

黑龙江省东部中泥盆世火山作用及其构造意义 ——来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素的制约

孟 恩^{1,2}, 许文良², 裴福萍², 王 枫²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 对佳木斯地块东缘老秃顶子组和小兴安岭地区宝泉组上段火山岩进行了岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Sr-Nd-Hf 同位素研究以制约该区的区域构造演化。前者主要由流纹岩及次要的碱性玄武岩组成, 后者以流纹岩为主。研究表明, 这些火山岩中锆石发育震荡生长环带或具条痕状吸收, 且具有较高的 Th/U 比值 (0.28~1.64), 反映了岩浆成因特征。定年结果表明, 它们均形成于中泥盆世 (峰期为 386 Ma)。火山岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 佳木斯地块东缘老秃顶子组火山岩以双峰式火山岩组合为特征, 基性端员岩石的 $\text{SiO}_2 = 50.40\% \sim 55.66\%$, $\text{Mg}^\# = 0.39 \sim 0.50$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.88 \sim 4.99$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.66\% \sim 18.06\%$, 并以富集轻稀土元素和亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、Ti) 为特征, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.705 99, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.04$, 暗示其原始岩浆起源于遭受地壳物质混染的岩石圈地幔; 酸性端员岩石的 $\text{SiO}_2 = 77.59\% \sim 78.75\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.32 \sim 0.36$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.62\% \sim 11.76\%$, 富集 Rb、Th、U、K, 亏损 Nb、Ta、Eu、P、Ti 等, 其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.703 78~0.707 36, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.20 \sim -4.15$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +1.8 \sim +8.6$, $t_{\text{DM1}} = 671 \sim 998 \text{ Ma}$, 与中亚造山带内显生宙花岗岩的研究结果相一致, 暗示其岩浆应起源于新增生下地壳物质的部分熔融; 小兴安岭地区宝泉组上段流纹岩具有高硅 (74.64%~76.09%), 富铷 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.42 \sim 0.81$), 低钪 (12.56%~12.63%) 等特征, 同时显示强烈的负钕异常, 该组火山岩具有 A 型流纹岩特点, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.5 \sim +6.4$, $t_{\text{DM2}} = 837 \sim 983 \text{ Ma}$, 暗示其岩浆应起源于新增生下地壳的部分熔融。结合区域地质资料, 认为中泥盆世佳木斯地块东缘应处于一个被动大陆边缘盆地沉积环境, 老秃顶子组双峰式火山岩的形成应与被动陆缘内的伸展环境有关, 而小兴安岭地区同期宝泉组上段 A 型流纹岩的形成应与陆内伸展环境相联系。

关键词: 黑龙江省东部; 中泥盆世; 火山岩; 地球化学; Sr-Nd-Hf 同位素; 构造意义

中图分类号: P588.1; P595; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0883-18

Middle Devonian volcanism in eastern Heilongjiang Province and its tectonic implications: constraints from petro-geochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes

MENG En^{1,2}, XU Wen-liang², PEI Fu-ping² and WANG Feng²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: This paper has reported zircon U-Pb dating, Hf isotopes, major and trace elements, and Sr-Nd isotope data of the volcanic rocks from the Laotudingzi Formation in the eastern margin of the Jiamusi Massif and the upper segment of the Baoquan Formation in the Xiao Hinggan Mountains, with the aim of constraining the regional tectonic evolution in eastern Heilongjiang Province. The former is composed mainly of rhyolite and

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-08-01

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212010611806, 1212010070301); 国家自然科学基金资助项目 (41072038, 40672038)

作者简介: 孟 恩 (1982-), 男, 博士, 地球化学专业, E-mail: meng0416@126.com。

subordinately of alkaline basalt, whereas the latter consists chiefly of rhyolite. Zircons from these volcanic rocks display striped absorption or fine-scale oscillatory growth zoning as well as high Th/U ratios (0.28~1.64), implying a magmatic origin. The dating results show that they were probably all formed in middle Devonian (a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 386 Ma). The mafic rocks from the Laotudingzi Formation in the eastern margin of the Jiamusi Massif have the data $\text{SiO}_2 = 50.40\% \sim 55.66\%$, $\text{Mg}^\# = 0.39 \sim 0.50$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.88 \sim 4.99$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.66\% \sim 18.06\%$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70599$, $\epsilon\text{Nd}(t) = +2.04$, and show the enrichment of light rare earth elements (LREEs) and Cr, Co, Ni and Zr, and depletion of Nb, Ta, Ti, with high Zr/Y, Nb/U, Ta/U and Ce/Pb ratios, whereas the felsic rocks have the data $\text{SiO}_2 = 77.59\% \sim 78.75\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.32 \sim 0.36$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.62\% \sim 11.76\%$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70378 \sim 0.70736$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -2.20 \sim -4.15$, $\epsilon\text{Hf}(t) = +1.8 \sim +8.6$, $t_{\text{DMI}} = 671 \sim 998$ Ma, and display enrichment of Rb, Th, U, K and depletion of Nb, Ta, U, P, Ti. These data are typical of bimodal volcanism and indicate that the former might have been derived from the lithosphere mantle, contaminated by crustal material, whereas the latter probably originated from partial melting of the newly accreted crust. The rhyolite from the upper Baoquan Formation in the Xiao Hinggan Mountains is characterized by high SiO_2 (74.64%~76.09%), enrichment of K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.42 \sim 0.81$), low Al_2O_3 (12.56%~12.63%), enrichment of high field strength elements (such as Zr and Hf) and large ion lithophile elements (LILEs) such as Th, U and K, and strong depletion of Sr, Eu, P and Ti. These data are similar to features of A-type rhyolites. Besides, these volcanic rocks have $\epsilon\text{Hf}(t) = +2.5 \sim +6.4$, $t_{\text{DMI}} = 837 \sim 983$ Ma, consistent with the data of Phanerozoic granitoids in the CAOB, suggesting that they might have originated from partial melting of the newly accreted crust. Combined with the regional geological data, it is inferred that there might have existed a passive continental-margin setting in the eastern margin of the Jiamusi Massif in middle Devonian, where the bimodal volcanic rocks were probably formed. Furthermore, the coeval A-type rhyolite of the upper Baoquan Formation in the Xiao Hinggan Mountains was probably formed in an intra-continental extensional environment.

Key words: eastern Heilongjiang Province; middle Devonian; volcanic rocks; geochemistry; Sr-Nd-Hf isotopes; tectonic setting

我国东北地区位于兴蒙造山带的东段,具有“多板块、多缝合带”的构造属性 (Sengör *et al.*, 1993; 谢鸣谦, 2000), 古生代期间的地质演化一直是国内外地质学家研究的焦点问题之一 (Jahn *et al.*, 2004; Li, 2006), 而火成岩组合作为了解区域构造演化历史的重要依据之一, 也一直是揭示兴蒙造山带东段古生代构造演化的主体 (Wu *et al.*, 2002, 2007; Meng *et al.*, 2008)。近年来, 虽然对黑龙江省东部早古生代花岗岩和晚古生代晚期花岗岩与火山岩进行了详细的年代学与地球化学研究, 并揭示了松嫩-张广才岭地块和佳木斯地块在早泥盆世以前就已经沿牡丹江断裂碰撞拼贴在一起和陆内伸展环境的存在 (Meng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011) (图 1a), 但是对区域内晚古生代早期地层的沉积时限还缺乏明确的年代学制约 (Meng *et al.*, 2010), 对晚古生代早期区域构造属性还缺乏明确的认识。追其根本原因是缺乏对区内晚古生代早期岩

浆作用时代与性质的研究。鉴于此, 本文报道了黑龙江省东部佳木斯地块东缘老秃顶子组和小兴安岭宝泉组火山岩中锆石 U-Pb 定年、Sr-Nd-Hf 同位素以及岩石地球化学的研究结果, 这对限定该区晚古生代早期盆地沉积时限和揭示区域构造演化历史均具有重要意义。

1 地质背景与样品描述

黑龙江省东部位于兴蒙造山带东段, 主要由松嫩-张广才岭地块和佳木斯地块组成, 二者以牡丹江断裂和黑龙江杂岩为界 (Sengör *et al.*, 1993; Wu *et al.*, 2007)。该区东临跃进山拼贴带、南为敦化-密山断裂带、西北与兴安地块以黑河-贺根山断裂相接 (图 1b)。区内结晶基底由早古生代混合花岗岩类和麻山群变质岩系组成, 并有大面积的晚古生代和中生代花岗岩类及火山岩产出, 前寒武纪地层零星出

