

文章编号: 1004—5589 (2011) 04—0508—13

张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因： 年代学与地球化学证据

唐杰，许文良，王枫，高福红，曹花花

吉林大学 地球科学学院，长春 130061

摘要：对张广才岭中生代帽儿山组火山岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学研究，确定其时代及形成的构造背景。研究区内两个代表性火山岩中的锆石均呈自形-半自形晶，显示出典型的岩浆生长环带或条痕状吸收，结合其高的 Th/U 比值 (0.40 ~ 2.08)，暗示其岩浆成因。测年结果表明，研究区内所讨论的火山岩为早侏罗世 (179 ~ 184 Ma) 岩浆喷发的产物，而非前人认为的晚侏罗世；此外，帽儿山组火山岩具双峰式组合的特点，粗面岩与粗面安山岩以富碱、高钾、高度富集大离子亲石元素和轻稀土元素为特征，而流纹岩显示 A 型流纹岩特点。小兴安岭—张广才岭早侏罗世双峰式火成岩的存在，揭示该区早侏罗世处于一种强烈的伸展环境。结合区域该时期火成岩的空间展布特征，帽儿山组双峰式火山岩的形成应与太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用相联系，形成于类似弧后盆地的伸展环境。

关键词：张广才岭；帽儿山组；双峰式火山岩；锆石 U-Pb 年代学；地球化学；构造背景

中图分类号：P597；P595 **文献标识码：**A **doi：**10.3969/j.issn.1004-5589.2011.04.002

Petrogenesis of bimodal volcanic rocks from Maoershan Formation in Zhangguangcai Range: evidence from geochronology and geochemistry

TANG Jie, XU Wen-liang, WANG Feng, GAO Fu-hong, CAO Hua-hua

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

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical data of the volcanic rocks from Mesozoic Maoershan Formation in Zhangguangcai Range were obtained for to constraining their formation time and the regional tectonic background. Zircons from two representative volcanic rocks are euhedral-subhedral in shape and display striped absorption or oscillatory zoning in CL images with high Th/U ratios (0.40 ~ 2.08), implying their magmatic origin. The dating results indicate that the volcanic rocks from Maoershan Formation were formed in the Early Jurassic (179 ~ 184 Ma) which is older than the previously believed Late Jurassic. The volcanic rocks from the Maoershan Formation display a bimodal volcanic rock association based on their petrographic and geochemical data. The trachyte and trachyandesite are characterized by high alkali (especially K_2O), enrichment in large ion lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE) in contents, whereas the rhyolites are chemically similar to the A-type rhyolite. The bimodal volcanic rock association in Lesser Xing'an Range and Zhangguangcai Range in the studied areas implies an intense extensional environment. Combined with the spacial compositional variation of

收稿日期: 2011-08-15; 改回日期: 2011-10-09

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212010070301, 1212011085476) 与国家自然科学基金资助项目 (41072038) 联合资助。

通讯作者: 许文良 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩及地球化学研究. E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

the Early Jurassic igneous rocks, it is suggested that the volcanic rocks from Maoershan Formation were formed under an extensional environment similar to back-arc basin which could be related to subduction of the Paleo-Pacific plate (Izanagi) beneath the Eurasian continent.

Key words: Zhangguangcai Range; Maoershan Formation; bimodal volcanic rocks; zircon U-Pb chronology; geochemistry; tectonic setting

0 引言

兴蒙造山带东段的大兴安岭及其邻区, 晚古生代至早中生代经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍次克洋的闭合及区内多块体拼贴的过程^[1-2]。中生代又叠加了环太平洋构造体系的改造^[3]。晚中生代进入造山后作用阶段, 火山喷发活动及盆岭构造极为发育^[4], 中生代火山岩出露广泛, 岩石类型复杂, 是东亚大陆边缘中生代巨型火山岩带的重要组成部分。近年来对研究区内花岗岩的研究比较充分^[5-8], 相对侵入岩来说对火山岩的研究较少。由于以往对含火山岩地层形成时代的确定主要是通过岩石对比, 或由于同位素测年方法的限制, 目前对于帽儿山组的年代仍存在争议: 在宾县、五常县幅 1:20 万区域地质调查报告中将其并入太安屯组, 归入中侏罗统^[9], 而《东北区区域地层》^[10] 将其归入上侏罗统; 此外, 因缺乏详细的年代学和岩石地球化学分析数据, 对帽儿山组火山岩形成的构造背景讨论很少。针对这些问题, 笔者对滨东地区中生代帽儿山组火山岩进行了岩石地球化学及年代学的研究, 以便揭示区内帽儿山组火山岩的形成时代及构造背景。

1 区域地质背景与样品描述

1.1 区域地质背景

研究区位于松辽盆地以东, 佳木斯地块、兴凯地块以西, 佳伊断裂以北的张广才岭的滨东地区, 大地构造位置归属于小兴安岭—松嫩地块滨东隆起带上(图1)。

研究区出露地层包括上元古界至新生界。上元古界张广才岭群分布于滨东地区东部一面坡隆起的北部。古生界分布零星, 但有一定规律, 由东向西地层时代由老至新。中生界以火山岩为主, 大面积分布于滨东隆起带中部火山洼地中, 总体呈北东向分布^[11]。研究区侵入岩发育, 主要为侏罗系花岗岩, 并有少量早古生代花岗岩^[12, 13]和晚古生代花

岗岩^[8]。研究区火山岩分布相对较少, 本文研究的火山岩为分布在巴彦地区的帽儿山组, 该组底部不整合覆盖于太安屯组之上, 上为板子房组不整合覆盖。帽儿山组厚度 > 1 517 m^[10]。区域构造以 NE 向复背斜为格架, 上叠中生代火山-沉积盆地, 断裂以 NE、NW 向两组为主^[14]。

1.2 样品描述

《东北区区域地层》^[10] 中记载帽儿山组主要由中酸性火山岩组成, 但通过野外观察认为帽儿山组为一套基性-中性-酸性的火山岩组合。其具代表性的火山岩特征为:

