相隔, 是中国东北地区最靠近蒙古—鄂霍茨克缝合带的地块^[12-13]。额尔古纳地块的北部区域发育有中元古代的兴华渡口群变质岩 (片岩、片麻岩及大理岩)、下寒武统额尔古纳河组变质岩 (大理岩和板岩) 和早古生代花岗岩等基底组成 (图 1b)^[1]。上层主要发育中生代岩浆岩和古-中生代沉积岩 (图 1b)。该区发育 NE 向和 NW 向断裂 (图 1b)。

霍洛台地区位于额尔古纳地块北段 (图 1b), 距漠河市西南约 50 km, 属于漠河市行政区划。该地区地层发育较弱, 主要出露兴华渡口群的兴华组 (图 2), 出露面积较小, 不足 10%。大部分露出体为剥蚀作用的残余体, 主要岩性为斜长角闪片麻岩, 最新地层为第四系全新统。霍洛台地区中生代时期岩浆作用强烈, 侵入岩大量发育, 出露岩株状

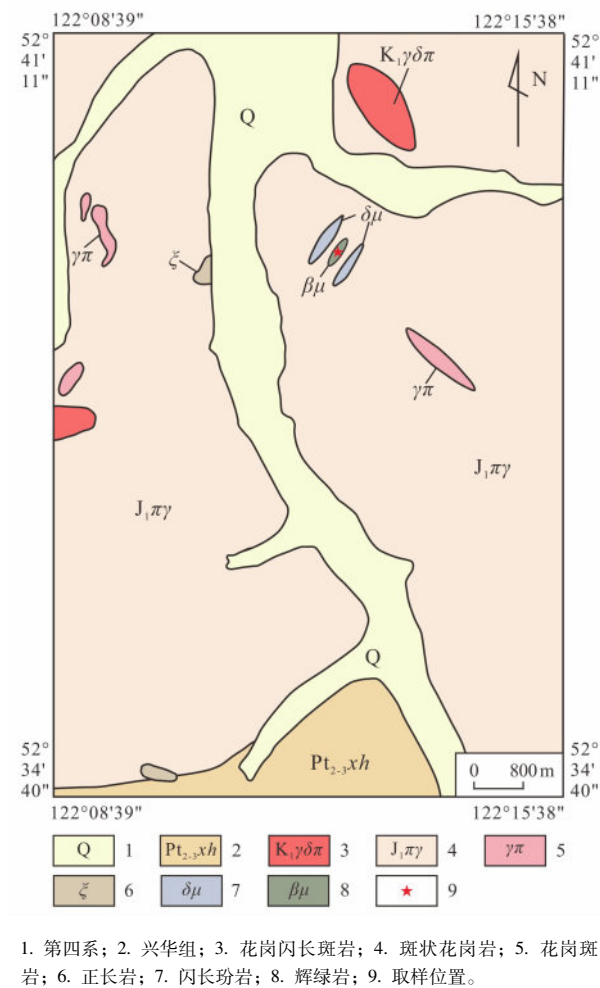
产出的花岗闪长斑岩 ($\gamma\delta\pi$)、花岗斑岩 ($\gamma\pi$)、正长岩 (ξ)、闪长玢岩 ($\delta\mu$) 和辉绿岩 ($\beta\mu$) 等脉岩 (图 2)。

辉绿岩样品 (HLT-b1) 采集于地表, 具辉绿结构, 主要矿物为斜长石和辉石 (图 3)。斜长石体积分数约 75%, 无色, 呈半自形板条状, 粒度 0.15 ~ 0.25 mm, 正低突起, 干涉色一级灰, 多发生绢云母化。辉石体积分数约 25%, 淡绿色, 他形粒状, 粒度 0.1 mm 左右, 正高突起, 干涉色二级蓝绿至橘黄, 普遍发生绿泥石化。

2 测试分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析

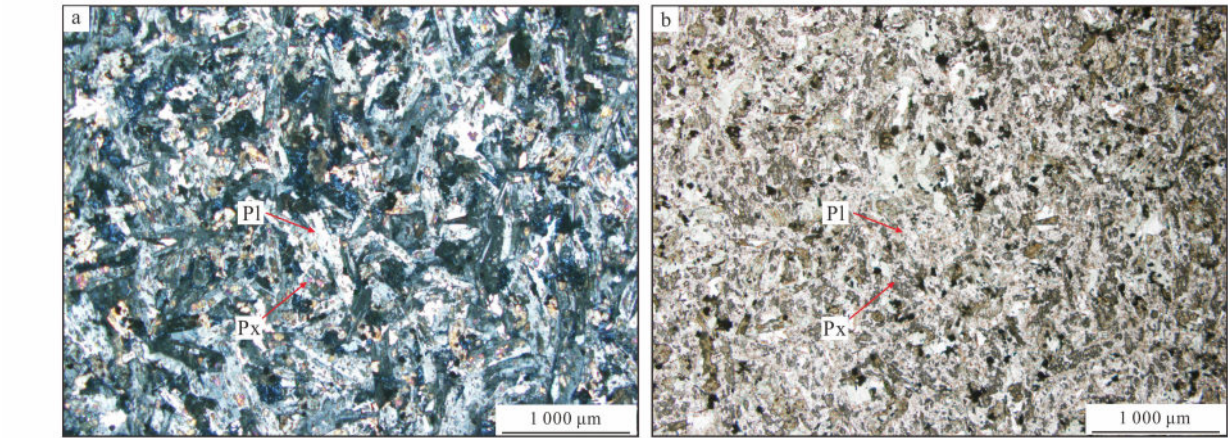
锆石 U-Pb 定年工作是在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室完成, 使用激光剥蚀等离子体质谱分析技术。仪器为美国 Coherent 公司的 Com Pex 102 Excimer Laser, ICP-MS 为 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a 激光剥蚀系统。实验过程中, 以氦气作为剥蚀物质的载气, 采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 数据处理采用 Glitter 程序, 锆石谐和图谱和加权平均年龄计算采



据文献 [14] 修改。

图 2 霍洛台地区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Huoluotai area



PL 斜长石; Px. 辉石; a. 正交偏光; b. 单偏光。

图 3 霍洛台地区辉绿岩微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of diabase in Huoluotai area