露在本区西南部,古生代盖层零星发育,中新生代火山-沉积岩系广泛出露(黑龙江省地质矿产局,1993)(图 1)。本文所研究的火山岩样品主要采自佳木斯

地块东缘老秃顶子组和小兴安岭地区宝泉组上段,采样点位置如图 1 所示。

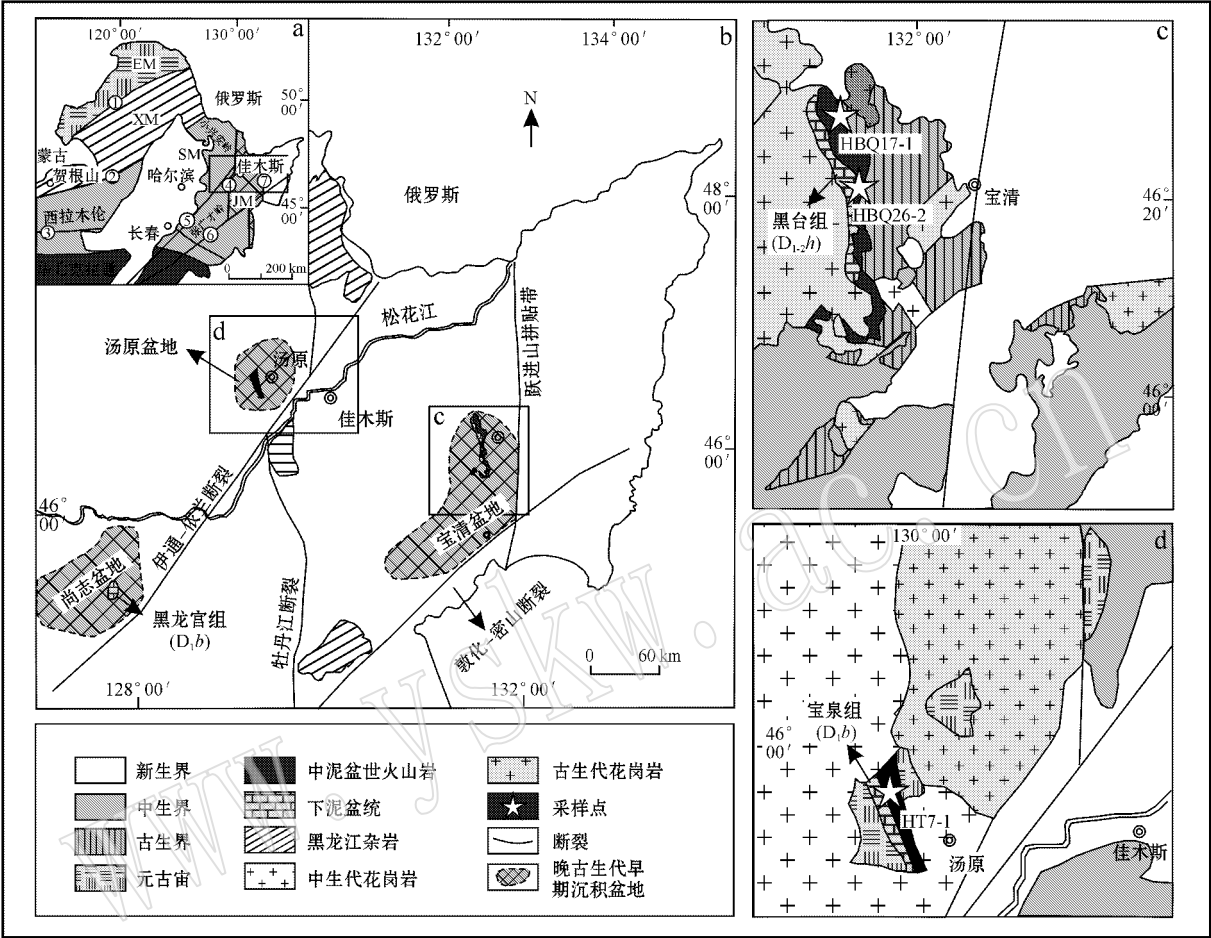


图 1 黑龙江省东部大地构造位置略图(a、b 据 Wu *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2010)和黑龙江省东部中泥盆世火山岩分布图(c、d 据黑龙江省地质矿产局,1993)

Fig. 1 Tectonic sketch maps of eastern Heilongjiang Province(a, b, modified after Wu *et al.*, 2007 and Meng *et al.*, 2010) and distribution of middle Devonian volcanic rocks in Heilongjiang Province(c, d, after HBGMR, 1993)

EM—额尔古纳地块; XM—兴安地块; SM—松嫩-张广才岭地块; JM—佳木斯地块; ①—塔源-喜桂图断裂; ②—黑河-贺根山断裂; ③—西拉木伦断裂; ④—牡丹江断裂; ⑤—伊通-依兰断裂; ⑥—敦化-密山断裂; ⑦—跃进山断裂

EM—Ergun Massif; XM—Xing'an Massif; SM—Songnen-Zhangguangcailing Massif; JM—Jiamusi Massif; ①—Xiguitu-Tayuan Fault; ②—Hegenshan-Heihe Fault; ③—Xar Moron Fault; ④—Mudanjiang Fault; ⑤—Yitong-Yilan Fault; ⑥—Dunhua-Mishan Fault; ⑦—Yuejinshan suture zone

样品 HBQ17-1 和 HBQ26-2 均采自佳木斯地块东缘原定为晚泥盆世的老秃顶子组(D_3l)。该组为一套整合于早-中泥盆世黑台组(D_{1-2h})之上、七里卡山组(D_3q)之下的火山岩夹碎屑岩组合,出露于宝清西部,呈南北向带状展布(黑龙江省地矿局,1993)。岩性以流纹岩及凝灰岩和少量的玄武岩、粗面玄武岩为主,夹次要的砂岩、板岩等。样品 HBQ17-1 采

自宝清县西北劝农村路北(坐标: E $131^{\circ}53'00''$, N $46^{\circ}28'30''$, 图 1c),为流纹岩,风化面呈灰白色,流纹构造,斑状结构,斑晶为石英、碱性长石和斜长石,具有熔蚀现象,可见少量安山质岩屑,基质为隐晶质。样品 HBQ26-2 采自宝清西南(坐标: E $131^{\circ}56'44''$, N $46^{\circ}21'07''$, 图 1c),为流纹岩,风化面呈灰白色,块状构造,斑状结构,斑晶主要为斜长石、石英及少量黑

云母,基质为隐晶质。

样品 HT7-1 采自小兴安岭汤原地区的早泥盆世宝泉组上段(D₁b,坐标:N 129°30'00",E 46°58'00";图1d)。该组只出露于汤原西北部,与下伏地层寒武纪晨鸣组不整合接触(黑龙江省地质矿产局,1993)。岩性可分为上下两段,上段以流纹岩、流纹质熔结凝灰岩为主,下段主要由石英岩、砂岩和石英砾岩组成。样品 HT7-1 为取自该组下段的流纹岩,风化面呈灰白色、灰黄色,流纹构造,斑状结构,斑晶为石英、碱性长石和斜长石,基质为隐晶质。

2 分析方法

2.1 年代学分析方法

样品在河北省廊坊市区地质调查研究所用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选。在双目镜下挑选出晶形和透明度较好,无明显裂痕和包裹体的锆石颗粒,将其粘在环氧树脂表面,固化后打磨抛光,并进行透射光和反射光图像的采集,最后在西北大学大陆动力学国家重点实验室环境扫描电子显微镜(FEI Quanta 400 FEG)上进行锆石阴极发光(CL)图像的采集。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 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 Yuan 等(2004)。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(Black *et al.*, 2003)。激光束的束斑为 $30 \mu\text{m}$ 。实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响,然后用 ISOPLOT 宏程序进行年龄谐和图的生成和处理,所给定的同位素比值和年龄的误差(标准误差)在 1σ 水平(Ludwig, 2003)。

2.2 主量元素和痕量元素分析方法

主量元素和痕量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用玻璃熔片大型 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%。

2.3 Sr-Nd 同位素分析方法

Sr-Nd 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。采用 HF + HNO₃ 混合酸溶解,用阳离子交换技术进行分离,分离本底在同位素测量误差范围之内。同位素比值的测定是在多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)上进行的,分析精度优于 0.002%。国际标样 La Jolla 和 BCR-2 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测定的平均值分别为 $0.511\,859 \pm 6(2\sigma, n = 20)$ 和 $0.512\,637 \pm 3(2\sigma, n = 2)$, NBS-987 给出的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 $0.710\,245 \pm 15(2\sigma, n = 9)$ 。

2.4 锆石 Hf 同位素分析方法

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 Wu 等(2006)。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 年代学

研究区原定晚泥盆世老秃顶子组(D₃l)流纹岩样品(HBQ17-1 和 HBQ26-2)和早泥盆世宝泉组上段(D₁b)流纹岩样品(HT7-1)中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 1,部分测定的阴极发光(CL)图像见图 2,锆石 U-Pb 谐和图见图 3。

宝清地区原定晚泥盆世老秃顶子组(D₃l)流纹岩(HBQ17-1)中锆石呈粒状或半自形短柱状,显示出清晰的震荡生长环带(图 2a),Th/U 比值介于 0.41 ~ 1.19 之间,暗示其岩浆成因特点(Koschek, 1993)。23 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 $382 \pm 8 \sim 402 \pm 4$ Ma 之间,其加权平均年龄为 392 ± 3 Ma(MSWD = 1.5)(图 3a),代表了流纹岩的形成时代为中泥盆世(D₂l)。

宝清地区原定晚泥盆世老秃顶子组(D₃l)流纹岩(HBQ26-2)中锆石呈自形-半自形短柱状或粒状,显示出清晰的内部结构,锆石具有条痕状吸收或震荡生长环带(图 2b),Th/U 比值介于 0.61 ~ 1.64 之间,暗示其岩浆成因特点(Koschek, 1993)。16 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 $381 \pm 3 \sim 395 \pm 3$ Ma 之间,其加权平均年龄为 388 ± 2 Ma(MSWD = 1.2)(图 3b),代表了流纹岩的形成时代为中泥盆世(D₂l)。

表 1 黑龙江省东部中泥盆世火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province

样号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
HBQ17-1-01	112	139	0.80	0.054 66	0.002 15	0.469 24	0.017 75	0.062 26	0.000 71	398	64	391	12	389	4
HBQ17-1-02	68	136	0.50	0.058 69	0.002 17	0.503 17	0.017 82	0.062 19	0.000 69	556	58	414	12	389	4
HBQ17-1-03	177	228	0.77	0.059 98	0.002 44	0.511 89	0.019 95	0.061 90	0.000 74	603	64	420	13	387	4
HBQ17-1-04	103	124	0.83	0.054 12	0.004 69	0.457 45	0.038 97	0.061 30	0.000 99	376	199	382	27	384	6
HBQ17-1-05	109	157	0.69	0.059 89	0.004 04	0.524 95	0.034 33	0.063 57	0.001 16	600	110	428	23	397	7
HBQ17-1-06	167	241	0.69	0.060 68	0.002 14	0.531 67	0.017 89	0.063 55	0.000 69	628	54	433	12	397	4
HBQ17-1-07	94	166	0.57	0.055 87	0.002 51	0.477 16	0.020 67	0.061 94	0.000 79	447	74	396	14	387	5
HBQ17-1-08	117	265	0.44	0.059 90	0.003 06	0.515 99	0.025 56	0.062 48	0.000 78	600	114	422	17	391	5
HBQ17-1-09	146	164	0.89	0.059 59	0.001 90	0.520 31	0.015 79	0.063 32	0.000 64	589	48	425	11	396	4
HBQ17-1-10	49	95	0.52	0.054 57	0.004 84	0.466 71	0.040 32	0.062 02	0.001 39	395	154	389	28	388	8
HBQ17-1-11	174	424	0.41	0.061 44	0.002 34	0.545 55	0.020 02	0.064 40	0.000 65	655	84	442	13	402	4
HBQ17-1-12	210	177	1.19	0.063 21	0.005 80	0.553 19	0.019 86	0.063 48	0.001 09	715	202	447	33	397	7
HBQ17-1-13	130	262	0.50	0.062 68	0.002 79	0.546 59	0.023 59	0.063 25	0.000 67	697	97	443	15	395	4
HBQ17-1-14	152	132	1.15	0.063 21	0.002 88	0.556 00	0.024 32	0.063 78	0.000 85	715	70	449	16	399	5
HBQ17-1-15	268	367	0.73	0.056 88	0.001 61	0.497 90	0.013 33	0.063 47	0.000 59	487	43	410	9	397	4
HBQ17-1-16	124	164	0.76	0.055 28	0.002 69	0.469 80	0.022 09	0.061 63	0.000 82	424	81	391	15	386	5
HBQ17-1-17	39	55	0.70	0.064 34	0.008 23	0.546 22	0.067 89	0.061 56	0.002 10	753	208	443	45	385	13
HBQ17-1-18	113	151	0.75	0.059 15	0.003 53	0.501 94	0.028 97	0.061 53	0.001 00	573	97	413	20	385	6
HBQ17-1-19	98	187	0.52	0.056 64	0.002 42	0.500 80	0.020 70	0.064 13	0.000 68	477	97	412	14	401	4
HBQ17-1-20	53	115	0.46	0.054 39	0.002 88	0.470 02	0.024 09	0.062 66	0.000 89	387	90	391	17	392	5
HBQ17-1-21	198	400	0.50	0.055 91	0.003 44	0.474 13	0.028 68	0.061 51	0.000 71	449	141	394	20	385	4
HBQ17-1-22	30	44	0.67	0.064 46	0.009 84	0.547 56	0.081 76	0.061 61	0.001 97	757	342	443	54	385	12
HBQ17-1-23	79	161	0.49	0.059 96	0.004 90	0.505 61	0.040 13	0.061 13	0.001 32	602	135	415	27	382	8
HBQ26-2-01	330	229	1.44	0.056 59	0.003 84	0.477 38	0.031 79	0.061 18	0.000 78	476	154	396	22	383	5
HBQ26-2-02	123	104	1.18	0.054 57	0.003 82	0.464 90	0.031 96	0.061 79	0.000 84	395	162	388	22	386	5
HBQ26-2-03	178	194	0.92	0.056 52	0.001 91	0.483 81	0.015 57	0.062 11	0.000 65	473	53	401	11	388	4
HBQ26-2-04	133	168	0.79	0.054 36	0.002 20	0.463 99	0.018 04	0.061 93	0.000 72	386	66	387	13	387	4
HBQ26-2-05	77	126	0.61	0.054 30	0.002 43	0.461 45	0.019 92	0.061 65	0.000 77	384	75	385	14	386	5
HBQ26-2-06	166	155	1.07	0.054 95	0.002 65	0.465 53	0.021 66	0.061 45	0.000 82	410	80	388	15	384	5
HBQ26-2-07	130	96	1.35	0.056 13	0.002 38	0.476 64	0.019 43	0.061 59	0.000 75	458	69	396	13	385	5
HBQ26-2-08	178	264	0.68	0.054 68	0.001 36	0.475 50	0.011 03	0.063 08	0.000 55	399	36	395	8	394	3