样品 HYL3 采自范宽店南 2.5 km 处 (127°36′54.2″E, 46°06′54.4″N), 为流纹岩 (HYL3-1、HYL3-3), 风化面为褐色, 新鲜面为灰黑色, 流纹构造, 斑状结构, 斑晶为碱性长石、斜长石、石英及少量黑云母, 基质具有霏细结构。样品 HYL2 采自太平桥村南 4 km 处 (127°39′28.0″E, 46°11′55.1″N), 为粗面岩 (HYL2-2) 及粗面安山岩 (HYL2-4、HYL2-6), 风化面为黄褐色, 新鲜面为灰黑色, 块状构造, 斑状结构, 斑晶主要为碱性长石和斜长石, 基质为隐晶质; 样品 11HYL3 (11HYL3-2, 11HYL3-3) 采自太平桥村南约 3.8 km 处 (127°39′30.4″E, 46°11′55.2″N), 为玄武安山岩, 风化面为土黄色, 新鲜面为灰黑色, 块状构造, 斑状结构, 斑晶主要为斜长石, 并含少量的钾长石及角闪石, 基质为隐晶质 (图2)。

2 分析方法

本文样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 Agilent 7500a ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行, 详细的实验原理和流程见文献 [15]。应用标准锆石 91500 进行分馏校正, 标准锆石 TEMORA 1 作为未知样品测定获得的年龄为 415 ± 4 Ma (MSWD = 0.112, n = 24), 该锆石的 ID-TIMS 年龄为 416.75 ± 0.24 Ma^[16]。激光束的束

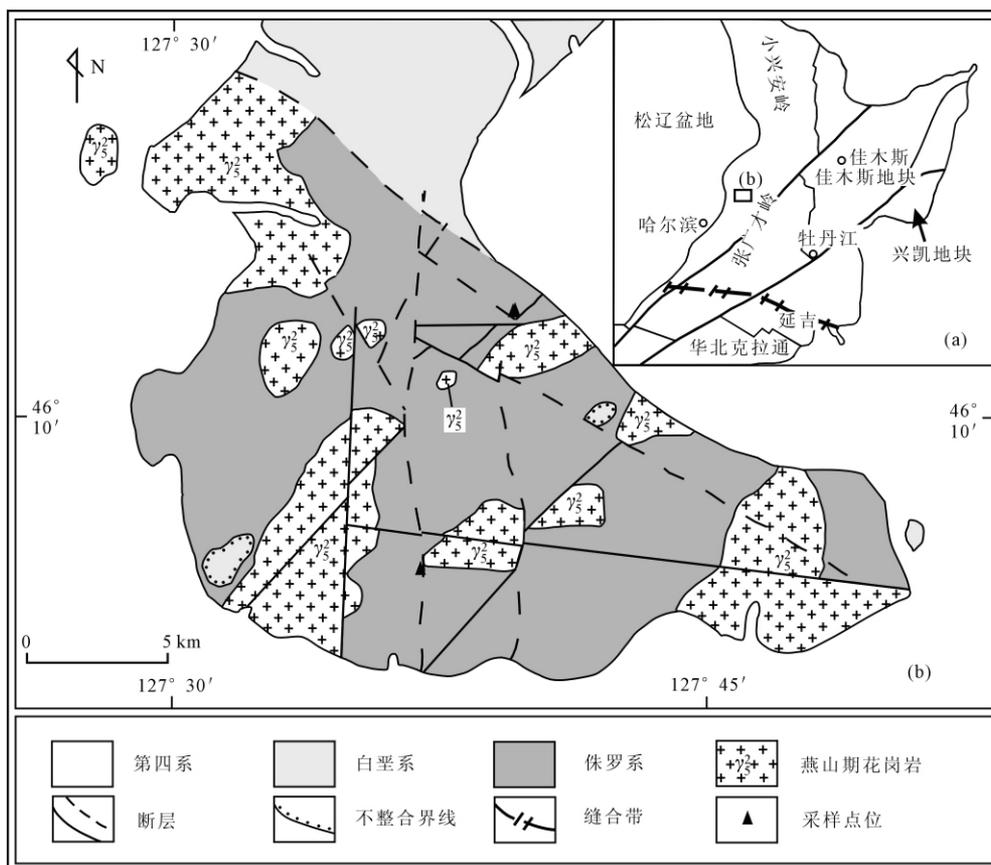


图1 研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the studied area

斑为 $30\ \mu\text{m}$ 。实验获得的数据采用 Andersen^[17] 的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响,用 ISOPLOT 宏程序进行年龄谱和图的生成和处理^[18]。

主量元素和痕量元素分析分别在贵阳地球化学研究所和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。主量元素采用 X-荧光光谱法(XRF)分析;痕量元素的分析则采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析方法。对国际标样 BCR-2(玄武岩)、BHVO-1(玄武岩)和 AGV-1(安山岩)的分析结果表明,主量元素分析精度和准确度优于 5%,痕量元素的分析精度和准确度优于 10%。

锆石 Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行,仪器的运行条件和详细的分析流程见文献

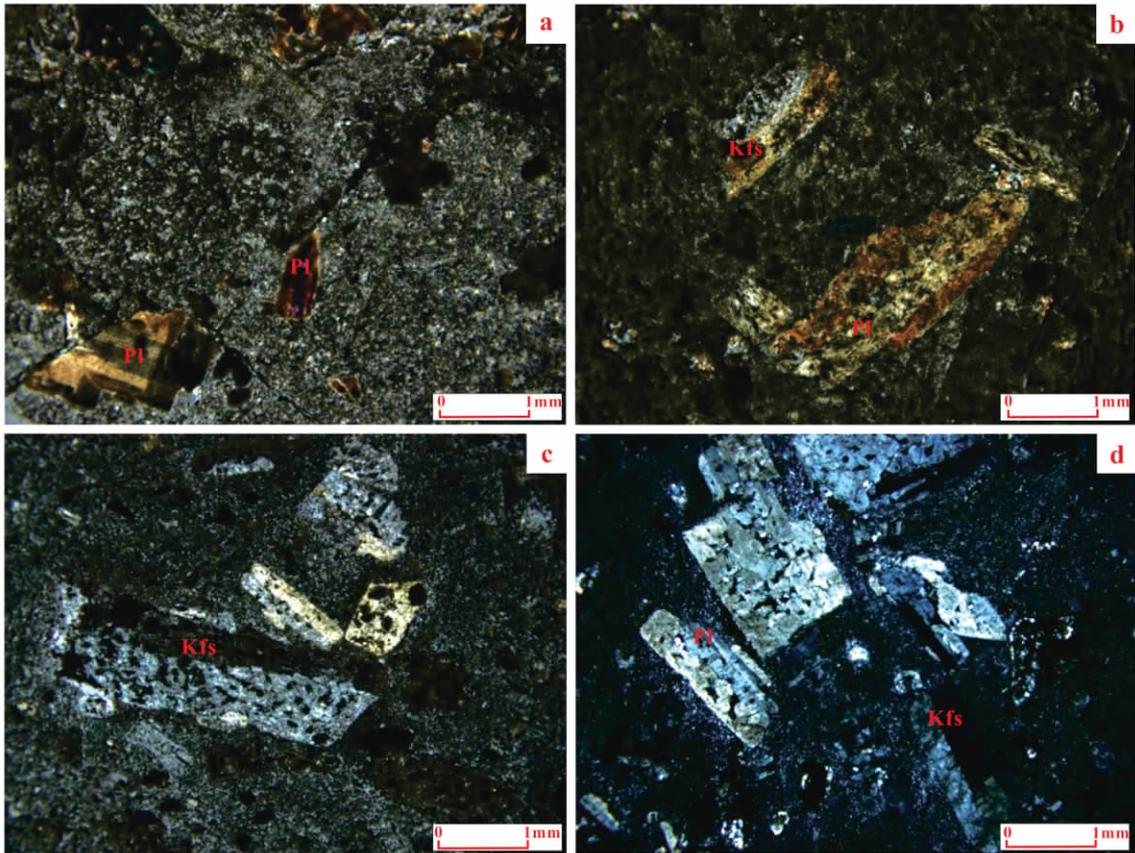
[19]。测定时用锆石国际标样 91500 作外标,分析时激光束直径为 $63\ \mu\text{m}$,所用的激光脉冲速率为 6~8 Hz,激光束脉冲能量为 100 mJ。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