用 Isoplot 程序。LA-ICP-MS 分析的详细实验测试流程见文献 [15]。

2.2 全岩主量、微量和稀土元素分析

8 件辉绿岩样品的全岩主量、微量和稀土元素分析均在北京燕都中实测试技术有限公司完成。主量元素的检测使用 X 射线荧光光谱 (Shimadzu XRF-1800) 玻璃熔片法, 该方法能够分析 80 多种元素, 其检测的质量分数范围可以从 10^{-2} 变化到 10^{-6} , 分析精度优于 $\pm 1\%$ 。微量和稀土元素的分析采用电感耦合等离子体质谱法, 采用 BHVO-1、AVG-1 和 G-2 等国际标准物质进行质量监控, 并作空白样进行质量监控, 分析精度优于 $\pm 2\%$ 。详细的实验测试流程见文献 [16]。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 测定结果

对 13 颗锆石进行激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试, 辉绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果详见表 1。由锆石阴极发光图像 (图 4) 观察到锆石呈自形-半自形, 以长柱状为主, 普遍发育震荡环带。辉绿岩样品中锆石的 $w(\text{Th})$ 为 $(45 \sim 710) \times 10^{-6}$, 平均值为 252×10^{-6} ; $w(\text{U})$ 为 $(77 \sim 455) \times 10^{-6}$, 平均值为 243×10^{-6} ; Th/U 比值为 $0.19 \sim 2.05$, 平均值为 1.09, 均大于 0.10, 与典型岩浆锆石的 Th/U 比值特征一致^[17], 表明所测定锆石为岩浆成因。

表 1 霍洛台地区辉绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating analysis results of diabase in Huoluotai area

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
HLT-TW6-1	45	77	0.59	0.051 82	0.002 59	0.178 50	0.008 41	0.025 43	0.000 42	278	114	167	7	162	3
HLT-TW6-2	305	291	1.05	0.053 59	0.001 50	0.182 99	0.005 39	0.024 84	0.000 35	354	63	171	5	158	2
HLT-TW6-3	331	317	1.05	0.050 00	0.001 28	0.170 49	0.004 09	0.024 87	0.000 21	195	59	160	4	158	1
HLT-TW6-4	114	215	0.53	0.048 11	0.002 61	0.168 16	0.009 08	0.025 67	0.000 50	105	128	158	8	163	3
HLT-TW6-5	271	212	1.28	0.050 31	0.001 32	0.170 42	0.004 48	0.024 67	0.000 25	210	61	160	4	157	2
HLT-TW6-6	153	97	1.57	0.050 53	0.002 86	0.139 14	0.007 08	0.020 68	0.000 36	220	131	132	6	132	2
HLT-TW6-7	255	308	0.83	0.049 01	0.001 25	0.163 56	0.004 29	0.024 30	0.000 30	148	60	154	4	155	2
HLT-TW6-8	147	93	1.59	0.050 80	0.002 64	0.144 55	0.007 27	0.020 98	0.000 33	232	120	137	6	134	2
HLT-TW6-9	710	455	1.56	0.050 78	0.001 84	0.152 56	0.005 40	0.021 89	0.000 37	231	83	144	5	140	2
HLT-TW6-10	113	338	0.33	0.050 28	0.001 72	0.191 53	0.006 25	0.027 68	0.000 40	208	79	178	5	176	3
HLT-TW6-11	65	343	0.19	0.050 39	0.001 20	0.199 78	0.004 61	0.028 89	0.000 30	213	55	185	4	184	2
HLT-TW6-12	269	168	1.60	0.049 61	0.002 68	0.139 90	0.007 41	0.020 90	0.000 44	177	126	133	7	133	3
HLT-TW6-13	497	242	2.05	0.050 10	0.002 02	0.146 67	0.005 80	0.021 37	0.000 30	200	94	139	5	136	2

注：辉绿岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试单位为吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室；测试时间为 2018 年 11 月 21 日。