续表 1
Continued Table 1

样品号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
HBQ26-2-09	152	139	1.09	0.055 64	0.002 13	0.477 94	0.017 56	0.062 29	0.000 70	438	62	397	12	390	4
HBQ26-2-10	308	192	1.60	0.056 41	0.001 87	0.482 43	0.015 19	0.061 99	0.000 63	469	52	400	10	388	4
HBQ26-2-11	105	109	0.96	0.056 48	0.005 46	0.485 81	0.045 76	0.062 36	0.001 54	471	166	402	31	390	9
HBQ26-2-12	426	359	1.19	0.056 43	0.001 57	0.481 12	0.012 59	0.061 80	0.000 57	469	41	399	9	387	3
HBQ26-2-13	922	561	1.64	0.062 06	0.002 52	0.521 53	0.020 68	0.060 95	0.000 55	676	89	426	14	381	3
HBQ26-2-14	236	195	1.21	0.056 44	0.002 28	0.485 40	0.018 81	0.062 33	0.000 73	470	65	402	13	390	4
HBQ26-2-15	794	496	1.60	0.056 08	0.001 08	0.488 64	0.008 53	0.063 15	0.000 48	456	25	404	6	395	3
HBQ26-2-16	57	88	0.65	0.057 68	0.003 13	0.488 26	0.025 80	0.061 39	0.000 75	518	122	404	18	384	5
HT7-1-01	666	1648	0.40	0.055 62	0.000 69	0.564 02	0.004 99	0.073 54	0.000 37	437	11	454	3	457	2
HT7-1-02	1 098	3619	0.30	0.059 49	0.001 06	0.592 88	0.009 96	0.072 28	0.000 42	585	39	473	6	450	3
HT7-1-03	1 431	3 991	0.36	0.058 55	0.000 81	0.489 28	0.006 30	0.060 61	0.000 31	550	31	404	4	379	2
HT7-1-04	1 747	1 819	0.96	0.057 47	0.000 74	0.573 35	0.005 37	0.072 35	0.000 37	510	12	460	3	450	2
HT7-1-05	297	752	0.39	0.056 83	0.000 81	0.481 13	0.006 43	0.061 40	0.000 32	485	32	399	4	384	2
HT7-1-06	481	1 303	0.37	0.059 16	0.000 71	0.503 42	0.005 46	0.061 72	0.000 30	573	27	414	4	386	2
HT7-1-07	219	736	0.30	0.059 15	0.001 50	0.587 58	0.014 33	0.072 04	0.000 50	573	56	469	9	448	3
HT7-1-08	138	417	0.33	0.057 28	0.001 04	0.618 65	0.009 72	0.078 33	0.000 49	502	24	489	6	486	3
HT7-1-09	227	507	0.45	0.057 05	0.000 78	0.618 16	0.006 39	0.078 59	0.000 41	493	14	489	4	488	2
HT7-1-09	227	507	0.45	0.057 05	0.000 78	0.618 16	0.006 39	0.078 59	0.000 41	493	14	489	4	488	2
HT7-1-10	223	488	0.46	0.055 88	0.001 18	0.520 13	0.009 84	0.067 51	0.000 46	448	30	425	7	421	3
HT7-1-11	211	443	0.48	0.057 46	0.000 87	0.536 10	0.007 64	0.067 66	0.000 36	509	34	436	5	422	2
HT7-1-12	223	497	0.45	0.068 33	0.001 05	0.686 48	0.008 48	0.072 85	0.000 42	879	16	531	5	453	3
HT7-1-13	307	533	0.58	0.057 05	0.000 70	0.576 11	0.004 89	0.073 24	0.000 37	493	10	462	3	456	2
HT7-1-14	168	364	0.46	0.057 17	0.000 79	0.612 43	0.006 48	0.077 69	0.000 41	498	14	485	4	482	2
HT7-1-15	359	652	0.55	0.056 58	0.001 26	0.569 56	0.012 14	0.073 00	0.000 45	475	50	458	8	454	3
HT7-1-16	602	1 695	0.36	0.056 19	0.001 01	0.518 69	0.008 82	0.066 95	0.000 37	460	41	424	6	418	2
HT7-1-17	282	614	0.46	0.056 53	0.000 97	0.524 41	0.008 54	0.067 28	0.000 37	473	39	428	6	420	2
HT7-1-18	346	663	0.52	0.056 80	0.000 71	0.534 27	0.004 70	0.068 22	0.000 34	484	11	435	3	425	2
HT7-1-19	242	516	0.47	0.056 20	0.000 73	0.528 46	0.005 05	0.068 20	0.000 35	460	12	431	3	425	2
HT7-1-20	249	635	0.39	0.057 50	0.001 08	0.573 12	0.010 25	0.072 29	0.000 43	511	42	460	7	450	3
HT7-1-21	372	720	0.52	0.059 37	0.000 98	0.502 06	0.007 85	0.061 33	0.000 33	581	37	413	5	384	2
HT7-1-22	646	1 258	0.51	0.060 52	0.000 85	0.565 50	0.007 39	0.067 77	0.000 35	622	31	455	5	423	2
HT7-1-23	978	1 061	0.92	0.055 97	0.001 09	0.471 06	0.008 84	0.061 04	0.000 32	451	44	392	6	382	2
HT7-1-24	254	922	0.28	0.055 37	0.000 78	0.516 80	0.006 72	0.067 69	0.000 35	427	32	423	4	422	2

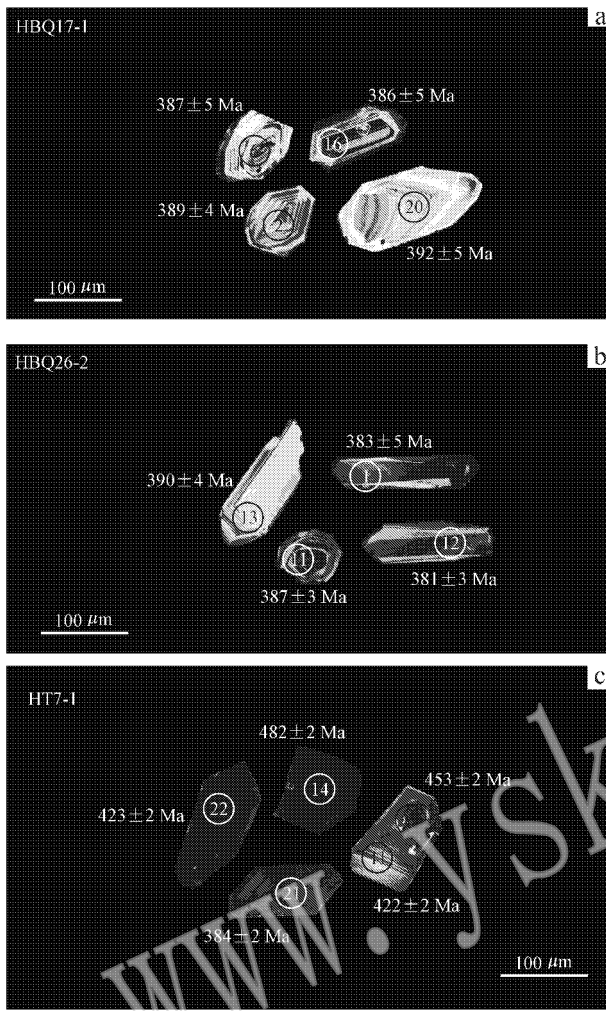


图2 黑龙江省东部中泥盆世火山岩部分锆石
阴极发光图像

Fig. 2 CL images of selected zircons from the middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province

汤原地区原定早泥盆世宝泉组(D_1b)上段流纹岩(HT7-1)中锆石呈半自形-自形板状或短柱状,发育细微震荡生长环带(图2c),Th/U比值介于0.30~0.96之间,表明其岩浆成因特点(Koschek, 1993)。定年结果表明,底部5个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 $379 \pm 2 \sim 386 \pm 2 \text{ Ma}$ 之间,其加权平均年龄为 $383 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=1.8)(图3c),代表了流纹岩的形成时代为中泥盆世(D_2b)。该组火山岩还存在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄分别为 $422 \pm 2 \text{ Ma}$ ($n=8$; MSWD=1.4)、 $453 \pm 3 \text{ Ma}$ ($n=8$; MSWD=1.9)和 $485 \pm 8 \text{ Ma}$ ($n=3$; MSWD=2.3)的捕获锆石年龄,这与前人对该组底部长石砂岩和滨东地区早泥盆世黑龙宫组砂岩中碎屑锆石年龄相吻合(Meng *et al.*, 2010)。