滨东地区帽儿山组两个火山岩样品中锆石粒度变化较大($48\sim 220\ \mu\text{m}$),其阴极发光(CL)图像显示,内部结构复杂,既有发育振荡生长环带的粒状或短柱状锆石,也有具条痕状吸收特点的板状或短柱状锆石,还有少量锆石不发光(图3),但它们均具有高的 Th/U 比值(0.40~2.08),暗示其岩浆成因^[20]。

粗面安山岩(HYL2-1)共进行了 29 个锆石颗粒的测定,其中 15 个锆石的测试结果位于谐和线上及附近,定年结果显示 15 个测点锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值为 $182\pm 4\sim 174\pm 5\ \text{Ma}$ (表1),其加权



a. HYL3-3 流纹岩 (+); b. HYL2-4 粗面安山岩 (+); c. HYL2-6 粗面安山岩 (+); d. 11HYL3-3 玄武安山岩 (+)

图 2 帽儿山组火山岩显微结构特征

Fig. 2 Petrography of representative volcanic rocks from Maershan Formation

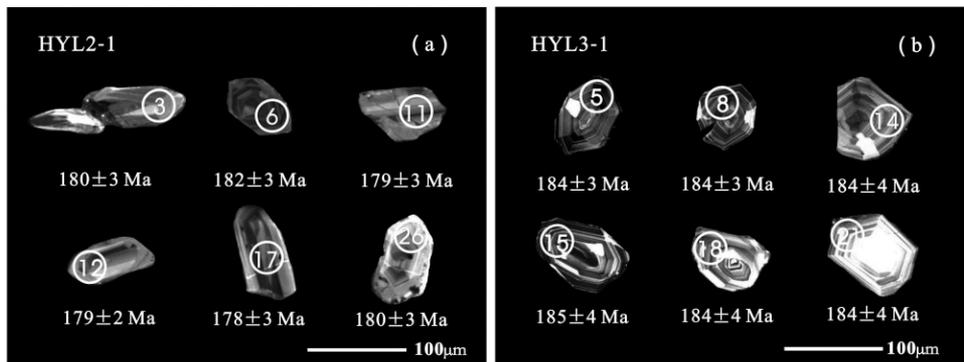


图 3 帽儿山组火山岩部分锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of the selected zircons from Maershan Formation volcanic rocks

平均年龄为 179 ± 2 Ma (MSWD = 0.43) (图 4a), 代表了粗面安山岩的岩浆结晶年龄, 表明粗面安山岩的形成时代应为早侏罗世。

流纹岩 (HYL3-1) 共进行了 30 个锆石颗粒的测定, 其中 24 个锆石的测试结果位于谐和线上及附近, 定年结果显示 24 个测点锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年

表1 滨东地区帽儿山组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the volcanic rocks from Maoershan Formation in Bindong region