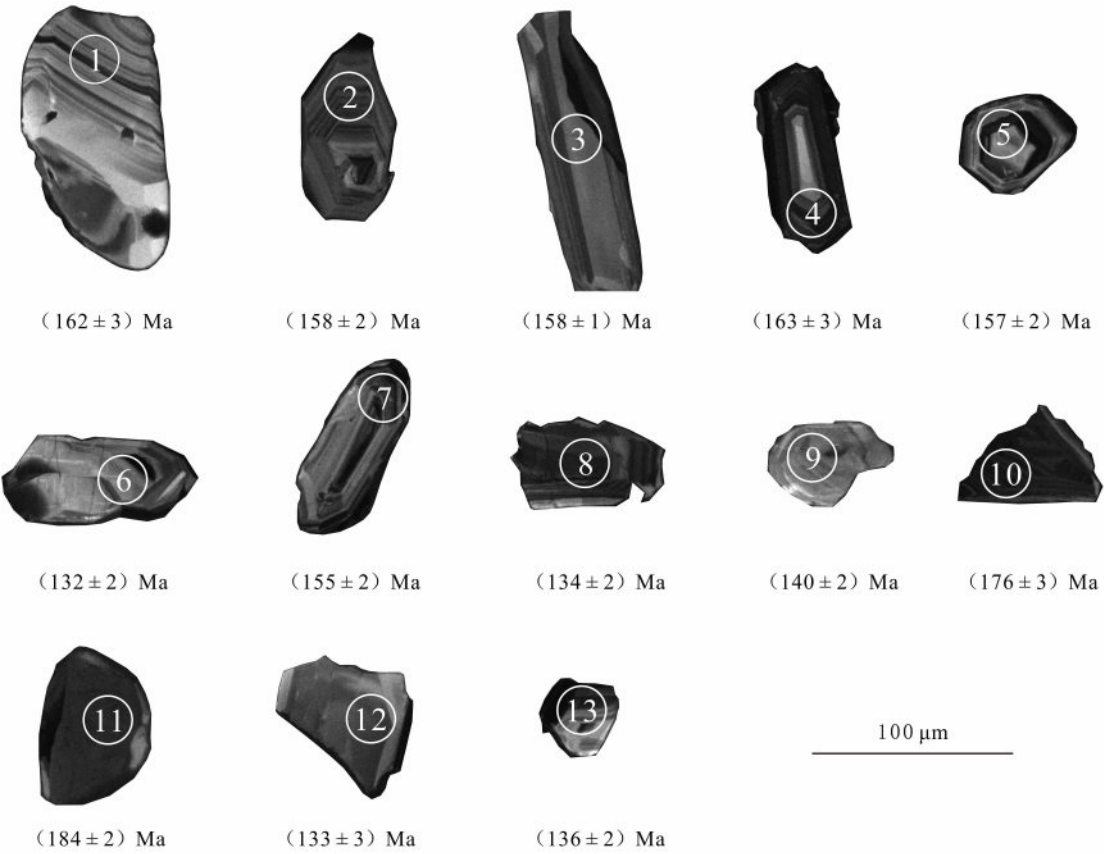


图 4 霍洛台地区辉绿岩锆石 CL 图像（圆圈为 U-Pb 定年位置）

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from diabase in Huoluotai area (circles represent spots for U-Pb dating)

13 个测点的数据均分布在谐和线上或附近, 其中 8 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄较大且分布较为分散 (图 5a), 年龄范围在 184 ~ 155 Ma 之间, 应代表辉绿岩岩浆上侵时所捕获的早期形成的锆石^[18]。5 个测点数据的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中且较小, 变化范围在 140 ~ 132 Ma 之间, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均

年龄为 (135.1 ± 3.6) Ma (MSWD = 1.7, n = 5) (图 5b), 属于早白垩世, 代表了辉绿岩的结晶年龄。

3.2 全岩主量元素

由霍洛台地区辉绿岩样品主量元素的分析结果 (表 2), 可以看出辉绿岩具有低 w (SiO₂), 高

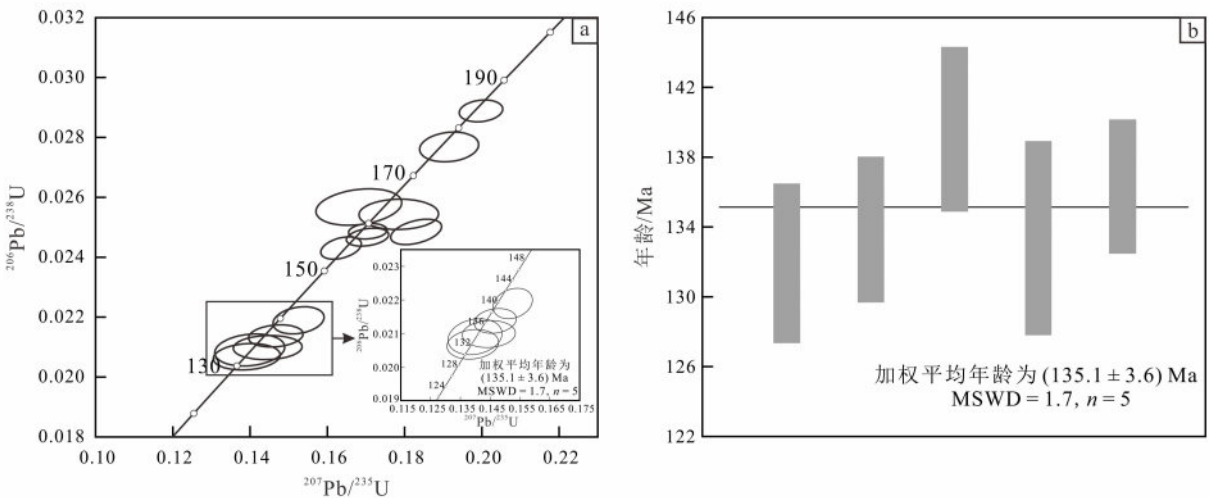


图 5 霍洛台地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和加权平均年龄分布图 (b)
Fig. 5 Zircon U-Pb age concordia diagram (a) and weighted average age distribution diagram (b) of diabase in Huoluotai area

表 2 霍洛台地区辉绿岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Analysis results of major, trace and REE elements of diabase in Huoluotai area

样品号	HLT-YQ1	HLT-YQ2	HLT-YQ3	HLT-YQ4	HLT-YQ5	HLT-YQ6	HLT-YQ7	HLT-YQ8
SiO ₂	48.84	52.11	49.75	50.58	49.60	49.41	50.32	49.73
Al ₂ O ₃	16.06	16.24	15.47	15.27	15.34	15.95	14.91	16.05
Fe ₂ O ₃	8.60	7.54	8.02	7.96	8.29	7.45	7.91	7.67
CaO	5.52	4.60	6.21	5.47	6.19	6.58	6.03	5.74
MgO	6.83	5.13	5.92	6.74	6.68	6.13	6.85	6.24
K ₂ O	1.56	2.97	2.25	2.48	2.16	1.97	2.19	1.48
Na ₂ O	4.63	4.91	4.65	4.25	3.89	4.35	4.44	4.86
TiO ₂	1.01	1.07	1.05	0.98	0.95	0.97	0.96	0.98
P ₂ O ₅	0.29	0.35	0.33	0.30	0.27	0.29	0.29	0.30
MnO	0.14	0.11	0.12	0.13	0.15	0.13	0.14	0.11
LOI	6.06	4.87	5.49	5.82	5.84	6.22	5.31	6.27
Total	99.54	99.89	99.27	99.97	99.36	99.44	99.35	99.43
Li	56.20	32.62	37.90	36.53	31.60	42.61	28.00	51.63
Be	2.42	1.73	1.79	1.67	1.16	2.27	1.05	2.32
Sc	19.52	16.17	16.24	17.65	16.62	18.88	17.21	17.57
Ti	6 384.91	6 756.99	6 768.79	6 114.01	6 011.33	6 073.21	6 017.17	6 198.03
V	189.99	172.04	175.86	174.45	181.57	176.10	173.32	170.00