综上所述,佳木斯地块东缘老秃顶子组和小兴

安岭地区宝泉组上段火山岩中锆石U-Pb定年结果表明,它们均形成于中泥盆世,其峰期年龄为386 Ma(图3d),而并非前人所定的晚泥盆世或早泥盆世(黑龙江省地质矿产局, 1993; 曲关生等, 1997)。

3.2 地球化学

研究区中泥盆世火山岩只出露在佳木斯地块东缘宝清地区和小兴安岭南端汤原地区,分别以老秃顶子组(D_2l)和宝泉组(D_2b)上段为代表,其主量元素和微量元素分析结果见表2。

3.2.1 主量元素

老秃顶子组(D_2l)火山岩主要由流纹岩及次要的玄武质岩石组成,其 SiO_2 含量介于50.40%~78.75%之间,在55.66%~77.59%之间出现明显成分间断,具有双峰式火山岩特点(图4)。玄武质岩石具有富铝(15.66%~18.06%)、富铁(9.03%~11.77%)、高镁(2.96%~5.54%, $\text{Mg}^\# = 39 \sim 50$)($\text{Mg}^\# = 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}_{\text{tot}}^{2+})$)、富钠低钾($\text{Na}_2\text{O} = 3.23\% \sim 5.79\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.88 \sim 4.99$)等特征,在TAS图解中落在碱性、亚碱性分界线附近的玄武岩、粗面玄武岩和玄武质粗面安山岩区域内,主体属于碱性系列(图4);而流纹质岩石则具有高硅(77.59%~78.75%)、富钾(2.51%~3.10%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.32 \sim 0.36$)、贫镁(0.50%~0.72%)和过铝质的地球化学属性($\text{ACNK} = 2.20 \sim 3.31$),属于亚碱性系列(图4)。

宝泉组(D_2b)上段火山岩以流纹岩为主,其 SiO_2 含量为74.64%~76.09%; TiO_2 含量为0.14%~0.26%; Al_2O_3 含量为12.56%~12.63%; MgO 含量为0.36%~0.52%($\text{Mg}^\# = 22 \sim 27$); Na_2O 含量为2.31%~3.23%; K_2O 变化于4.01%~5.46%之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为0.42~0.81,其 $\text{ACNK} = 1.51 \sim 1.64$,属于亚碱性系列(图4)。

3.2.2 微量元素

从稀土元素球粒陨石标准化配分图解和微量元素原始地幔标准化蛛网图中可以看出,老秃顶子组火山岩玄武质岩石以富集轻稀土元素(LREE)、亏损重稀土元素(HREE)和Nb、Ta、Ti等以及弱的负钕异常为特征(图5a, 5b),其稀土总量(ΣREE)介于 $137.5 \times 10^{-6} \sim 189.7 \times 10^{-6}$ 之间($\text{La}/\text{Yb}_N = 5.87 \sim 8.73$, $\delta\text{Eu} = 0.88 \sim 0.96$, $\text{Cr} = 70.8 \times 10^{-6} \sim 106.1 \times 10^{-6}$, $\text{Co} = 18.40 \times 10^{-6} \sim 33.32 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 35.3 \times 10^{-6} \sim 48.5 \times 10^{-6}$, $\text{Zr} = 196 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$);而流纹质岩石以富集LREE、亏损HREE和明显的

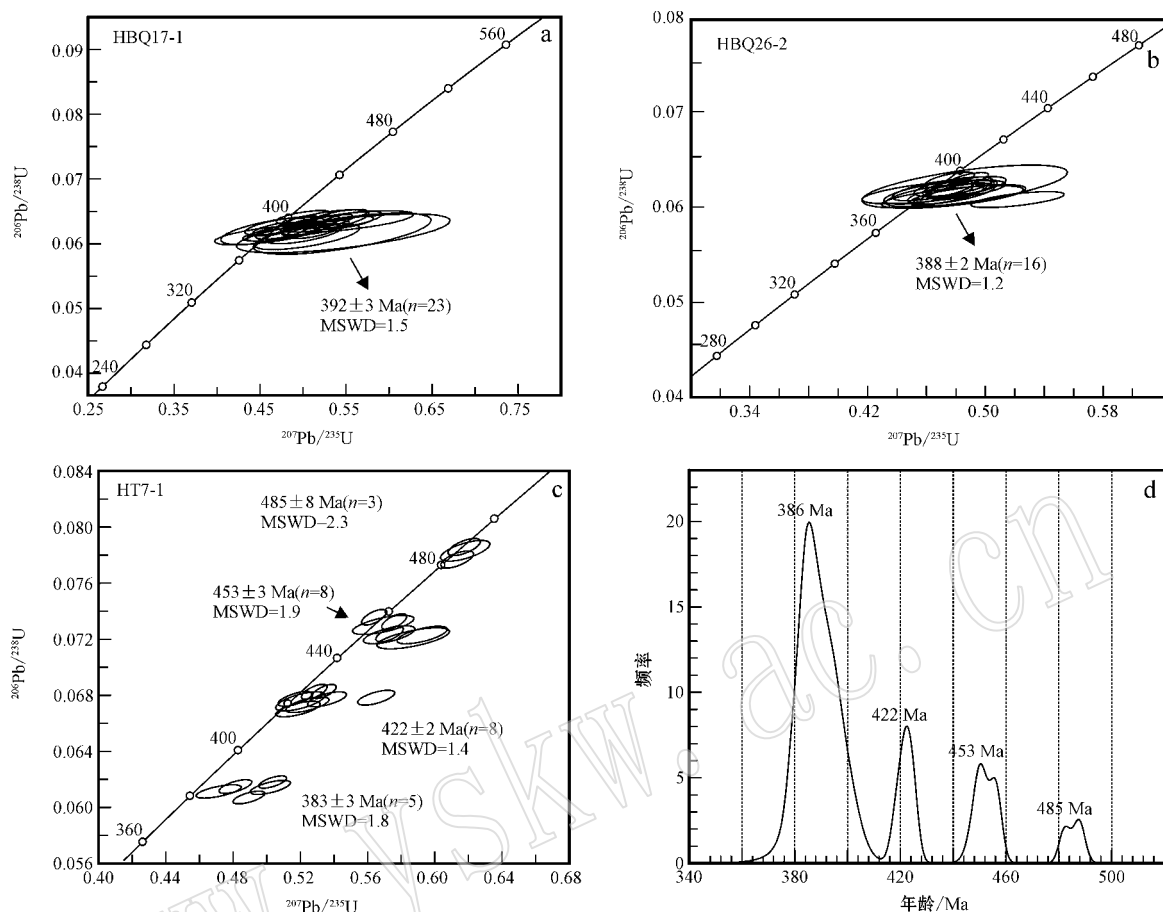


图 3 黑龙江省东部中泥盆世火山岩锆石 U-Pb 谐和图(a, b, c)和年龄频度统计图(d)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia and relative-age-probability diagrams for the middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province

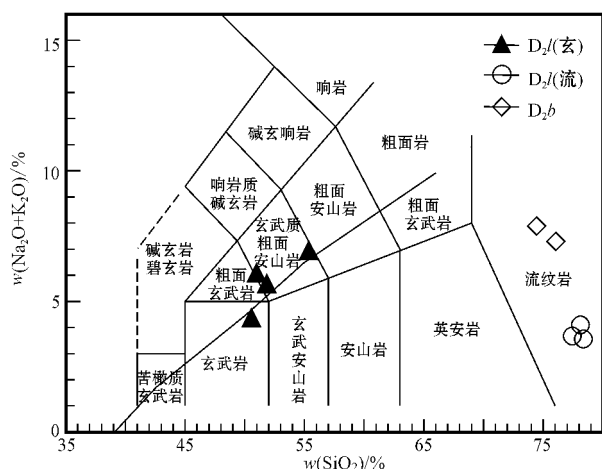


图 4 黑龙江省东部中泥盆世火山岩 TAS 图[据 Middlemost and Eric(1994) 曲线上方为碱性系列, 下方为亚碱性系列; 曲线据 Irvine and Baragar(1971)]

Fig. 4 TAS diagram for the middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province (modified after Middlemost and Eric, 1994, borderline between alkaline and sub-alkaline series after Irvine and Baragar, 1971)

负钕异常为特征(图 5c), 其 $LREE = 92.7 \times 10^{-6} \sim 181.9 \times 10^{-6}$ ($La/Yb)_N = 4.00 \sim 11.93$, $\delta Eu = 0.62 \sim 0.65$ 在微量元素蛛网图中具有 Nb、Ta、P、Ti 等的强烈亏损和 Ba、Th、U、K 等的强烈富集(图 5d)。

宝泉组上段火山岩 $\Sigma REE = 439.0 \times 10^{-6} \sim 456.6 \times 10^{-6}$ ($La/Yb)_N = 5.98 \sim 6.42$, $\delta Eu = 0.05 \sim 0.06$ 在稀土元素球粒陨石标准化配分图解和微量元素原始地幔标准化蛛网图中具有富集 LREE 和 Ba、Th、U 等大离子亲石元素(LILE)强烈亏损 HREE 和 Rb、Nb、Ta、P、Sr、Ti 等元素等特征, 并显示强烈的负钕异常(图 5c, 5d) 这均与典型 A 型流纹岩所具有的微量元素特点相类似(Whalen *et al.*, 1987; 苏玉平等, 2005)。

3.3 Sr-Nd 同位素

佳木斯地块东缘老秃顶子组火山岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2。从表中可以看出, 该组玄武岩样品的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值分别为 0.706 65