样号	Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
HYL2-1-01	1.14	0.21829	0.0471	0.02852	0.00062	200	39	181	4
HYL2-1-03	1.72	0.22444	0.01579	0.02834	0.00047	206	13	180	3
HYL2-1-06	1.89	0.19813	0.02428	0.02863	0.00055	184	21	182	3
HYL2-1-10	1.32	0.19268	0.03976	0.02837	0.00072	179	34	180	5
HYL2-1-11	0.68	0.20549	0.02299	0.02819	0.00052	190	19	179	3
HYL2-1-12	0.64	0.17873	0.01058	0.02815	0.00035	167	9	179	2
HYL2-1-13	1.02	0.20911	0.04671	0.02845	0.00107	193	39	181	7
HYL2-1-15	1.79	0.20707	0.01302	0.02788	0.00049	191	11	177	3
HYL2-1-17	0.68	0.20584	0.0166	0.02806	0.00045	190	14	178	3
HYL2-1-18	1.49	0.17722	0.01043	0.02791	0.00036	166	9	177	2
HYL2-1-22	1.67	0.21875	0.01992	0.02863	0.00056	201	17	182	4
HYL2-1-24	2.08	0.28146	0.01992	0.02775	0.00052	252	16	176	3
HYL2-1-26	0.4	0.20933	0.01714	0.02826	0.00054	193	14	180	3
HYL2-1-27	0.58	0.17352	0.02154	0.02733	0.00074	162	19	174	5
HYL2-1-28	1.19	0.21818	0.03665	0.02773	0.00067	200	31	176	4
HYL3-1-03	0.93	0.22249	0.01963	0.02913	0.00065	204	16	185	4
HYL3-1-04	0.82	0.2463	0.07115	0.02892	0.00105	224	58	184	7
HYL3-1-05	1.35	0.19375	0.0157	0.02893	0.00045	180	13	184	3
HYL3-1-06	0.71	0.21465	0.02447	0.02915	0.00081	197	20	185	5
HYL3-1-07	1.2	0.19999	0.03117	0.02834	0.00059	185	26	180	4
HYL3-1-08	1	0.2262	0.01775	0.02894	0.00053	207	15	184	3
HYL3-1-09	0.88	0.2347	0.03575	0.02906	0.00066	214	29	185	4
HYL3-1-10	1.43	0.18953	0.01198	0.02914	0.00044	176	10	185	3
HYL3-1-11	0.81	0.26114	0.05305	0.02906	0.00107	236	43	185	7
HYL3-1-12	1.24	0.20834	0.0182	0.02889	0.00083	192	15	184	5
HYL3-1-13	0.67	0.25187	0.0253	0.02898	0.00073	228	21	184	5
HYL3-1-14	0.78	0.24954	0.04032	0.02902	0.00067	226	33	184	4
HYL3-1-15	1.1	0.22122	0.01751	0.02916	0.00063	203	15	185	4
HYL3-1-16	1.22	0.22309	0.02084	0.02932	0.00053	204	17	186	3
HYL3-1-18	1.09	0.22228	0.02017	0.02899	0.0006	204	17	184	4
HYL3-1-19	1.01	0.27515	0.04903	0.02933	0.00142	247	39	186	9
HYL3-1-20	1.18	0.24588	0.01258	0.0291	0.00054	223	10	185	3
HYL3-1-21	0.82	0.27337	0.02009	0.02887	0.00064	245	16	184	4
HYL3-1-22	0.84	0.23464	0.01632	0.02886	0.00052	214	13	183	3
HYL3-1-24	0.79	0.21996	0.01952	0.02897	0.00067	202	16	184	4
HYL3-1-25	1.04	0.23171	0.01579	0.0289	0.00052	212	13	184	3
HYL3-1-27	0.94	0.24521	0.0255	0.02885	0.0007	223	21	183	4
HYL3-1-28	0.92	0.26459	0.02119	0.02897	0.00062	238	17	184	4
HYL3-1-29	1.25	0.22537	0.01539	0.02873	0.00054	206	13	183	3

表2 帽儿山组火山岩主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) compositions for the volcanic rocks from Maershan Formation

样品号	HYL2-1	HYL2-2	HYL2-6	HYL3-1	HYL3-2	样品号	HYL2-1	HYL2-2	HYL2-6	HYL3-1	HYL3-2
SiO ₂	61.8	61.49	62.05	71.89	72.08	Y	32.9	26.7	29.5	25.6	25.5
TiO ₂	0.95	0.94	0.92	0.28	0.27	Zr	228	188	218	235	231
Al ₂ O ₃	17.29	16.58	16.8	15.16	14.01	Nb	11.7	9.6	11.2	14.8	15.1
Fe ₂ O ₃	5.95	6.55	5.97	1.12	1.25	Cs	5.25	5.89	4.79	3.06	3.84
MgO	1.05	1.56	1.46	0.01	0.17	Ba	1168	298	729	950	952
CaO	3.44	4.24	3.93	0.05	0.34	La	30.1	24.9	27.9	35.6	37.3
Na ₂ O	4.26	6.47	4.44	5.31	4.48	Ce	61.3	51.1	56.8	72.2	73.5
K ₂ O	3.52	2.47	2.45	4.46	5.13	Pr	7.73	6.5	7.15	8.5	8.37
MnO	0.13	0.17	0.15	0.06	0.15	Nd	31.3	26	29	31.1	30.3
P ₂ O ₅	0.3	0.3	0.28	0.06	0.06	Sm	6.13	5.22	6.12	5.63	5.19
LOI	1.33	0.06	1.51	1.58	1.97	Eu	1.87	1.59	1.68	1.15	1.07
Total	100.01	100.83	99.96	99.97	99.91	Gd	5.76	4.84	5.53	4.5	4.47
Mg#	53	56	62	45	34	Tb	0.87	0.73	0.84	0.69	0.68
Li	27.2	25.4	27.7	4.35	6	Dy	5.33	4.36	4.98	4.02	4.09
Be	1.85	1.74	1.58	2.2	2.25	Ho	1.07	0.86	0.96	0.8	0.8
Sc	15	13.1	14.3	4.53	4.52	Er	2.98	2.43	2.75	2.4	2.32
V	126	106	111	10.6	11.8	Tm	0.47	0.36	0.4	0.36	0.36
Cr	2.06	2.06	1.96	1.07	0.3	Yb	2.84	2.2	2.6	2.46	2.39
Co	11.4	11	11.4	0.85	0.76	Lu	0.45	0.36	0.4	0.4	0.41
Ni	1.7	1.57	1.68	0.31	0.29	Hf	5.86	4.76	5.56	6.57	6.5
Cu	16.92	6.35	6.48	4.4	2.03	Ta	0.72	0.6	0.69	1.17	1.14
Zn	70.7	104	74.3	31	182	Pb	14.43	14.69	11.17	9.47	16.24
Ga	20.4	19.5	19.8	17.8	16	Th	4.75	3.89	4.49	12.96	12.65
Rb	74.3	45.9	52.7	117	141	U	1.36	1.15	1.32	4.43	4.14
Sr	429	384	458	129	133	Sr/Y	13.05	14.36	15.54	5.04	5.2

注解: LOI: H₂O + CO₂; Mg# = 100Mg / (Mg + Fe_c)

8.94%)，且相对富钠。在 TAS 图解中落入粗面安山岩与粗面岩区域 (图 5)。在 SiO₂ - K₂O 图解中位于高钾钙碱系列内 (图 6)。

3.2.2 微量元素

流纹岩的稀土元素总量 (Σ REE) 为 169.81 ~ 171.25 $\mu\text{g/g}$ ，(La/Yb)_N 比值为 9.86 ~ 10.55，明显富集轻稀土元素 (LREE)，贫重稀土元素 (HREE) (表 2)；该样品具明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.66 \sim 0.68$)，稀土元素配分曲线为缓右倾“V”型 (图 7a)。微量元素原始地幔标准化蛛网图中，富集大离子亲石元素 (LILE)，亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE) 和 Sr、P (图 7b)。