续表 2
Continued table 2

样品号	HLT-YQ1	HLT-YQ2	HLT-YQ3	HLT-YQ4	HLT-YQ5	HLT-YQ6	HLT-YQ7	HLT-YQ8
Mn	1 235.91	934.95	1 090.60	1 127.38	1 263.06	1 104.57	1 154.34	936.93
Co	46.97	30.25	41.94	41.04	43.43	41.16	43.30	34.98
Ni	152.05	61.41	127.67	125.68	134.15	111.25	144.09	100.48
Cu	59.33	66.84	57.11	62.17	66.32	120.16	59.86	70.02
Zn	91.86	99.84	101.81	96.67	108.06	113.04	100.69	110.60
Ga	21.24	19.81	20.90	18.73	19.79	20.58	19.29	20.77
As	10.41	3.20	4.53	12.97	7.44	5.71	16.49	3.02
Rb	31.38	44.49	26.47	32.47	32.28	34.12	30.52	28.17
Sr	1 101.08	933.69	1 298.03	1 007.24	1 476.80	678.05	978.11	850.95
Y	12.86	12.31	12.26	12.64	11.92	15.67	12.33	12.71
Zr	105.96	127.82	122.89	112.26	98.26	109.53	109.52	113.93
Nb	4.68	5.58	5.27	4.87	4.43	4.84	4.78	5.02
Mo	0.67	0.96	0.81	0.63	6.50	1.67	0.69	0.49
Cd	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.12	0.10	0.08
Cs	1.84	0.92	0.78	1.06	2.34	1.24	1.29	0.73
Ba	657.07	1 140.12	888.12	1 216.39	561.17	730.97	1 020.66	609.24
La	19.12	21.27	21.48	18.46	17.37	18.17	18.50	18.32
Ce	46.74	51.67	48.71	44.84	37.28	44.99	46.02	41.58
Pr	5.14	5.68	5.59	5.10	4.59	5.45	5.14	4.95
Nd	23.48	26.22	25.61	23.13	21.08	25.58	23.89	22.76
Sm	4.56	5.02	5.05	4.56	4.08	5.33	4.59	4.48
Eu	1.43	1.30	1.40	1.32	1.13	1.68	1.32	1.10
Gd	3.47	3.77	3.69	3.46	3.25	4.19	3.49	3.37
Tb	0.56	0.57	0.56	0.55	0.50	0.65	0.54	0.55
Dy	2.70	2.67	2.64	2.63	2.52	3.05	2.60	2.65
Ho	0.50	0.48	0.48	0.49	0.46	0.59	0.49	0.51
Er	1.48	1.43	1.41	1.47	1.37	1.75	1.50	1.52
Tm	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.21	0.17	0.18
Yb	1.34	1.27	1.22	1.27	1.23	1.43	1.30	1.36
Lu	0.18	0.16	0.17	0.18	0.16	0.19	0.17	0.18
Hf	3.09	3.62	3.39	3.20	2.83	3.23	3.19	3.35
Ta	0.23	0.28	0.26	0.22	0.21	0.24	0.22	0.25
W	1.57	0.86	0.63	0.38	0.25	1.45	0.25	2.73
Tl	0.23	0.34	0.26	0.31	0.29	0.31	0.29	0.22
Pb	7.57	9.51	9.58	8.79	12.31	16.58	66.66	15.61
Bi	0.05	0.04	0.04	0.03	0.13	0.15	0.03	0.07
Th	1.27	1.52	1.28	1.36	1.08	1.63	1.33	1.61
U	0.54	0.54	0.46	0.69	0.41	0.59	0.50	0.62
ΣREE	110.87	121.68	118.17	107.63	95.18	113.26	109.72	103.51
LREE	100.47	111.16	107.84	97.41	85.53	101.20	99.46	93.19
HREE	10.4	10.52	10.33	10.22	9.65	12.06	10.26	10.32
LREE/HREE	9.66	10.57	10.44	9.53	8.86	8.39	9.69	9.03
(La/Yb) _N	9.62	11.29	11.87	9.80	9.52	8.57	9.59	9.08
δEu	1.06	0.88	0.95	0.98	0.92	1.05	0.97	0.83

注：主量元素质量分数单位为%，微量和稀土元素质量分数单位为 10⁻⁶；主量、微量和稀土元素测试单位为北京燕都中实测试技术有限公司；测试时间为 2018 年 12 月 14 日。

$w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 的特征, 其中 $w(\text{SiO}_2)$ 为48.84%~52.11%, 平均为50.04%; $w(\text{MgO})$ 为5.13%~6.85%, 平均为6.32%; $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为7.45%~8.60%, 平均为7.93%; $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为6.05%~7.88%, 平均为6.63%; $w(\text{TiO}_2)$ 为0.95%~1.07%, 平均为1.00%。

3.3 全岩微量和稀土元素

霍洛台地区辉绿岩的微量和稀土元素分析结果(表2)显示辉绿岩样品稀土元素总量 ΣREE (不包括Y, 下同)为 $(95.18 \sim 121.68) \times 10^{-6}$, 平

均值为 110.00×10^{-6} , 其中, 轻稀土元素(LREE) = $(85.53 \sim 111.16) \times 10^{-6}$, 重稀土元素(HREE) = $(9.65 \sim 12.06) \times 10^{-6}$, 轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为8.39~10.57, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 8.57 \sim 11.87$ 。霍洛台地区辉绿岩呈“右倾”稀土元素配分模式(图6a), 富集LREE, 亏损HREE, Eu异常不明显或具有弱的负异常特征($\delta\text{Eu} = 0.83 \sim 1.06$)。辉绿岩样品中大离子亲石元素(如Ba、Sr和K)富集, 高场强元素(如Zr、Ta、Nb和Th)表现亏损(图6b)。