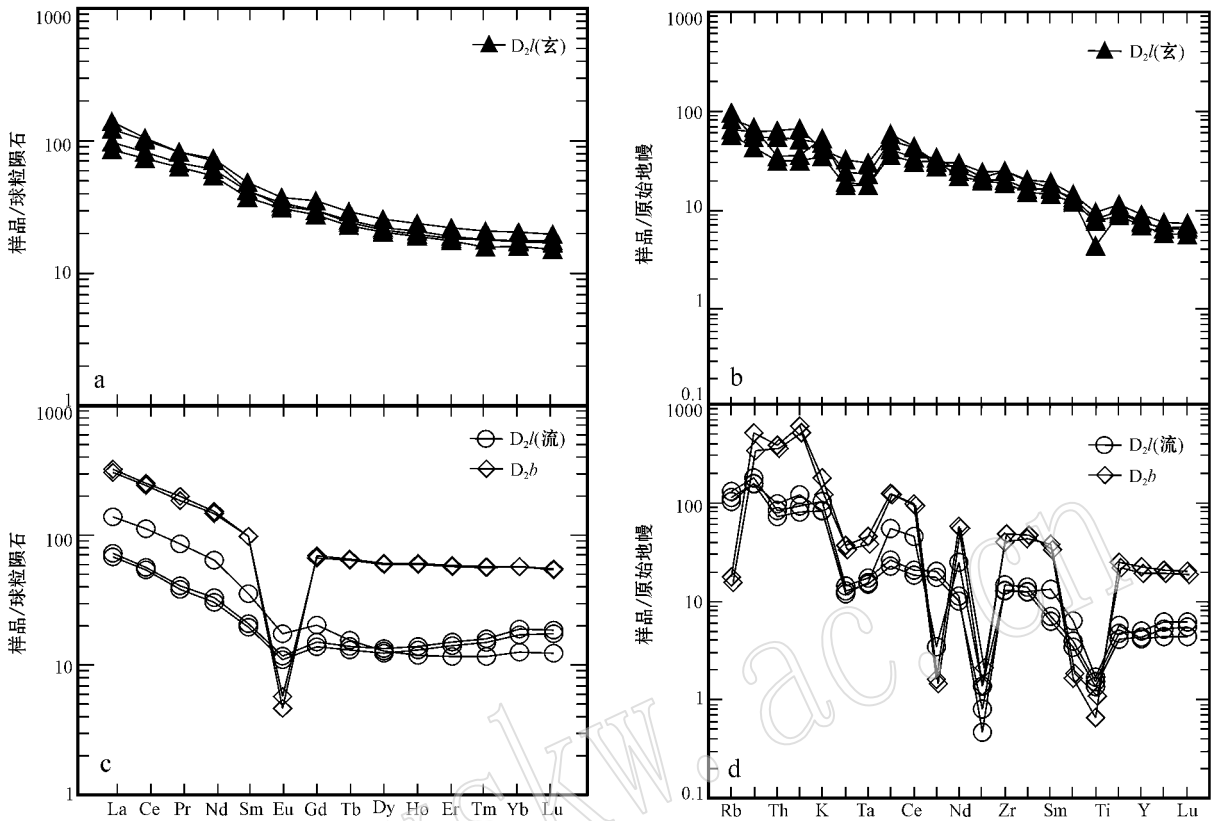


图 5 黑龙江省东部中泥盆世火山岩球粒陨石标准化 REE 配分图解 (a, c) 和原始地幔标准化微量元素 (b, d) 蛛网图
[球粒陨石标准化值据 Boynton (1984) , 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough (1989)]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive mantle-normalized trace element spider (b, d) diagrams for the middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized values after Boynton, 1984 and Sun and McDonough, 1989, respectively)

和 0.512 58 , 以该期火山岩形成峰期年龄 386 Ma 计算 (图 3d) , 其 I_{Sr} 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.705 99 和 +2.05 , t_{DM1} 和 t_{DM2} 分别为 1 059 Ma 和 925 Ma , 而流纹岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.711 65 ~ 0.725 31 和 0.512 24 ~ 0.512 30 , I_{Sr} 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.703 78 ~ 0.707 36 和 -2.20 ~ -4.15 , 其 t_{DM1} 和 t_{DM2} 分别为 1 214 ~ 1 543 Ma 和 1 344 ~ 1 450 Ma 。 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - I_{\text{Sr}}$ 变异图解中 , 所有样品均落在兴蒙造山带东段显生宙花岗岩区域内 (图 6a) , 暗示老秃顶子组火山岩具有与兴蒙造山带东段显生宙花岗岩具有相近的岩浆源区 (Chen *et al.* , 2000 , 2009 ; Wu *et al.* , 2002 ; Xu *et al.* , 2009) 。

3.4 锆石 Hf 同位素

本文在对研究区中泥盆世火山岩中锆石 La-ICP-MS U-Pb 定年研究基础上 , 同时对锆石进行了

微区原位 Hf 同位素分析 , 分析结果列于表 3 。

老秃顶子组两个流纹岩样品 (HBQ17-1 和 HBQ26-2) 锆石 U-Pb 定年结果表明 , 它们均形成于中泥盆世 (峰期分别为 392 Ma 和 388 Ma) 。 锆石微区原位 Hf 同位素分析结果表明 , 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 597 ~ 0.282 736 和 ~ 0.282 631 ~ 0.282 789 之间 , 分别以其峰期年龄 (图 3a , 3b) 计算 , 锆石初始 Hf 同位素成分 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别介于 +1.6 ~ +6.7 和 +2.8 ~ +8.6 之间 , 其 Hf 同位素单阶段模式年龄 t_{DM1} 分别变化于 760 ~ 998 Ma 和 671 ~ 998 Ma , 二阶段模式年龄 t_{DM2} 分别变化于 850 ~ 1 108 Ma 和 746 ~ 1 044 Ma (表 3) 。 而宝泉组上段流纹岩中 4 颗代表其形成时代的岩浆锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 611 ~ 0.282 696 之间 , 以其形成年龄 383 Ma 计算 (图 3c) , 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +1.7 ~ +4.8 之间 , 它们的 $t_{\text{DM1}} = 837 \sim 983$ Ma , $t_{\text{DM2}} = 935$

表 2 黑龙江省东部中泥盆世火山岩的主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)和 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 2 Major elements($w_B/\%$), trace elements($w_B/10^{-6}$) and Sr-Nd isotopic data for middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province

样品	HBQ17-1	HBQ26-2	HBQ27-1	HBQ28-1	HBQ35-1	HBQ35-3	HBQ35-7	HT7-1	HT7-3
SiO ₂	78.75	78.18	50.40	77.59	50.80	51.54	55.66	74.64	76.09
TiO ₂	0.37	0.33	1.56	0.34	1.64	1.95	0.87	0.14	0.26
Al ₂ O ₃	11.76	11.64	17.13	11.62	16.85	15.66	18.06	12.63	12.56
TFe ₂ O ₃ ^{a)}	3.91	2.23	10.57	2.49	10.96	11.77	9.03	2.74	2.57
MnO	0.09	0.07	0.17	0.06	0.17	0.17	0.18	0.03	0.03
MgO	0.50	0.72	5.33	0.54	5.50	4.90	2.96	0.52	0.36
CaO	0.13	1.21	8.57	1.08	6.59	6.72	4.85	0.58	0.41
Na ₂ O	0.91	0.98	3.23	0.92	4.38	4.27	5.79	2.31	3.23
K ₂ O	2.51	3.10	1.01	2.87	1.52	1.38	1.16	5.46	4.01
P ₂ O ₅	0.03	0.01	0.40	0.02	0.42	0.50	0.44	0.03	0.05
LOI ^{b)}	1.00	1.19	1.10	1.26	1.20	1.20	1.31	0.45	0.63
TOTAL	99.95	99.66	99.48	98.79	100.03	100.05	100.31	99.53	100.20
Mg [#] ^{c)}	0.20	0.39	0.50	0.30	0.50	0.45	0.39	0.27	0.22
Na ₂ O/K ₂ O	0.36	0.32	3.20	0.32	2.88	3.09	4.99	0.42	0.81
A/CNK ^{d)}	3.31	2.20	1.34	2.39	1.35	1.27	1.53	1.51	1.64
δEu ^{e)}	0.62	0.65	0.96	0.65	0.95	0.88	0.89	0.05	0.06
Be	1.83	2.71	1.39	2.79	1.39	1.46	1.38	4.65	3.00
Sc	7.67	6.43	27.12	6.55	27.60	29.79	13.71	2.21	2.14
V	46.1	22.0	208.4	22.3	197.0	238.2	129.0	11.0	7.7
Cr	20.69	18.20	106.10	18.87	96.75	70.82	72.38	7.30	7.20
Co	9.96	2.81	33.32	2.87	32.97	31.38	18.40	1.25	1.21
Ni	10.32	5.51	48.53	5.57	47.46	35.30	42.25	3.67	4.14
Cu	21.00	3.73	43.95	3.69	47.10	41.26	47.91	2.72	1.95
Zn	58.6	43.9	94.2	44.4	93.2	107.3	129.4	178.8	42.1
Ga	15.1	17.0	19.7	17.1	21.5	21.1	22.0	31.8	27.7
Rb	99.0	113.9	26.0	115.2	41.8	32.7	38.0	324.6	241.5
Sr	73.0	422.0	625.5	426.2	686.8	619.1	553.2	34.1	33.9
Y	18.7	22.4	29.3	22.5	32.5	38.0	32.3	102.7	97.1
Zr	146	164	196	166	216	266	263	452	599
Nb	8.5	10.3	11.9	10.4	12.8	16.5	21.8	26.2	26.2
Cs	7.64	5.44	5.28	5.48	2.71	4.25	1.71	10.05	7.55
Ba	730	908	383	915	562	656	434	124	122
La	38.0	17.8	23.4	18.1	26.6	33.5	38.8	85.8	91.4
Ce	80.3	6.4	51.9	37.3	57.7	72.0	75.3	174.6	183.2
Pr	9.19	3.88	6.59	3.97	7.21	8.83	8.83	19.99	21.69
Nd	33.5	15.3	28.0	15.5	31.6	38.4	36.6	78.7	81.8
Sm	5.91	3.15	6.08	3.17	6.84	8.14	7.07	16.68	16.60
Eu	1.07	0.66	1.90	0.66	2.09	2.29	1.99	0.27	0.34
Gd	4.44	2.95	5.90	2.98	6.43	7.64	6.42	15.66	14.88
Tb	0.61	0.50	0.89	0.52	0.99	1.16	0.94	2.70	2.62
Dy	3.38	3.27	5.34	3.28	5.85	6.83	5.53	16.94	16.56
Ho	0.70	0.76	1.10	0.77	1.22	1.41	1.15	3.73	3.66
Er	2.02	2.40	2.99	2.45	3.23	3.77	3.11	10.50	10.43
Tm	0.31	0.39	0.41	0.40	0.47	0.55	0.47	1.60	1.58
Yb	2.15	3.00	2.68	2.99	2.94	3.48	3.00	10.31	10.33
Lu	0.33	0.46	0.39	0.47	0.44	0.51	0.46	1.50	1.51
Hf	3.90	4.33	4.38	4.38	4.76	5.93	5.80	13.31	15.90
Ta	0.64	0.70	0.69	0.70	0.69	0.90	1.16	1.85	1.73
Pb	13.00	24.62	7.86	24.86	11.24	8.75	10.47	68.85	39.86
Th	8.2	7.2	2.5	7.2	2.9	4.4	5.2	32.9	34.0

续表 2
Continued Table 2

样品	HBQ17-1	HBQ26-2	HBQ27-1	HBQ28-1	HBQ35-1	HBQ35-3	HBQ35-7	HT7-1	HT7-3
U	2.57	1.94	0.62	1.94	0.71	1.05	1.36	12.78	12.14
ΣREE	181.9	91.0	137.5	92.7	153.5	188.5	189.7	439.0	456.6
(La/Yb) _N ^(f)	11.93	4.00	5.87	4.10	6.10	6.49	8.73	5.61	5.97
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	3.92	0.78	0.12	1.18					
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.725 31	0.711 65	0.706 65	0.712 88					
2σ	0.000 04	0.000 04	0.000 09	0.000 04					
I _{sr}	0.703 78	0.707 36	0.705 99	0.706 37					
error	0.000 01	0.000 01	0.000 01	0.000 03					
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.106 81	0.124 23	0.131 32	0.106 81					
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 27	0.512 24	0.512 58	0.512 30					
2σ	0.000 01	0.000 01	0.000 01	0.000 01					
t/Ma	386	386	386	386					
εNd(0)	-7.13	-7.72	-1.18	-6.63					
εNd(t)	-2.70	-4.15	2.05	-2.20					
f _{Sm/Nd}	-0.46	-0.37	-0.33	-0.46					
t _{DM}	1 250	1 543	1 059	1 214					
t _{DM2}	1 385	1 450	925	1 344					