粗面安山岩的稀土元素总量 (Σ REE) 为

131.45 ~ 158.2 $\mu\text{g/g}$ ，(La/Yb)_N 比值为 7.16 ~ 7.65，明显富集 LREE，贫 HREE (表 2)；该样品几乎无 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.87 \sim 0.95$) (图 7a)。岩石中 Sr 含量较高，而 Y、Yb 含量较低，Sr/Y 值为 13.0 ~ 15.5；微量元素原始地幔标准化蛛网图中，富集大离子亲石元素 (LILE)，亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE) 和 P (图 7b)。

3.3 锆石 Hf 同位素

帽儿山组流纹岩中锆石的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282 835 ~ 0.282 989， $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +5.92 ~ +11.43，Hf 同位素单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 和二阶段模式年龄 (T_{DM2})，分别变化于 386 ~ 621 Ma 和 625 ~ 1 125 Ma 之间 (表 3)。

表 3 帽儿山组火山岩中锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic data for the volcanic rocks from Maoershan Formation

样品号	t (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	2σ _m	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	T _{DM1(Hf)}	T _{DM2(Hf)}	f _{La/Hf}
HYL2-1 02	182	0.055608	0.002173	0.282978	0.282982	0.000031	7.43	11.16	1.11	395	648	-0.93
HYL2-1 04	180	0.074111	0.002905	0.282833	0.282837	0.000027	2.3	5.91	0.97	619	1123	-0.91
HYL2-1 05	180	0.057272	0.002287	0.282917	0.282921	0.000044	5.27	8.95	1.56	486	847	-0.93
HYL2-1 07	179	0.095127	0.003726	0.282917	0.282921	0.000026	5.26	8.75	0.92	506	865	-0.89
HYL2-1 08	181	0.051325	0.001971	0.282868	0.282872	0.000024	3.54	7.28	0.86	553	999	-0.94
HYL3-1 01	185	0.070301	0.002748	0.282885	0.282889	0.000053	4.13	7.86	1.87	540	950	-0.92
HYL3-1 02	185	0.038829	0.001582	0.282963	0.282966	0.000047	6.87	10.74	1.68	411	688	-0.95
HYL3-1 03	184	0.042767	0.001707	0.282871	0.282875	0.000025	3.65	7.48	0.9	544	983	-0.95
HYL3-1 04	184	0.069299	0.002767	0.282831	0.282835	0.000039	2.21	5.92	1.38	621	1125	-0.92
HYL3-1 05	184	0.057986	0.002386	0.282986	0.282989	0.00004	7.68	11.43	1.41	386	625	-0.93
HYL3-1 07	184	0.039279	0.001581	0.282912	0.282916	0.000032	5.08	8.92	1.14	484	852	-0.95
HYL3-1 08	184	0.048399	0.001954	0.282876	0.28288	0.000028	3.82	7.62	0.99	541	970	-0.94

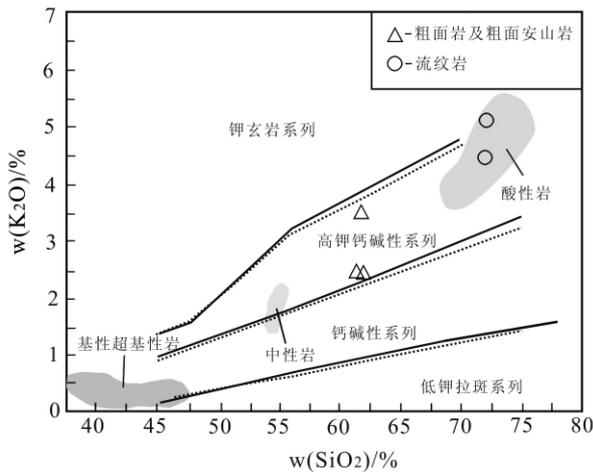


图 6 帽儿山组火山岩 SiO₂ (%) - K₂O (%) 图解 (据文献 [22]) (图中阴影区为未发表资料^①)
 Fig. 6 SiO₂ (%) - K₂O (%) diagram for the volcanic rocks from Maoershan Formation

帽儿山组粗面安山岩中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282837 ~ 0.282982, ε_{Hf} (t) 值为 +5.91 ~ +11.16, Hf 同位素单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 和二阶段模式年龄 (T_{DM2}), 分别变化于 395 ~ 619 Ma 和 648 ~ 1 123 Ma 之间 (表 3)。

4 讨论

4.1 帽儿山组火山岩的形成时代

对于张广才岭地区帽儿山组火山岩的形成时代

存在不同认识, 在宾县、五常县幅 1:20 万区域地质调查报告中将其并入太安屯组, 归入中侏罗统^[9], 而《东北区区域地层》^[10] 将其归入上侏罗统。

笔者对帽儿山组粗面安山岩与流纹岩中的锆石进行了矿物学定年研究, CL 图像显示其典型的岩浆成因—即定年结果应代表了火山岩的形成时代。LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 其加权平均年龄分别为 179 ± 2 Ma 和 184 ± 2 Ma, 说明研究区内所讨论的帽儿山组火山岩的形成时代为早侏罗世, 而非前人认为的晚侏罗世。该区早侏罗世花岗岩^[8] 和早侏罗世镁铁质—超镁铁质侵入岩^① 的广泛分布也证明了上述认识。如 Wu et al.^[8] 在中国东北地区所采的 370 个花岗质岩石样品所获得的锆石 U-Pb 定年结果, 并结合其他研究者所获得的 63 个定年结果, 表明在东北地区古生代花岗岩分布并不像以前认为的那样广泛, 并且张广才岭地区花岗岩的时代大多数为侏罗纪 (150 ~ 190 Ma)。

4.2 早侏罗世流纹岩与粗面岩和粗面安山岩成因关系

定年结果显示帽儿山组流纹岩与粗面岩和粗面安山岩近于同时形成, 那么它们之间存在怎样的成

^① 于介江, 王枫, 许文良, 等. 小兴安岭—张广才岭早侏罗世基性岩浆作用: 年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 中国科学, 2011 (待发表).