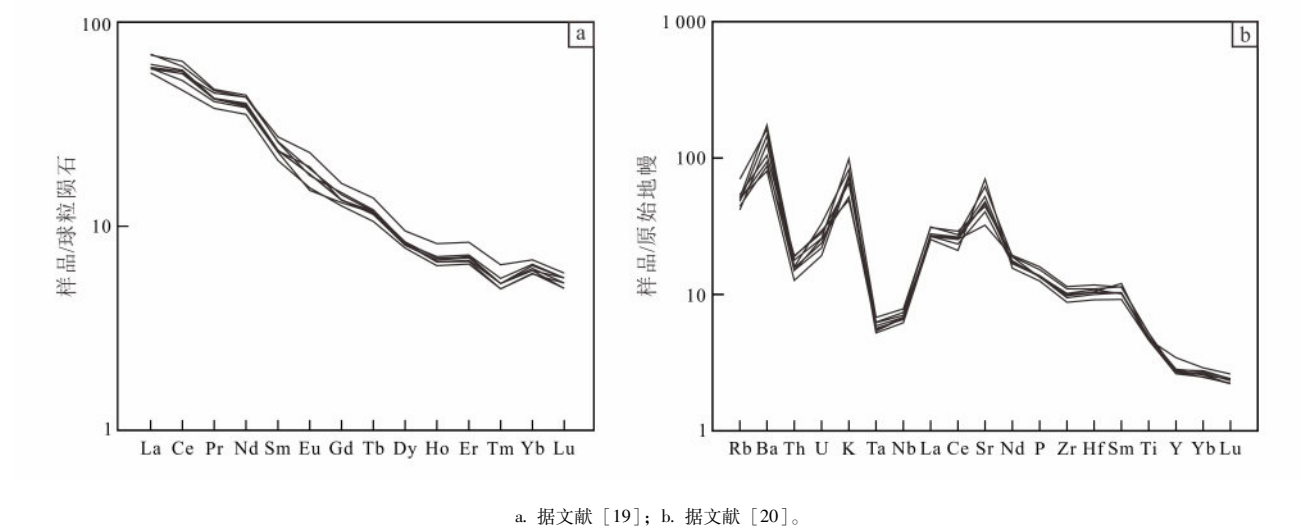


图6 霍洛台地区辉绿岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
Fig. 6 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagrams (b) of diabase in Huoluotai area

4 讨论

4.1 岩石成因

在成岩后期的演化过程中, 高场强元素和重稀土元素可以不受后期热液蚀变改造作用的影响, 因此, 岩浆岩的源区特征可以用不同元素的地球化学特征来讨论^[21]。在稀土元素配分图(图6a)中, 霍洛台地区辉绿岩Eu异常不明显或具有弱的负异常特征($\delta\text{Eu} = 0.83 \sim 1.06$), 说明霍洛台地区岩浆经历了十分有限的分离结晶作用^[22]。通过不同微量元素的比值可以评估地壳混染的程度, 霍洛台地区辉绿岩的Th/Yb的比值为0.88~1.20, 比上地壳(28)和下地壳(4.6)的值低很多^[23], 说明其受到地壳物质混染的程度有限。还有以下2种证据也表明霍洛台地区辉绿岩受到地壳物质混染的

程度有限: ①Th是一种非常稳定的元素, 但是容易受地壳混染影响, 而霍洛台地区辉绿岩中Th值极低; ②高比例壳源物质的加入导致岩石 $w(\text{SiO}_2)$ 升高, 而霍洛台地区辉绿岩中 $w(\text{SiO}_2)$ (平均为50.04%) 在基性岩的正常值范围内(45%~53%)^[24]。辉绿岩不发育堆晶层理, 在显微镜下也未观察到典型的堆晶结构(图3)^[16]。综上所述, 分离结晶、地壳混染和堆晶作用对霍洛台地区辉绿岩的形成影响较小。

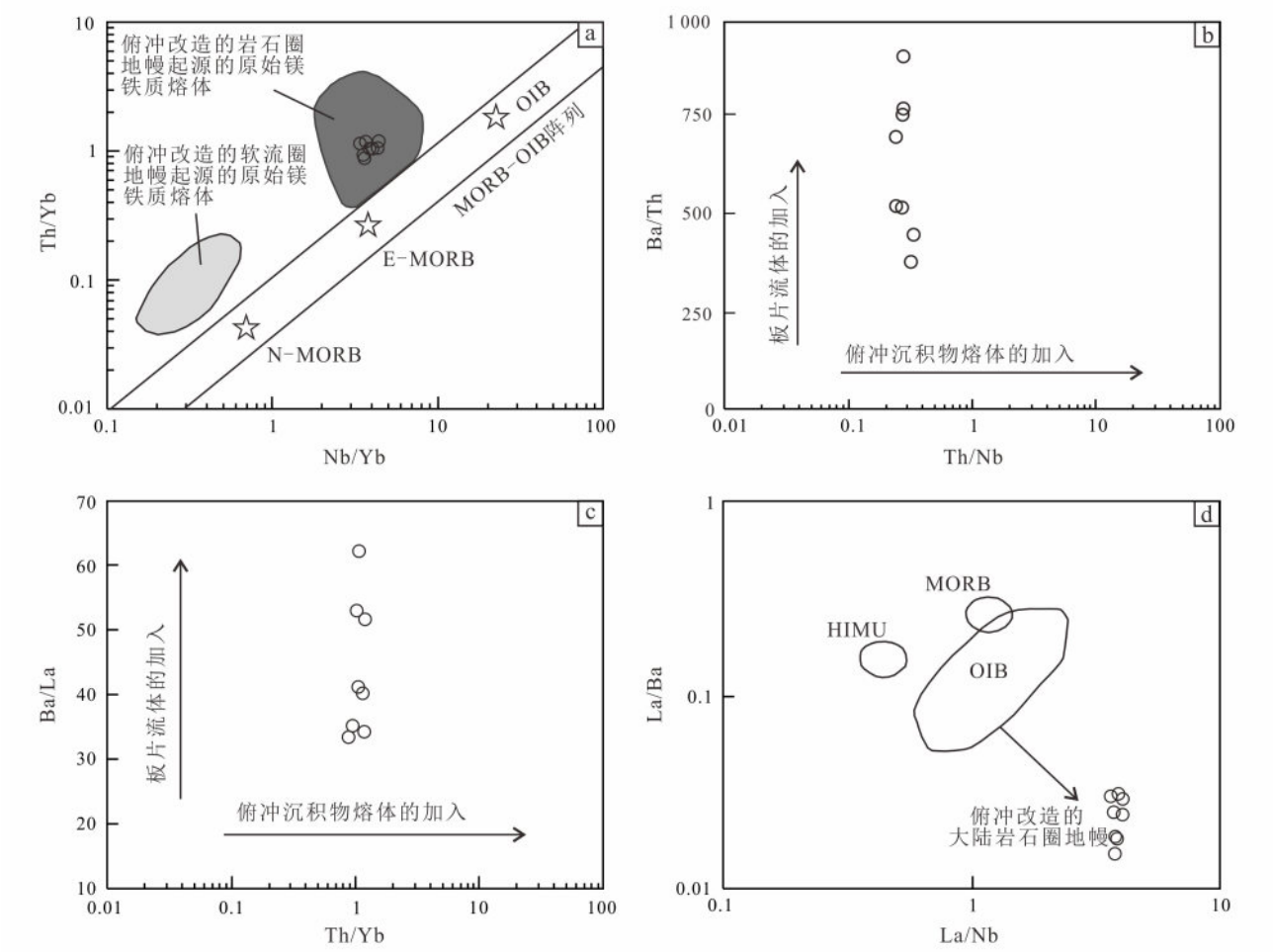
在 $(\text{Nb}/\text{Yb}) - (\text{Th}/\text{Yb})$ 图解(图7a)中, 霍洛台地区的辉绿岩样品全部位于MORB-OIB阵列之上, 落在俯冲改造的岩石圈地幔起源的原始镁铁质熔体区域, 这表明其源区经历了俯冲交代作用^[16]。俯冲沉积物熔体和板片流体可以用Th/Nb、Ba/Th、Th/Yb和Ba/La的比值进行识别。(Th/