注 a) TF_{e2O3} : 全铁含量; b) LOI : 烧失量; c) Mg[#] = [Mg/(Mg + Fe_{tot}²⁺)]; d) A/CNK = [Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)]; e) δEu = (Eu/0.073 5)(Sm/0.195)+(Gd/0.259)/2 - 3; f) (La/Yb)_N : N 为球粒陨石标准化数值。

~1 098 Ma ;而对分别形成于 422 Ma(*n* = 6) 453 Ma(*n* = 7)和 485 Ma(*n* = 3)的 16 颗捕获锆石的 Hf 同位素分析表明 ,它们具有与形成于 383 Ma 的锆石一致的 Hf 同位素组成 ,其 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282 938~0.283 089 ,εHf(*t*)= + 2.5 ~ + 6.4 , *t*_{DM1} = 818~981 Ma , *t*_{DM2} = 910~1 091 Ma。

Hf 同位素分析结果显示 ,研究区老秃顶子组和

宝泉组上段流纹岩中岩浆锆石以及捕获锆石的 εHf(*t*)值均大于 0 ,在 Hf 同位素特征图解上 ,全部位于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间 ,具有亏损地幔演化趋势 ,与兴蒙造山带东段 εHf(*t*)值分布范围相重合(图 6b) ,明显区别于燕山褶皱带的 εHf(*t*)分布范围(Yang *et al.* , 2006)。

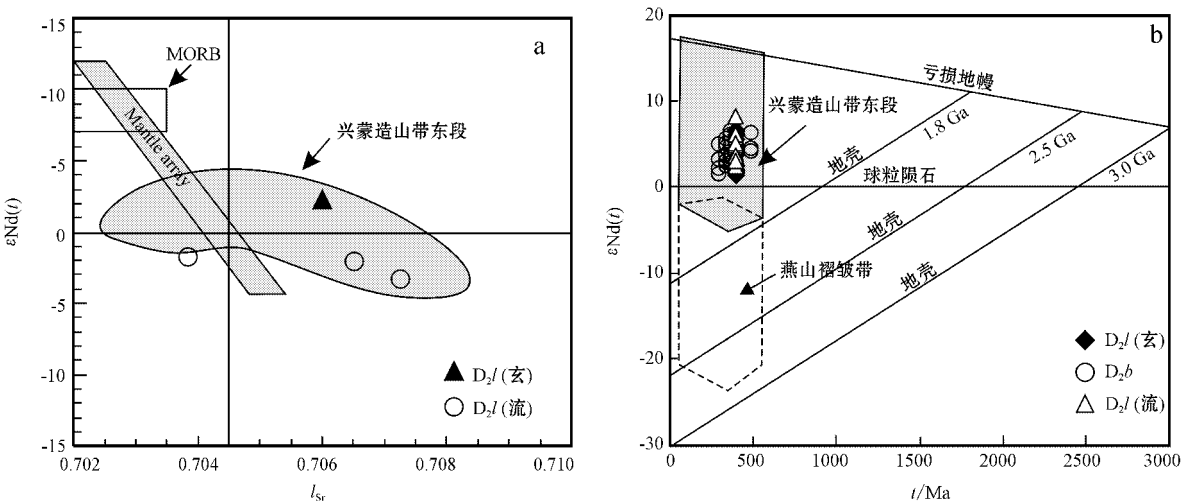


图 6 黑龙江省东部中泥盆世老秃顶子组火山岩的 Sr-Nd 同位素(a)和锆石 Hf 同位素(b)特征

Fig. 6 Correlations between Sr-Nd isotopic composition(a) and Correlations between Hf isotopic compositions and ages of zircons (b) from the volcanic rocks of the middle Devonian Laotudingzi Formation in eastern Heilongjiang Province

表 3 黑龙江省东部中泥盆世火山岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic data for middle Devonian volcanic rocks in eastern Heilongjiang Province

样号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$\varepsilon \text{ Hf}(0)$	$\varepsilon \text{ Hf}(t)$	2σ	t_{DMT}/Ma	t_{DME}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
HBQ17-1-01	392	0.074 057	0.002 547	0.282 686	0.282 690	0.000 025	-3.0	4.9	0.9	835	938	-0.92
HBQ17-1-02	392	0.064 536	0.002 361	0.282 599	0.282 602	0.000 022	-6.1	1.9	0.8	959	1 094	-0.93
HBQ17-1-03	392	0.064 609	0.002 397	0.282 679	0.282 682	0.000 019	-3.3	4.7	0.7	843	950	-0.93
HBQ17-1-04	392	0.117 267	0.003 990	0.282 603	0.282 606	0.000 022	-6.0	1.6	0.8	998	1 108	-0.88
HBQ17-1-05	392	0.032 908	0.001 205	0.282 644	0.282 648	0.000 021	-4.5	3.8	0.7	865	997	-0.96
HBQ17-1-06	392	0.068 706	0.002 464	0.282 668	0.282 671	0.000 017	-3.7	4.3	0.6	861	971	-0.93
HBQ17-1-07	392	0.060 849	0.002 145	0.282 732	0.282 736	0.000 025	-1.4	6.7	0.9	760	850	-0.94
HBQ17-1-08	392	0.091 481	0.003 242	0.282 724	0.282 727	0.000 024	-1.7	6.1	0.8	796	879	-0.90
HBQ17-1-09	392	0.077 219	0.002 805	0.282 622	0.282 625	0.000 019	-5.3	2.6	0.7	937	1 059	-0.92
HBQ17-1-10	392	0.057 028	0.002 159	0.282 701	0.282 705	0.000 021	-2.5	5.6	0.7	805	906	-0.93
HBQ17-1-11	392	0.054 445	0.001 880	0.282 594	0.282 597	0.000 021	-6.3	1.8	0.7	954	1 096	-0.94
HBQ17-1-12	392	0.024 880	0.001 033	0.282 610	0.282 614	0.000 022	-5.7	2.6	0.8	909	1 055	-0.97
HBQ17-1-13	392	0.028 188	0.001 029	0.282 597	0.282 600	0.000 029	-6.2	2.1	1.0	928	1 080	-0.97
HBQ26-2-01	388	0.062 594	0.002 054	0.282 721	0.282 725	0.000 017	-1.8	6.2	0.6	773	869	-0.94
HBQ26-2-02	388	0.113 344	0.003 959	0.282 705	0.282 709	0.000 022	-2.4	5.1	0.8	841	924	-0.88
HBQ26-2-03	388	0.085 025	0.002 647	0.282 699	0.282 703	0.000 017	-2.6	5.3	0.6	819	917	-0.92
HBQ26-2-04	388	0.060 987	0.002 283	0.282 650	0.282 653	0.000 019	-4.3	3.6	0.7	883	1 001	-0.93
HBQ26-2-05	388	0.067 756	0.002 387	0.282 731	0.282 734	0.000 020	-1.5	6.5	0.7	767	856	-0.93
HBQ26-2-06	388	0.066 105	0.002 333	0.282 698	0.282 702	0.000 019	-2.6	5.3	0.7	813	914	-0.93
HBQ26-2-07	388	0.067 248	0.002 267	0.282 649	0.282 653	0.000 015	-4.3	3.6	0.5	883	1 002	-0.93
HBQ26-2-08	388	0.045 335	0.001 554	0.282 786	0.282 789	0.000 014	0.5	8.6	0.5	671	746	-0.95
HBQ26-2-09	388	0.096 207	0.003 300	0.282 669	0.282 673	0.000 020	-3.6	4.0	0.7	879	980	-0.90
HBQ26-2-10	388	0.067 086	0.002 280	0.282 695	0.282 698	0.000 017	-2.7	5.2	0.6	817	920	-0.93
HBQ26-2-11	388	0.069 187	0.002 398	0.282 627	0.282 631	0.000 015	-5.1	2.8	0.5	919	1 044	-0.93
HBQ26-2-12	388	0.122 173	0.004 227	0.282 675	0.282 679	0.000 018	-3.4	4.0	0.6	893	981	-0.87
HBQ26-2-13	388	0.074 263	0.002 471	0.282 674	0.282 678	0.000 015	-3.5	4.4	0.5	852	960	-0.93
HBQ26-2-14	388	0.062 381	0.001 990	0.282 644	0.282 647	0.000 017	-4.5	3.5	0.6	885	1 009	-0.94

续表 3
Continued Table 3

样号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	f_{LU}/Hf
HT7-1-01	383	0.108 513	0.003 352	0.282 625	0.282 629	0.000 017	-5.2	2.4	0.6	947	1 061	-0.90
HT7-1-02	383	0.103 421	0.003 119	0.282 645	0.282 649	0.000 018	-4.5	3.1	0.6	911	1 022	-0.91
HT7-1-03	383	0.102 625	0.003 010	0.282 693	0.282 696	0.000 024	-2.8	4.8	0.9	837	935	-0.91
HT7-1-04	383	0.123 572	0.003 689	0.282 607	0.282 611	0.000 026	-5.8	1.7	0.9	983	1 098	-0.89
HT7-1-05	422	0.128 796	0.003 970	0.282 642	0.282 646	0.000 021	-4.6	3.6	0.8	937	1 031	-0.88
HT7-1-06	422	0.094 229	0.002 487	0.282 614	0.282 617	0.000 016	-5.6	3.0	0.6	941	1 062	-0.93
HT7-1-07	422	0.069 172	0.002 043	0.282 665	0.282 669	0.000 022	-3.8	4.9	0.8	855	962	-0.94
HT7-1-08	422	0.086 602	0.002 605	0.282 658	0.282 662	0.000 022	-4.0	4.5	0.8	879	983	-0.92
HT7-1-09	422	0.067 639	0.001 816	0.282 681	0.282 685	0.000 016	-3.2	5.6	0.6	827	930	-0.95
HT7-1-10	422	0.135 688	0.003 941	0.282 613	0.282 616	0.000 023	-5.6	2.5	0.8	981	1 084	-0.88
HT7-1-11	453	0.079 249	0.002 317	0.282 616	0.282 620	0.000 016	-5.5	3.8	0.6	933	1 047	-0.93
HT7-1-12	453	0.068 725	0.001 912	0.282 689	0.282 692	0.000 016	-3.0	6.4	0.6	818	910	-0.94
HT7-1-13	453	0.094 470	0.002 715	0.282 608	0.282 612	0.000 020	-5.8	3.4	0.7	955	1 068	-0.92
HT7-1-14	453	0.057 557	0.001 591	0.282 592	0.282 596	0.000 014	-6.4	3.1	0.5	949	1 080	-0.95
HT7-1-15	453	0.118 050	0.003 268	0.282 691	0.282 695	0.000 021	-2.8	6.1	0.7	845	926	-0.90
HT7-1-16	453	0.088 896	0.002 412	0.282 593	0.282 596	0.000 015	-6.3	2.9	0.5	969	1 091	-0.93
HT7-1-17	453	0.072 911	0.002 028	0.282 639	0.282 643	0.000 019	-4.7	4.7	0.7	892	1 001	-0.94
HT7-1-18	483	0.098 621	0.002 909	0.282 618	0.282 621	0.000 017	-5.5	4.2	0.6	946	1 047	-0.91
HT7-1-19	485	0.064 822	0.002 077	0.282 604	0.282 608	0.000 014	-5.9	4.1	0.5	944	1 058	-0.94
HT7-1-20	485	0.104 815	0.003 123	0.282 674	0.282 678	0.000 019	-3.4	6.2	0.7	867	947	-0.91