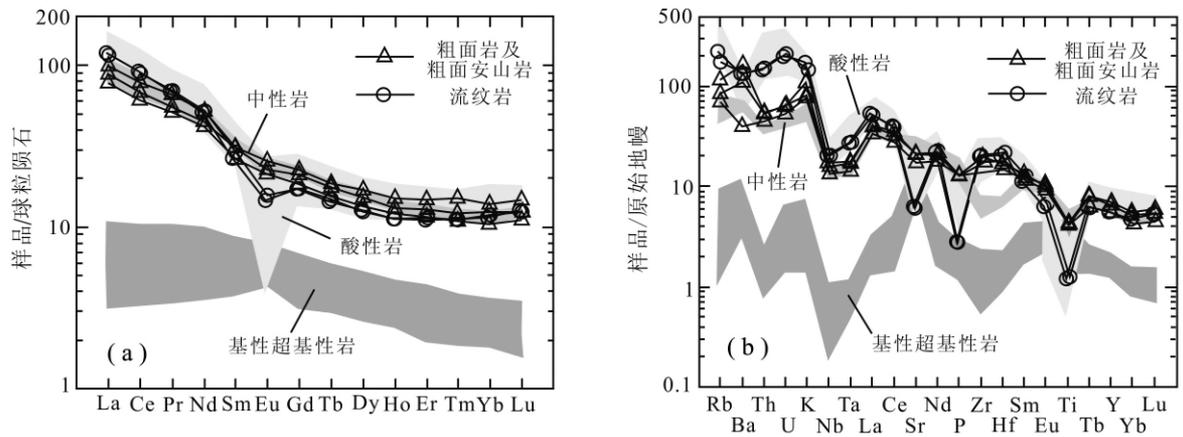


图7 帽儿山组火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石标准化值据文献 [23]; 原始地幔标准化值据文献 [24]) (图中阴影区为未发表资料)①

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for the volcanic rocks from Maershan Formation

因关系呢?

首先,流纹岩的成因存在两种可能性:一种流纹岩是粗面岩和粗面安山岩岩浆演化的产物,由分离结晶而形成;另一种流纹岩与粗面岩和粗面安山岩不属于同源岩浆演化的产物,而是各自具有独立成因。假如帽儿山组流纹岩是粗面岩和粗面安山岩岩浆演化的产物,那么流纹岩的出露面积应相对较少,但这与野外观察不一致;此外,流纹岩与粗面岩和粗面安山岩具有类似的 HREE 丰度,这与分离结晶的成因也不相吻合。因此,可以排除流纹岩是由粗面安山岩或玄武质岩浆演化的可能性,流纹岩应是地壳物质部分熔融的产物。

其次,粗面岩与粗面安山岩的成因同样存在两种可能性:一种粗面岩及粗面安山岩是玄武质岩浆演化的产物;另一种粗面岩及粗面安山岩是玄武质岩浆和流纹岩岩浆混合作用形成的。如果粗面岩及粗面安山岩是玄武质岩浆演化的产物,那么它们的出露面积应相对较少,但野外观察表明,粗面岩及粗面安山岩的出露面积大于玄武岩;此外,从矿物痕量元素分配系数可知,如果粗面岩及粗面安山岩由玄武质岩浆分离结晶而成,粗面岩及粗面安山岩的轻稀土元素丰度应明显高于玄武岩,而重稀土元素丰度应低于玄武岩,但实际情况并非如此(图7a)。综上所述,可以排除粗面岩及粗面安山岩是由玄武质岩浆演化而来的这种可能性。粗面岩及粗面安山岩的形成应是玄武质岩浆和流纹岩岩浆混合

作用的产物。

4.3 早侏罗世岩浆源区的性质

除火山岩的 Sr-Nd 同位素外,锆石 Hf 同位素对岩浆源区性质也给出了很好的制约^[25-27]。帽儿山组流纹岩与粗面安山岩中岩浆锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均 > 0 ,且位于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间,落入了兴蒙造山带东段显生宙火成岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分布范围(图8)^[28],且与中亚造山带显生宙火成岩的 Hf 同位素特征相一致^[29,30]。帽儿山组流纹岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 $+5.92 \sim +11.43$,结合其两

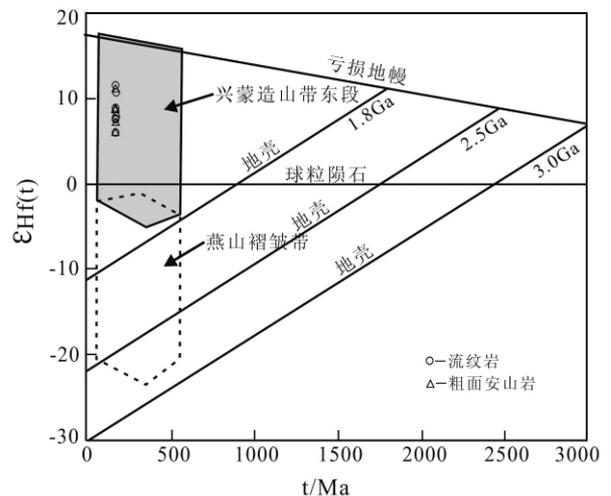


图8 帽儿山组火山岩的 Hf 同位素特征 (据文献 [28])
Fig.8 Hf isotopic compositions of the volcanic rocks from Maershan Formation

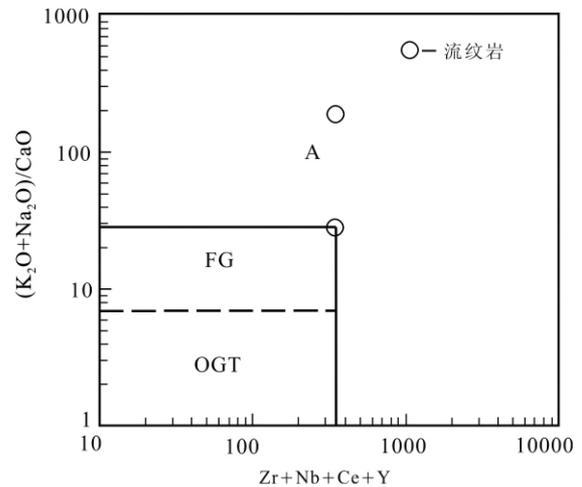
阶段模式年龄 (625 ~ 1 125 Ma), 可以认为帽儿山组流纹岩的岩浆源区应是一种亏损的源区—新增生陆壳部分熔融的产物。正如前述, 帽儿山组粗面安山岩为玄武质岩浆与流纹质岩浆混合作用形成, 其所具有的 Hf 同位素组成, 应是反映两种岩浆源区的特征, 即粗面安山岩具有的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+5.91 ~ +11.16) 和单阶段模式年龄 ($T_{\text{DM1}} = 395 \sim 619$ Ma) 或两阶段模式年龄 ($T_{\text{DM2}} = 648 \sim 1 123$ Ma), 反映玄武质岩浆源区应为亏损的岩石圈地幔, 同时代镁铁质—超镁铁质火成岩中高场强元素的亏损 (图 7b) 暗示岩浆源区应是一个被俯冲洋壳物质改造的亏损岩石圈地幔。