Nb) - (Ba/Th) 和 (Th/Yb) - (Ba/La) 图解 (图 7b、c) 表明, 霍洛台地区辉绿岩样品的源区经历了板片流体的改造。(La/Nb) - (La/Ba) 图解 (图 7d) 显示辉绿岩样品向俯冲改造的大陆岩石圈地幔区域靠拢, 表明其岩浆源区为岩石圈地幔源区^[29]。笔者认为霍洛台地区辉绿岩起源于俯冲板片流体交代的岩石圈地幔源区。

4.2 构造背景

对于大兴安岭地区中生代发生大规模岩浆活动的地球动力学机制的研究, 最早的观点认为是由地幔柱活动所形成的^[5-6]。在后续的研究中, 发现大兴安岭地区并不存在环状火山岩带, 但地幔柱活动形成的岩浆岩具有环形分布的特征^[30], 因此大兴

安岭地区中生代发生的大规模岩浆活动很难用地幔柱活动来解释。近年来, 随着学者们对大兴安岭地区中生代地球动力学机制研究程度的提高, 提出了蒙古—鄂霍茨克洋闭合后岩石圈伸展垮塌所形成的伸展环境这一观点, 用来解释大兴安岭地区中生代发生的大规模岩浆活动^[31-32]。由于西伯利亚板块相对于中朝—蒙古板块的顺时针旋转, 蒙古—鄂霍茨克洋从西向东以剪刀式顺时针闭合^[33], 因此形成了蒙古—鄂霍茨克缝合带。随着蒙古—鄂霍茨克洋的闭合, 其两侧板块发生碰撞, 导致缝合带附近的地壳经历了明显的缩短和增厚^[34], 随后发生多期加厚陆壳的坍塌、拆沉后形成的伸展环境, 使蒙古—鄂霍茨克缝合带附近发生强烈的岩浆活动^[35]。



a. 据文献 [25-26]; b、c. 据文献 [27]; d. 据文献 [28]。

图 7 霍洛台地区辉绿岩 (Nb/Yb) - (Th/Yb) (a)、(Th/Nb) - (Ba/Th) (b)、(Th/Yb) - (Ba/La) (c) 和 (La/Nb) - (La/Ba) (d) 图解

Fig. 7 (Nb/Yb) - (Th/Yb) (a), (Th/Nb) - (Ba/Th) (b), (Th/Yb) - (Ba/La) (c), and (La/Nb) - (La/Ba) (d) diagrams of diabase in Huoluotai area

然而, 大兴安岭地区的晚中生代岩浆岩主要呈现出 NNE 向的分布, 而蒙古—鄂霍茨克缝合带则以 NE 向的展布为主, 这种展布模式与蒙古—鄂霍茨克洋闭合后, 岩石圈因伸展和垮塌而形成的扩展环境有所不同。

结合前人研究成果, 笔者认为, 大兴安岭地区的中生代岩浆活动规模庞大, 可能与古太平洋构造体系密切相关。中生代时期, 古太平洋板块由伊泽奈崎板块、法拉隆板块、菲尼克斯板块和太平洋板块组成, 其中伊泽奈崎板块的俯冲对中国东北地区晚中生代的构造演化起到了关键作用^[36]。在中国东北地区的侏罗纪增生杂岩中, 存在伊泽奈崎板块无震洋脊/大洋高原残片的俯冲记录, 这表明侏罗纪时期伊泽奈崎板块曾平板俯冲于东北地区陆缘之下^[37]。海拉尔—塔木察格盆地中发现的晚侏罗世早期低钾埃达克质岩石, 也进一步显示伊泽奈崎板

块持续平板俯冲至大兴安岭之下^[38]。由于蒙古—鄂霍茨克洋的闭合, 额尔古纳地块经历了显著的地壳增厚, 当伊泽奈崎板块平板俯冲到具有较厚岩石圈的额尔古纳地块时, 随着俯冲板片俯冲深度的增加, 导致原先轻浮的俯冲板片发生榴辉岩化反应, 进而引起俯冲板片密度的增大, 俯冲板片的平板部分因较重不再稳定, 与上覆地幔楔发生脱耦, 引发俯冲板片发生回卷。在伊泽奈崎板块回卷过程中, 深部较热的软流圈地幔物质开始上涌、交代并加热上覆地幔, 使其发生部分熔融, 由此东北地区形成了大面积的早白垩世岩浆岩^[37]。笔者认为大兴安岭额尔古纳地块在早白垩世期间的岩浆活动 (包括霍洛台地区辉绿岩的生成) 与古太平洋 (伊泽奈崎) 板块经历平板俯冲后的回卷过程密切相关 (图 8)。