4 讨论

4.1 黑龙江省东部中泥盆世火山作用及其对晚古生代早期地层沉积时代的限定

根据前人对黑龙江省和东北区域地层清理的研究成果,出露于佳木斯地块东缘宝清地区的老秃顶子组火山岩和小兴安岭地区汤原地区的宝泉组上段火山岩的形成时代分别被置于晚泥盆世和早泥盆世(黑龙江省地质矿产局,1993)。然而由于缺乏古生物年代学和同位素年代学证据,其时代的确定主要是通过区域地层对比,可信度较低,这制约了对区域构造演化的深化认识。鉴于此,本文采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法对这两个组火山岩进行了年代学研究。

老秃顶子组和宝泉组上段火山岩中锆石发育典型岩浆生长环带或具条痕状吸收,结合其高的 Th/U 比值(0.28~1.64),暗示了它们的岩浆结晶成因,可以认为这些锆石的定年结果反映了火山岩的形成时代。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明,老秃顶子组两个流纹岩和宝泉组上段流纹岩的形成时代分别为 392 ± 3 Ma、 388 ± 2 Ma 和 383 ± 3 Ma(图 3a, 3b, 3c),在误差范围内完全一致,均形成于中泥盆世(峰期为 386 Ma,图 3d),揭示佳木斯地块东缘和小兴安岭地区存在中泥盆世火山作用。结合 Meng 等(2010)对该区老秃顶子组下伏早泥盆世黑台组和宝泉组下段砂岩中碎屑锆石的年代学研究结果——即早泥盆世黑台组和宝泉组下段的沉积作用分别发生于 484 Ma 和 413 Ma 之后,笔者认为研究区晚古生代早期以黑台组和宝泉组下段为主的佳木斯地块东缘宝清盆地和小兴安岭南部落原盆地的沉积时限分别介于 484~392 Ma 和 413~388 Ma 之间。

此外,宝泉组上段流纹岩中捕获锆石(Th/U 比值介于 0.28~0.96 之间)还显示了早古生代(422、453 和 485 Ma)岩浆事件的存在,这与宝泉组下段长石石英砂岩中碎屑锆石(Meng *et al.*, 2010)和牡丹江断裂西侧小兴安岭至张广才岭地区存在 3 期岩浆事件(刘建峰等,2008;Wang *et al.*, 2011)的年代学研究结果相吻合。

4.2 岩浆源区

4.2.1 中泥盆世老秃顶子组火山岩

地球化学分析结果显示,佳木斯地块东缘中泥盆世老秃顶子组火山岩具有双峰式火山岩特点(王

焰等,2000)。基性端员岩石显示低的 SiO_2 含量、富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=2.88\sim4.99$)、富镁($\text{Mg}^\# = 39\sim50$)及较高的 Cr($70.8 \times 10^{-6} \sim 106.1 \times 10^{-6}$)、Co($18.40 \times 10^{-6} \sim 33.32 \times 10^{-6}$)、Ni($35.3 \times 10^{-6} \sim 48.5 \times 10^{-6}$)含量等特征,结合其正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+2.05),暗示其原始岩浆应起源于亏损的岩石圈地幔(Saunders *et al.*, 1992; Xu *et al.*, 2004)。基性端员岩石痕量元素特征显示其具有明显高于岛弧玄武岩的 Zr 含量($196 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(6.63~8.16)(Kelemen *et al.*, 2003; 夏林圻等, 2007),结合其主量元素碱性特征、LREE 和 Rb、Ba 的富集以及高的 Nb/U(15.8~19.1)、Ta/U(0.7~1.2)和 Ce/Pb 比值(5.1~8.2)等特征,表明痕量元素中 Nb、Ta 和 Ti 的亏损应是岩浆源区受到陆壳物质的混染作用造成的(Taylor and McLennan, 1985; Hofmann, 1988; Saunders *et al.*, 1992; Jahn *et al.*, 1999),而并非源区金红石等富 HFSE 矿物残留(Ionov *et al.*, 1999)或俯冲带流体或熔体对岩石圈地幔交代作用所致(Gill, 1987; Kelemen *et al.*, 2003)。因此笔者认为研究区老秃顶子组基性端员岩浆应起源于亏损的岩石圈地幔,岩浆演化过程中遭受了地壳的混染作用。

中泥盆世老秃顶子组(D_2b)酸性端员岩石具有高硅($\text{SiO}_2 = 77.59\% \sim 78.75\%$)、富钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.32 \sim 0.36$)、低铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.62\% \sim 11.76\%$)、富集 Rb、Th、U、K,亏损 Nb、Ta、Eu、P、Ti 等特征,其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.703 78~0.707 36, $\epsilon\text{Nd}(t) = -2.20 \sim -4.15$, $\epsilon\text{Hf}(t) = +1.8 \sim +8.6$, $t_{\text{DMI}} = 671 \sim 998$ Ma,与中亚造山带内显生宙花岗岩的研究结果相一致(图 6),暗示其岩浆应起源于新增生下地壳物质的部分熔融(Chen *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002)。

4.2.2 中泥盆世宝泉组上段火山岩

地球化学分析结果显示,小兴安岭地区中泥盆世宝泉组上段火山岩具有 A 型流纹岩特点(Whalen *et al.*, 1987; 苏玉平等, 2005),其高硅($\text{SiO}_2 = 74.64\% \sim 76.09\%$)、富钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.42 \sim 0.81$)、强烈负钕异常、富集 Ba、Th、U 以及 Rb、Nb、Ta、P、Sr、Ti 等元素的强烈亏损等特征,结合其锆石 Hf 同位素分析结果[$\epsilon\text{Hf}(t) = +2.5 \sim +6.4$, $t_{\text{DMI}} = 837 \sim 983$ Ma](图 6b),暗示其岩浆应起源于新增生下地壳物质的部分熔融(Chen *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002)。

4.3 中泥盆世火山岩形成的构造背景

4.3.1 佳木斯地块东缘中泥盆世老秃顶子组火山岩

双峰式火山岩多是拉张构造背景条件下的产物,可形成于大陆裂谷、洋岛环境、洋内岛弧、初始弧后盆地、大陆拉张减薄环境等大地构造环境(Brouxel *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990; Pearce *et al.*, 1995, 1999; 王焰等, 2000)。不同构造环境形成的双峰式火山岩具有不同的岩石组合和地球化学属性,如大陆裂谷以富碱质岩石组合碱性玄武岩-碧玄岩-白榴岩-响岩-碱性流纹岩等组成为主(Wilson, 1989);洋岛环境以玄武岩为主,流纹岩所占比例非常低为特征(Christiansen, 1984; Geist *et al.*, 1995);大陆拉张减薄环境下双峰式火山岩成分比较复杂(Foder and Vetter, 1984);而洋内岛弧、成熟岛弧以及初始弧后盆地环境下基性岩类多以岛弧拉斑玄武岩或钙碱性岩石组合为主(Brouxel *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990; Pin and Paquette, 1997)。

老秃顶子组火山岩主要由流纹岩及次要的碱性玄武岩组成。其地球化学和同位素分析结果显示,基性端员岩石中 Nb、Ta、Ti 的亏损是陆壳物质的混染作用所致,因而,尽管在经典的以包含有 Nb、Ta、Ti 等元素作为判别因子的 $\text{Th/Yb} - \text{Ta/Yb}$ 及 $\text{Hf/3} - \text{Th} - \text{Ta}$ 等变异图解(未显示)中落入岛弧环境区域内(Pearce, 1982),也不能据此认为它们形成于岛弧环境。这主要是因为:①该组岩石组合与典型大陆裂谷、洋内岛弧及成熟岛弧等环境下双峰式火山岩组合明显不同,暗示其可能形成于大陆的拉张减薄环境(Foder *et al.*, 1984);②由于地壳混染作用对 Zr 、Y 等元素的浓度影响不大,因而可以根据 Zr 含量和 Zr/Y 比值来对具有消减带信号的基性熔岩的形成环境加以限定,而老秃顶子组基性端员岩石具有大陆板内玄武岩所特有的高的 Zr 含量和 Zr/Y 比值(图7)结合其主量元素特征表明中泥盆世该区应处于一种伸展构造环境。此外,区域地质资料揭示,中泥盆世老秃顶子组整合覆盖于早泥盆世黑龙江组(D_{1h})之上,其上覆地层为晚泥盆世七里嘎山组(D_{3q})和早石炭世北兴组(C_{1b})。黑龙江组为一套稳定的海相-陆相的碳酸盐岩-碎屑岩组合,其中灰岩产海相生物化石,七里嘎山组(D_{3q})为一套产植物化石的紫色凝灰质板岩、细砂粉夹英安质凝灰岩组合,而与其整合接触的上覆地层北兴组仍然为一套海陆交互稳定沉积的灰色及灰黑色凝灰岩板岩为

主夹中细粒砂岩,产腕足类化石(黑龙江省地质矿产局, 1993; 曲关生等, 1997),这表明该区在早泥盆世至早石炭世应处于一个被动大陆边缘的构造环境。由于被动大陆边缘的形成是由一系列伸展构造使地壳拉张变薄所致,在拉张过程中,必然导致一系列偏碱性火山活动,这与上述老秃顶子组火山岩的岩石组合及地球化学属性相吻合,这也揭示了中泥盆世佳木斯地块东缘应处于一个次稳定-非稳定的被动大陆边缘盆地沉积环境,而老秃顶子组双峰式火山岩的形成应与被动陆缘内的伸展环境相联系。