4.4 早侏罗世火山岩形成的动力学背景

帽儿山组火山岩具有双峰式组合的特征。双峰式火山岩一般认为是引张环境的产物, 其形成的具体构造环境主要有几种: 产于与伸张作用有关的大陆隆起区; 产于与地幔热点有关的大洋岛屿或岛弧上; 产于俯冲带之上的大陆边缘造山带区; 产于大陆拉张带中; 产于地幔热点上的陆壳扩张区^[31]。从早侏罗世火山岩的产出构造位置可以排除与地幔热点有关的大洋岛屿或岛弧的构造背景这种可能性。由于该区 (张广才岭—小兴安岭) 缺乏同时代的钙碱性火成岩组合, 可以排除它们形成于俯冲带之上大陆边缘造山带的可能性。

结合研究区帽儿山组流纹岩的地球化学属性—A 型流纹岩的特点 (图 9 和图 10)^[32-34] 和双峰式组合的特征, 可以判定帽儿山组火山岩应形成于伸展环境。

那么, 这种伸展环境是与哪个构造体系相联系? 环太平洋构造体系还是蒙古额霍茨克构造体系? 这可从早侏罗世火成岩的空间变异得到回答。吉黑东部绥芬河—延边地区的早侏罗世火山岩以富钠、高铝和高镁为特征 ($\text{Na}_2\text{O} = 2.52\% \sim 4.94\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16\% \sim 21\%$, $\text{Mg\#} = 46 \sim 51$), 具有较高的 Ni (10 ~ 60 $\mu\text{g/g}$) 和 Cr (63 ~ 263 $\mu\text{g/g}$) 丰度, 属于钙碱性系列, 自东向西 K_2O 及 SiO_2 含量呈增高的趋势, 而 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值具有降低的趋势, 表明陆壳成熟度逐渐增高, 标志着古太平洋板块对东北地区俯冲作用的开始, 暗示此时该区处于活动大陆边缘的构造环境^[35, 36]。因此, 吉黑东部早—中侏罗世火山岩组合从陆缘的钙碱性火山岩转变成具有陆内属性的双峰式火山岩, 这种空间变异不仅表明它们



A. 型花岗岩; FG. 高分异长英质花岗岩; OGT. 未分异的 M、I 和 S 型花岗岩

图 9 帽儿山组流纹岩的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 图解 (据文献 [32])

Fig. 9 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ diagram for the rhyolites from Maoershan Formation

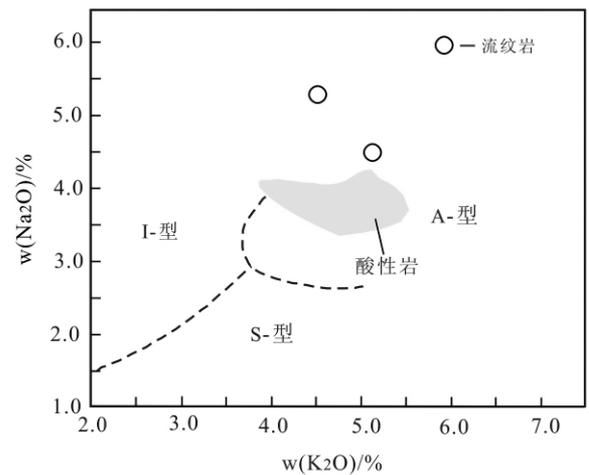


图 10 帽儿山组流纹岩的 $\text{K}_2\text{O} (\%) - \text{Na}_2\text{O} (\%)$ 图解 (图中阴影区为未发表资料^①)

Fig. 10 $\text{K}_2\text{O} (\%) - \text{Na}_2\text{O} (\%)$ diagram for the rhyolites from Maoershan Formation

的形成与环太平洋构造体系有关, 而且进一步说明了张广才岭地区帽儿山组双峰式火山岩应形成于类

① 于介江, 王枫, 许文良, 等. 小兴安岭—张广才岭早侏罗世基性岩浆作用: 年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 中国科学, 2011 (待发表).

似弧后盆地的伸展环境。

5 结论

(1) 研究区帽儿山组火山岩为早侏罗世岩浆作用的产物,而非前人认为的晚侏罗世。

(2) 帽儿山组火山岩显示具双峰式火山岩的组合特点,岩石组合为玄武岩-流纹岩组合,而粗面安山岩为岩浆混合作用的产物。

(3) 帽儿山组双峰式火山岩形成于与环太平洋构造体系有关的弧后拉张环境,即与太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用有关。