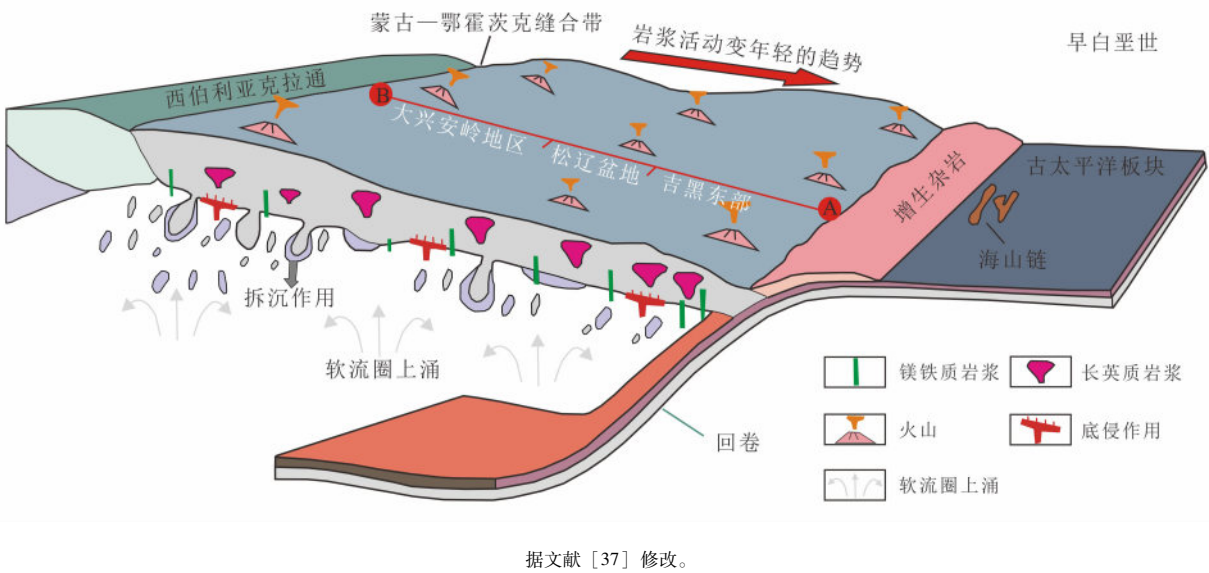


图 8 中国东北地区早白垩世地球动力学演化模式图

Fig. 8 Early Cretaceous geodynamic evolution model in Northeast China

5 结论

- (1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示霍洛台地区辉绿岩的加权平均年龄为 (135.1 ± 3.6) Ma, 代表辉绿岩的结晶年龄为早白垩世。
- (2) 霍洛台地区辉绿岩具有低 $w(\text{SiO}_2)$, 高 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 的特征, 岩石样品整体表现“右倾”的稀土元素分布模式, Eu 异常不明

- 显或具有弱的负异常特征 ($\delta\text{Eu} = 0.83 \sim 1.06$), 大离子亲石元素 (Ba、Sr 和 K 等) 富集, 高场强元素 (Zr、Ta、Nb 和 Th 等) 亏损。辉绿岩在形成过程中, 分离结晶、地壳混染和堆晶作用并不显著, 表明其起源于受俯冲板片流体交代的岩石圈地幔源区。
- (3) 根据霍洛台地区辉绿岩的地球化学特征, 认为辉绿岩形成于伸展环境, 与古太平洋 (伊泽

奈崎) 板块回卷有关。

参考文献:

- [1] 孙永刚, 李碧乐, 王聚胜, 等. 吉林中部江密峰花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学特征 [J]. 世界地质, 2019, 38 (4): 931-943.
SUN Y G, LI B L, WANG J S, et al. Zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry of Jiangmifeng granodiorite in central Jilin Province [J]. Global Geology, 2019, 38 (4): 931-943.
- [2] 巩鑫, 赵元艺, 水新芳, 等. 上黑龙江盆地虎拉林早白垩世岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素及地球化学特征研究 [J]. 地质学报, 2020, 94 (2): 553-572.
GONG X, ZHAO Y Y, SHUI X F, et al. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry studies of the Early Cretaceous rock mass in the Hulalin of Upper Heilongjiang Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94 (2): 553-572.
- [3] 吴华英, 张连昌, 周新华, 等. 大兴安岭中段晚中生代安山岩年代学和地球化学特征及成因分析 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (6): 1339-1352.
WU H Y, ZHANG L C, ZHOU X H, et al. Geochronology and geochemical characteristics of Late Mesozoic andesites in the central Da-Hinggan Mountains, and its genesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (6): 1339-1352.
- [4] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (2): 339-353.
XU W L, WANG F, PEI F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (2): 339-353.
- [5] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义 [J]. 地质科学, 1998, 33 (2): 129-139.
LIN Q, GE W C, SUN D Y, et al. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33 (2): 129-139.
- [6] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究 [J]. 地球科学, 2000, 25 (2): 172-178.
GE W C, LIN Q, SUN D Y, et al. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling [J]. Earth Science, 2000, 25 (2): 172-178.
- [7] 张玉涛, 张连昌, 莫基丰, 等. 大兴安岭北部扎兰屯脉岩群的地球化学特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (11): 2733-2742.
ZHANG Y T, ZHANG L C, YING J F, et al. Geochemistry of Zhalantun dyke swarm in north Da Hinggan Mountain and its geological implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (11): 2733-2742.
- [8] 张连昌, 陈志广, 周新华, 等. 大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学制约 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (11): 2823-2835.
ZHANG L C, CHEN Z G, ZHOU X H, et al. Characteristics of deep sources and tectonic-magmatic evolution of the Early Cretaceous volcanics in Genhe area, Da Hinggan Mountains: constraints of Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistries [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (11): 2823-2835.
- [9] DONG Y, GE W C, YANG H, et al. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous volcanic rocks from the Baiyingaolao Formation in the central Great Xing'an Range, NE China, and its tectonic implications [J]. Lithos, 2014, 205: 168-184.
- [10] YANG W B, NIU H C, CHENG L R, et al. Geochronology, geochemistry and geodynamic implications of the Late Mesozoic volcanic rocks in the southern Great Xing'an Mountains, NE China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 454-470.
- [11] 王强. 大兴安岭科右中旗地区中基性侵入岩 (脉) 年代学、地球化学及构造背景 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
WANG Q. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of intermediate-basic intrusive rock (vein) in Keyouzhongqi area of Great Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [12] 孙永刚. 大兴安岭北段晚侏罗世斑岩型铜 (钼) 矿床成矿作用及找矿方向研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
SUN Y G. Study on metallogenesis and prospecting direction of Late Jurassic porphyry Cu (Mo) deposits in the northern segment of the Great Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [13] 兰丽雪. 大兴安岭中段早白垩世花岗岩的地球化学特征及岩石成因 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
LAN L X. Geochemical characteristics and petrogenesis