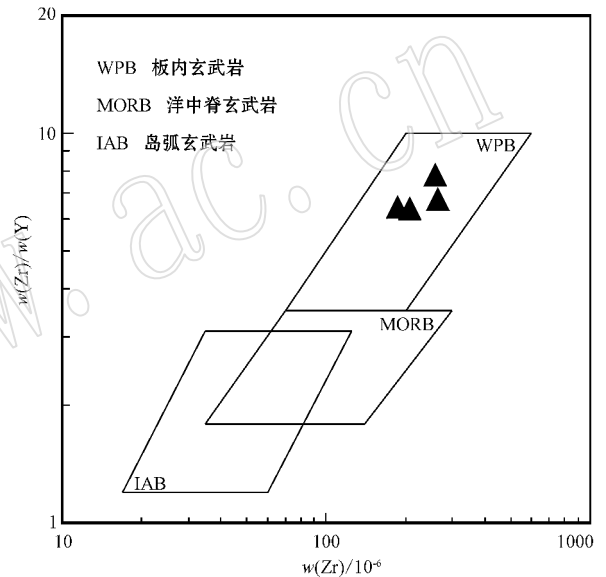


图7 老秃顶子组火山岩的 $\text{Zr/Y} - \text{Zr}$ 变异图解
(据 Pearce, 1982)

Fig. 7 (Zr/Y) versus Zr diagram for volcanic rocks of the Middle Devonian Laotudingzi Formation (after Pearce, 1982)

4.3.2 小兴安岭地区中泥盆世宝泉组上段火山岩

该区中泥盆世宝泉组上段(D_2b)火山岩的地球化学分析结果揭示其具有 A 型流纹岩特点(Whalen *et al.*, 1987; 苏玉平等, 2005),应形成于伸展的构造环境(Pitcher, 1993)。在微量元素 $\text{Rb} - \text{Y} + \text{Nb}$ (图 8a) 和 $\text{Nb} - \text{Y}$ (图 8b) 构造环境判别图解中,流纹岩样品均投影于板内环境区域内(图 8, Pearce *et al.*, 1984),这与它们所具有的 A 型流纹岩的性质相一致,进一步暗示小兴安岭地区中泥盆世应处于板内伸展的构造背景。结合本文佳木斯地块东缘在中泥盆世处于被动大陆边缘的构造环境以及佳木斯地块和松嫩-张广才岭地块在早泥盆世以前已经拼贴在一起的研究成果(Meng *et al.*, 2010; Wang *et al.*,

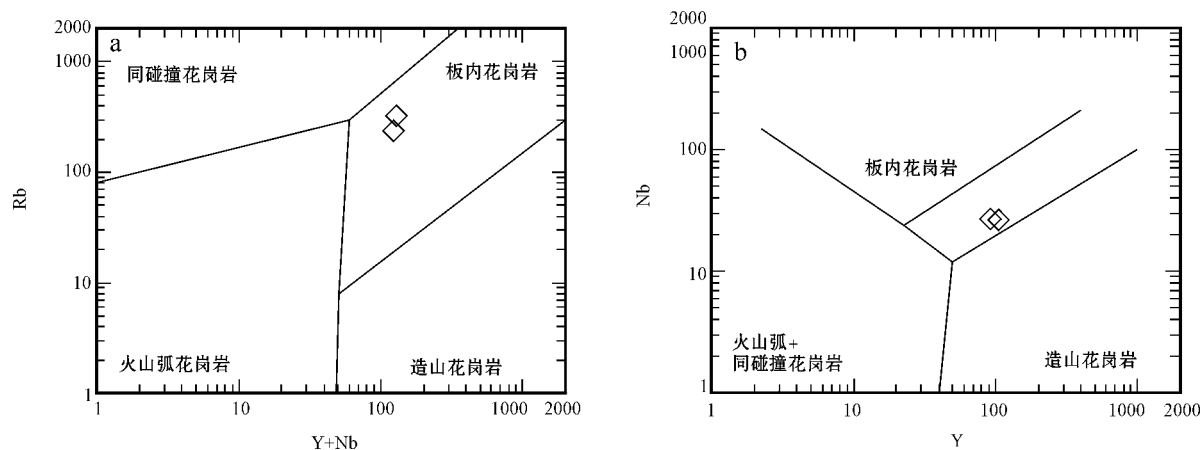


图 8 宝泉组上段火山岩的 Rb - Y + Nb (a) 和 Nb - Y (b) 变异图解 (据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Rb versus (Y + Nb) diagram (a) and Nb versus Y diagram (b) for volcanic rocks of the Middle Devonian Baoquan Formation (after Pearce *et al.*, 1984)

2011) 暗示小兴安岭地区中泥盆世宝泉组上段 A 型流纹岩应形成于一种陆内伸展构造环境。

5 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 佳木斯地块东缘老秃顶子组和小兴安岭地区宝泉组上段火山岩的形成时代分别为 392 ± 3 Ma、 388 ± 2 Ma 和 383 ± 3 Ma, 均形成于中泥盆世, 揭示黑龙江省东部存在中泥盆世火山作用;

(2) 佳木斯地块东缘中泥盆世老秃顶子组火山岩主要由流纹岩及次要的碱性玄武岩组成, 具有双峰式组合特点。基性端员岩浆应起源于亏损的岩石圈地幔, 岩浆演化过程中遭受了地壳的混染作用; 而酸性端员岩浆应起源于新增生下地壳物质的部分熔融。老秃顶子组双峰式火山岩形成于被动陆缘内的伸展环境;

(3) 小兴安岭地区中泥盆世宝泉组上段火山岩具有 A 型流纹岩特点, 岩浆起源于新增生下地壳的部分熔融, 并形成于陆内伸展的构造环境。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63-114.
Brouxel M, Lapierre H, Michard A, *et al.* 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley-Blaklala series, northern California [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 85: 386-400.
Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Sr-Nd isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and fore-arc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245-257.
Chen B, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 328: 157-182.
Christiansen R L. 1984. Yellowstone magmatic evolution: its bearing on understanding large-volume explosive volcanism [A]. *Explosive Volcanism: Inception, Evolution and Hazard* [C]. National Academy Press, Washington D C, 84-95.
Fodor R V and Vetter S K. 1984. Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88: 307-321.
Geist D, Howard K A and Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 36: 965-982.
Gill J B. 1987. Early geochemical evolution of an oceanic island arc and back arc: Fiji and the south Fiji basin [J]. *Journal of Petrology*, 95: 589-615.
HBGMR (Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources). 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province* [M]. Beijing: Geological Publication House, 57-734 (in Chinese with English abstract).

- Hochstaedter A G, Gill J B, Kusakabe M, *et al.* 1990. Volcanism in the Sumisu Rift I: element, volatile and stable geochemistry[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 100: 179~194.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 90: 297~314.
- Ionov D A, Gregoire M and Prikhod V S. 1999. Feldspar-Ti-oxide metasomatism in off-cratonic continental and oceanic upper mantle [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 165: 37~44.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 8(5): 523~548.
- Jahn B, Capdevila R, Liu D, *et al.* 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 629~653.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Kelemen P B, Hangh J K and Greene A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[A]. Rudnick R L. *Treatise On Geochemistry*[C]. 3: 593~659.
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Microscopy*, 171: 223~232.
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207~224.
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, *et al.* 2008. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Lesser Xing'an Range, NE China and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 27: 534~544(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLOT 3: A Geochronological toolkit for Microsoft excel*[J]. *Berkeley Geochronology Centre Special Publication*, 4: 74.
- Meng E, Xu W L, Pei F P, *et al.* 2008. Chronology of Late Paleozoic volcanism in eastern and southeastern margin of Jiamusi Massif and its tectonic implication[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 53: 1231~1245.
- Meng E, Xu W L, Pei F P, *et al.* 2010. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonophysics*, 53: 1231~1245.
- Middlemost and Eric A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 37(3~4): 215~224.
- Pearce J A. 1982. Trace Element Characteristics of Lavas From Destructive Plate Boundaries[M]. United Kingdom(GBR): John Wiley & Sons, Chichester, 525~548.
- Pearce J A, Ernewein M and Bloomer S H. 1995. Geochemistry of Lau Basin volcanic rocks[A]. Smellie J. *Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate Margins*[C]. Geological Society of Special Publication, London, 53~75.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, *et al.* 1999. Hf-Nd element an isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in Western Pacific arc-basin systems[J]. *Journal of Petrology*, 40: 1579~1611.
- Pin C and Paquette J L. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central(France)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129: 222~238.
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite*[M]. London: Blackie Academic and Professional, 321.
- Qu Guansheng and Pu Quansheng. 1997. The Lithostratigraphy of the Heilongjiang Province, NE China[M]. The Publishing House of Chinese Geology University, Wuhan, 94~133(in Chinese).
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions[A]. Storey B C, Alabaster T and Pankhurst R J. *Magmatism and the Cause of Continental Breakup* [C]. Geological Society of Special Publication, London, 68: 41~60.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Su Yuping and Tang Hongfeng. 2005. Trace element geochemistry of A-type granites[J]. *Bulletin Mineralogy, Petrology Geochemistry*, 24(3): 245~251(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism In Ocean Basins* [C]. Geological Society of Special Publication, London, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The continental crust: Its composition and Evolution*[J]. Blackwell, 312.
- Wang F, Xu W L, Meng E, *et al.* 2011. Caledonian Amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*(in press).
- Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, *et al.* 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 169~173(in Chinese with English abstract).

- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.
- Wilson M. 1989. Igneous Petrology—A Global Tectonic Approach [M]. The Academic Division of Unwin Hyman Ltd.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 187: 143~173.
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, *et al.* 2007. The Heilongjiang Group: a Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 30: 542~556.
- Wu F Y, Yang Y H and Xie L W. 2006. Hf isotopic compositions of standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 231: 105~126.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(1): 77~89 in Chinese with English abstract).
- Xie Mingqian. 2000. Amalgamating Plate Tectonic and Its Drove Mechanism-Tectonic Evolution of Northeast China and Adjacent Area[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, *et al.* 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 392~402.
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, *et al.* 2004. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton[J]. Journal of Earth Sciences, 93: 1025~1041.
- Yang J H, Wu F Y, Shao J, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. Earth Planetary Science Letters, 246: 336~245.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Geostandard Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis, 28: 353~370.

附中文参考文献

- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 等. 2008. 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, 27(04): 534~544.
- 曲关生, 浦全生. 1997. 全国地层多重划分对比研究, 黑龙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~298.
- 苏玉平, 唐红峰. 2005. A型花岗岩的微量元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(3): 245~251.
- 王焰, 钱青, 刘良. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. 岩石学报, 16(2): 169~173.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 27(1): 77~89.
- 谢鸣谦. 2000. 拼贴板块构造及其驱动机理: 中国东北及邻区的大地构造演化[M]. 北京: 科学出版社.