致谢:衷心感谢河北省廊坊区域地质调查研究所对锆石的分选过程中给予的支持,感谢中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室和中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析、主量元素、痕量元素以及锆石 Hf 同位素测试中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Kuzmin M L, Abramovich G Y, Dril S L, et al. The Mongolian - Okhotsk suture as the evidence of late Paleozoic - Mesozoic collisional processes in central Asia [J]. Abstract of 30th IGC, 1996, 1 (1): 261.
- [2] Zhao X X, Coe R S. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of China: implications for Gondwanaland [J]. Abstract of 30th IGC, 1996, 1 (1): 231.
- [3] 林强. 东北亚中生代火山岩研究若干问题的思考 [J]. 世界地质, 1999, 18 (2): 14-22.
LIN Qiang. Some thoughts on Mesozoic volcanic rocks in Northeast Asia [J]. World Geology, 1999, 18 (2): 14-22.
- [4] 李思田, 杨世恭. 中国东北部晚中生代裂陷作用和东北亚断陷盆地系 [J]. 中国科学 (B 辑), 1987, 21 (2): 185-195.
LI Si-tian, YANG Shi-gong. The Late Mesozoic rifting in the northeastern China and the fault-rifting in the East Asia [J]. Science in China (Ser. B), 1987, 21 (2): 185-195.
- [5] 谭成印. 滨东地区花岗岩类成因类型及其成矿作用 [J]. 黑龙江地质, 1995, 6 (3): 18-30.
TAN Cheng-yin. The genetic type and its mineralization of granitoid in the Bindong region [J]. Geology of Heilongjiang, 1995, 6 (3): 18-30.
- [6] 吴福元, 林强, 葛文春, 等. 张广才岭新华屯岩体的形成时代与成因研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17 (3): 227-234.
WU Fu-yuan, LIN Qiang, GE Wen-chun, et al. The petrogenesis and age of Xinhuatun pluton in Zhangguang-cailing [J]. Acta petrological et Mineralogical, 1998, 17 (3): 227-234.
- [7] 孙德有. 张广才岭中生代花岗岩成因及其地球动力学意义: 博士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2001.
SU De-you. Petrogenesis and geodynamic significance of mesozoic granites in Zhangguangcai Ranges: Ph'D dissertation [D]. Changchun: Jilin University, 2001.
- [8] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 1-30.
- [9] 黑龙江省地矿局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 8-585.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 8-585.
- [10] 王友勤, 苏养正, 刘尔义. 东北区区域地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-175.
WANG You-qin, SU Yang-zheng, LIU Er-yi. Regional stratigraphy of Northeast China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 1-175.
- [11] 王宝春, 崔永生, 于喜涓. 滨东地区多金属找矿规律及找矿方向 [J]. 黑龙江国土资源, 2007 (6): 56, 57.
WANG Bao-chun, CUI Yong-sheng, YU Xi-huan. Mineral exploration rules and prospecting direction of polymetal in east Harbin [J]. Heilongjiang Land and Resources, 2007 (6): 56, 57.
- [12] 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 等. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义 [J]. 地质通报, 2008, 27 (4): 534-544.
LIU Jian-feng, CHI Xiao-guo, DONG Chun-yan, et al. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Xiao Hinggan Mountains, northeastern China and their tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (4): 534-544.
- [13] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. 岩石学报, 1999, 15 (2): 181-189.
WU Fu-yuan, SUN De-you, LIN Qiang. Petrogenesis of

- the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15 (2): 181-189.
- [14] 王希今, 胡忠贤, 李永胜, 等. 黑龙江省滨东地区 Cu-Pb-Zn-W-As-Sb-Bi-Au-Ag 地球化学块体矿产资源潜力预测 [J]. *地质与资源*, 2007, 16 (2): 91-94. WANG Xi-jin, HU Zhong-xian, LI Yong-sheng, et al. Prediction for the mineral resources of the Cu-Pb-Zn-W-As-Sb-Bi-Au-Ag geochemical block in east Harbin, Heilongjiang Province [J]. *Geology and Resources*, 2007, 16 (2): 91-94.
- [15] Liu Y S, Hu Z C, Zong K, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34-43.
- [16] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. Temora 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2003, 200 (1/2): 155-170.
- [17] Andersen T. Correction of common lead in U Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- [18] Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): a geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2001: 55.
- [19] Xu P, Wu F Y, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (15): 1642-1648.
- [20] Koschek G. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon [J]. *Journal of Microscopy*, 1993, 171: 223-232.
- [21] Irvine T H, Baragar W R. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- [22] Peccerillo A, Taylor A R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- [23] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C] // Henderson. Rare earth element geochemistry. Elsevier, 1984: 63-114.
- [24] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [C] // Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the ocean basins. Geological Society Special Publication, 1989, 2: 313-345.
- [25] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399: 252-255.
- [26] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotope studies of single zircon grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 4205-4225.
- [27] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61: 237-269.
- [28] Yang J H, Wu F Y, Shao J A, 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.
- [29] Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 2004, 304: 370-395.
- [30] Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 245-257.
- [31] 许美辉. 福建省永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境 [J]. *福建地质*, 1992, 11 (2): 115-125. XU Mei-hui. Early Jurassic bimodal volcanic rocks and their structure environment in Yongding County, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 1992, 11 (2): 115-125.
- [32] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- [33] Hergt J, Woodhead J, Schofield A. A type magmatism in the western Lachlan fold belt? a study of granites and rhyolites from the Grampians region, western Victoria [J]. *Lithos*, 2007, 97: 122-139.
- [34] Samuel M D, Moussa H E, Azer M K. A type volcanics in central eastern Sinai, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 47: 203-226.
- [35] 裴福萍, 许文良, 孟恩, 等. 古太平洋俯冲作用的开始: 来自吉黑东部早-中侏罗世火山岩的年代学及地

球化学证据 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27 (增刊1): 268.

PEI Pu-ping, XU Wen-liang, MENG En, et al. The beginning of the paleo-Pacific plate subduction: geochronological and geochemical evidence from the Early-Middle Jurassic volcanic rocks in the eastern of Jilin and Heilongjiang provinces [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27 (Suppl. 1): 268.

[36] 王枫, 许文良, 李军, 等. 吉林中部烟筒山早白垩世辉长闪长岩的年代学和地球化学 [J]. 世界地质, 2009, 28 (4): 403-413.

WANG Feng, XU Wen-liang, LI Jun, et al. Chronology and geochemistry of Early Cretaceous gabbro-diorite in Yantongshan area of central Jilin [J]. Global Geology, 2009, 28 (4): 403-413.

欢迎订阅 《世界地质》

《世界地质》(ISSN1004-5589/CN22-1111/P)是由吉林大学东北亚国际地学研究与教学中心主办的综合性地学学术刊物。是中国科技核心期刊,被美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)所收录,现为中国科学引文数据库和中国学术期刊综合评价数据库来源期刊。

《世界地质》编委会由40多位国内外专家、学者组成,其中包括9位国外专家编委。由国内外著名的古生物学家孙革教授任主编。

该刊以跟踪地学前沿,及时反映全球地学领域里的新发现、新理论和新成果为办刊宗旨,内容涉及基础地质(包括地层、古生物、构造,岩石、矿物和区域地质等)、矿床地质、能源地质、海洋地质、水文地质、地质工程、环境地质(含生态地质和灾害地质)、遥感地质、地球物理、地球化学、勘探工程、地质信息、岩矿测试等研究成果。

《世界地质》中文版为季刊,大16开本,每期166页,季末月22日出刊。每本定价10元,全年40元。邮发代号12-127,读者可通过邮局订阅。补订者与本刊编辑部联系,竭诚欢迎订阅和投稿。

通讯地址: 长春市西民主大街938号《世界地质》编辑部 邮政编码: 130026

E-mail: sjdz@jlu.edu.cn

电话: (0431) 88502100, 88502274, 88502587

传真: (0431) 8502274

网址: <http://sjdz.jlu.edu.cn>