- of Early Cretaceous granites in central Great Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [14] 孟凡波. 大兴安岭北段霍洛台地区闪长玢岩的成因机制 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32 (1): 13-19, 26.
- MENG F B. Petrogenesis of diorite porphyrite in Huoluotai area of northern Great Xing'an Range [J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2022, 32 (1): 13-19, 26.
- [15] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3): 353-370.
- [16] 孙永刚, 李碧乐, 王永胜, 等. 吉林中部敖花村角闪辉长岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和岩石地球化学特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40 (2): 257-268.
- SUN Y G, LI B L, WANG Y S, et al. Zircon U-Pb dating, Hf isotopic and geochemical characteristics of the hornblende gabbro in Aohua Village, central Jilin Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40 (2): 257-268.
- [17] WU Y B, ZHENG Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (15): 1554-1569.
- [18] 岳悦, 孙德有, 侯可军, 等. 柴北缘乌兰北部三叠纪辉长岩的年代学和地球化学特征 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2021, 51 (1): 154-168.
- YUE Y, SUN D Y, HOU K J, et al. Geochronology and geochemistry of Triassic gabbro in northern Wulan, northern margin of Qaidam Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51 (1): 154-168.
- [19] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- [20] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42 (1): 313-345.
- [21] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19 (2): 290-300.
- [22] 任飞, 尹福光, 彭智敏, 等. 班公湖—怒江俯冲增生杂岩带东段晚古生代辉绿岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造意义 [J]. 地学前缘, 2022, 29 (2): 164-179.
- REN F, YIN F G, PENG Z M, et al. Late-Paleozoic diabase from the eastern part of the Bangong Lake-Nujiang subduction belt: U-Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological characteristics [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29 (2): 164-179.
- [23] WILSON M. Igneous petrogenesis [M]. London: Unwin Hywin Press, 1989: 295-323.
- [24] 韩欢欢, 王加昇, 钟军伟, 等. 滇东南富宁那坪辉绿岩斜锆石 U-Pb 年代学、地球化学、Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46 (4): 773-787.
- HAN H H, WANG J S, ZHONG J W, et al. Baddeleyite U-Pb geochronology, geochemistry, Hf isotopic characteristics and their geological implications for Naping diabase in Funing, Southeast Yunnan Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46 (4): 773-787.
- [25] PEARCE J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. Lithos, 2008, 100 (1/4): 14-48.
- [26] LEAT P T, RILEY T R, WAREHAM C D, et al. Tectonic setting of primitive magmas in volcanic arcs: an example from the Antarctic Peninsula [J]. Journal of the Geological Society, 2002, 159 (1): 31-44.
- [27] HANYU T, TATSUMI Y, NAKAI S, et al. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: constraints from geochemistry [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7 (8): 1-29.
- [28] SAUNDERS A D, STOREY M, KENT R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interactions [J]. Geological Society London Special Publications, 1992, 68 (1): 41-60.
- [29] 王越, 曹花花, 赵淑娟, 等. 北秦岭东段二郎坪单元辉长岩成因及其构造意义: 来自锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的制约 [J]. 世界地质, 2024, 43 (2): 153-170.
- WANG Y, CAO H H, ZHAO S J, et al. Petrogenesis and tectonic significance of gabbros from Erlangping unit in eastern segment of North Qinling: constrained by zircons U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. World Geology, 2024, 43 (2): 153-170.

- [30] 李滢先, 赵庆英, 邱士龙, 等. 大兴安岭北段吉源地区白音高老组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征 [J]. 世界地质, 2019, 38 (1): 108-118.
LI S X, ZHAO Q Y, QIU S L, et al. Zircon U-Pb and geochemical characteristics of rhyolites in Baiyngaolao Formation from Jiyuan area in northern Da Hinggan Mountains [J]. Global Geology, 2019, 38 (1): 108-118.
- [31] 杨海星, 赵胜金, 柳志辉, 等. 大兴安岭中南段满克头鄂博组正层型剖面火山岩年代学及地球化学特征 [J]. 世界地质, 2023, 42 (2): 213-229.
YANG H X, ZHAO S J, LIU Z H, et al. Geochronological and geochemical characteristics of orthostratigraphic section volcanic rocks of Manketouebo Formation in south-central sector of Great Xing'an Range [J]. World Geology, 2023, 42 (2): 213-229.
- [32] 于喜洹, 李新鹏, 李中会, 等. 大兴安岭北段高地林场满克头鄂博组火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 世界地质, 2022, 41 (1): 15-25.
YU X H, LI X P, LI Z H, et al. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks of Manketouebo Formation in Gaodi forest farm, northern Great Xing'an Range, and their tectonic implications [J]. World Geology, 2022, 41 (1): 15-25.
- [33] XU W L, PEI F P, WANG F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China; constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 74: 167-193.
- [34] 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): 56-66.
LI Y, DING L L, XU W L, et al. Geochronology and geochemistry of muscovite granite in Sunwu area, NE China: implications for the timing of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31 (1): 56-66.
- [35] 唐杰. 额尔古纳地块中生代火成岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克缝合带构造演化的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
TANG J. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic igneous rocks in the Erguna Massif, NE China: constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk suture zone [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [36] 井佳浩. 大兴安岭北段图里河地区上库力组火山岩的年代学与地球化学研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
JING J H. Geochronological and geochemical characteristics of volcanic rocks from Shangkuli Formation in Tulihe Region, northern Great Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [37] 纪政. 海拉尔-塔木察格盆地中生代火山岩年代学与地球化学研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
JI Z. Geochronological and geochemical studies of the Mesozoic volcanic rocks in the Hailar-Tamtsag Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [38] JI Z, MENG Q A, WAN C B, et al. Early Cretaceous adakitic lavas and A-type rhyolites in the Songliao Basin, NE China: implications for the mechanism of lithospheric extension [J]. Gondwana Research, 2019, 71: 28-48.