

海拉尔盆地基底晚古生代 adakite 的发现及其地质意义*

章凤奇^{1,2,3} 陈汉林^{1,3**} 曹瑞成² 蒙启安² 朱德丰² 王志国²

ZHANG FengQi^{1,2,3}, CHEN HanLin^{1,3**}, CAO RuiCheng², MENG QiAn², ZHU DeFeng² and WANG ZhiGuo²

1. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

3. 浙江大学教育部含油气盆地构造研究中心, 杭州 310027

1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Daqing Oil field, Daqing 163712, China

3. Structural Research Center of Oil & Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2009-05-12 收稿, 2009-11-02 改回.

Zhang FQ, Chen HL, Cao RC, Meng QA, Zhu DF and Wang ZG. 2010. Discovery of Late Paleozoic adakite from the basement of the Hailaer Basin in NE China and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2):633–641

Abstract The pre-Mesozoic basement of the Hailaer Basin is one part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt in the eastern Central Asia. Trachy-andesite, dacite and diorite in the basement have unique chemical and trace element signatures identical to adakite. These igneous rocks developed among the Late Paleozoic sedimentary succession as interlayers. All of them consist of the basement of the Late Mesozoic rifted basins. The intermediate igneous rocks are characterized by high-K calc-alkaline and metaluminous series, high SiO₂, Al₂O₃ and Sr contents, high Sr/Y and La/Yb ratios, enrichment in light rare earth elements (LREE) and strong depletion in heavy rare earth elements (HREE), Y and HFSE, and weak positive or negative Eu anomaly, low Mg, Cr and Ni contents. These rocks are similar to one type of adakites, which formed from the thickened lower crust through partial melting, and differ from the typical adakite, which is from the partial melting of the subducted oceanic slab. The (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i values of all samples are equal (0.7041), while the (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i values are between 0.51243 and 0.51247. All the ε_{Nd}(t) values display positive with a range from +3.7 to +4.5. These Nd and Sr isotopic composition features indicate that the source rocks of these adakite-type rocks are from a weakly depleted mantle, or a depleted mantle contaminated by the crustal materials. These adakite-type rocks were likely derived from the partial melting of new underplated basaltic rocks under the conditions of amphibolite to eclogite transition in the intracontinental environment of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt during the Late Carboniferous time. The occurrence of these adakite rocks indicates that the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt experienced an important process of the underplating of mantle-derived basaltic magmas and the vertical crustal growth in Late Paleozoic, which were probably related to the subduction of the Paleo-Asian Ocean slab.

Key words Basement of the Hailaer Basin; Late Paleozoic; Adakite; Geochemistry; Vertical crustal growth

摘要 海拉尔盆地的前中生代基底隶属中亚造山带东段的兴蒙造山带。在盆地基底地层中发现了具有 adakite 成分特征的粗面安山岩、英安岩和闪长玢岩。这些火成岩与晚古生代沉积地层交互或伴生, 共同构成晚中生代裂陷盆地的基底。地球化学研究表明, 这些火成岩基本上属于高钾钙碱性和准铝质岩石系列, 具有高 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量, 高 Sr、Sr/Y 和 La/Yb 值, 富集轻稀土 (LREE), 亏损重稀土 (HREE)、Y 和高场强元素 (HFSE), Eu 表现弱的负异常或轻微的正异常, 相容元素 Mg、Cr 和 Ni 含量低, 这些特征与增厚下地壳部分熔融成因的 adakite 非常相似, 而明显不同于典型的由俯冲洋壳熔融形成的 adakite。样品的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值基本一致, 为 0.7041, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 值为 0.51243~0.51247, ε_{Nd}(t) 为正值 (+3.7~+4.5),

* 本文受国家重点基础研究发展规划“973”项目(2007CB411303)、国家科技重大专项(2009ZX05009-001)、中国博士后科学基金面上项目(20070421162)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QNA3003)的联合资助。

第一作者简介: 章凤奇, 男, 1978 年生, 博士, 从事岩石大地构造方面的科研与教学工作, E-mail: fengqiz@gmail.com

** 通讯作者: 陈汉林, 男, 1964 年生, 教授, 博导, 主要从事造山带与盆地构造研究, E-mail: hlchen@zju.edu.cn

显示其岩浆源区可能源于弱亏损地幔,或亏损地幔受到地壳物质混染。本文认为海拉尔地区晚古生代 adakite 型岩浆很可能是由当时新底侵的玄武质下地壳在角闪岩相向榴辉岩相过度或榴辉岩相条件下部分熔融形成。这些 adakite 岩石的出现反映了兴蒙造山带晚古生代受到了古亚洲洋的俯冲消减引起的强烈的地幔玄武质岩浆底侵作用,并由此导致地壳垂向上显著的增生加厚过程。

关键词 海拉尔盆地基底;晚古生代;埃达克岩;地球化学;地壳垂向增生

中图法分类号 P588.144

自从 adakite(埃达克岩)被发现(Kay, 1978)、命名(Defant and Drummond, 1990)以来,一直是国际地学界广泛关注的热点和前沿课题之一(Castillo, 2006; 张旗, 2008)。adakite 是具有独特地球化学特征和成因的一类中酸性火成岩,包括 TTD/TTG(奥长花岗岩-英云闪长岩-英安岩/花岗闪长岩)岩套,由安山质/英安质和流纹质系列火山和(或)侵入岩组合(Defant and Drummond, 1990; Atherton and Petford, 1993; Matin, 1999)。这类岩石突出的地球化学特征是 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{MgO} < 3\%$, 亏损高场强元素(HFSE),与正常的弧火山岩(安山岩-英安岩-流纹岩系列)相比, $Y (\leq 18 \times 10^{-6})$ 和重稀土(HREE)(如, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$)含量甚低,但 Sr 的含量很高(很少低于 400×10^{-6})。人们发现的 adakite 的类型和成因具有多样性(Kay and Kay, 2002; 张旗等, 2004),既可在板块俯冲消减相关的岛弧环境中发育(Defant and Drummond, 1990; Peacock *et al.*, 1994; 许继峰等, 2001; Xiong *et al.*, 2006; 赵振华等, 2006; Zhao *et al.*, 2008),也可由增厚($> 40 \text{ km}$)下地壳部分熔融形成(Atherton and Petford, 1993; Matin, 1999; Xiong *et al.*, 2001, 2005; 熊小林等, 2001, 2005; 张旗等, 2001; Chung *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005; 赵振华等, 2006; Xiao and Clemens, 2007; Zhao *et al.*, 2008)。自 2000 年以来,我国学者在古亚洲洋造山带(中亚造山带)、环太平洋造山带(吉林-黑龙江东部)、大别山-秦岭-祁连山-昆仑山造山带、新特地斯造山带(青藏高原周边)以及皖南-赣东北造山带等诸多构造带均发现有 adakite, 并对其时空分布、形成背景进行了深入的探讨(张旗等, 2001, 2003a, b, 2004; 张炯飞等, 2004; Xiong *et al.*, 2001; 熊小林等, 2001; 许继峰等, 2001; Xu *et al.*, 2001, 2002; Chung *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2004, 2008; Wang *et al.*, 2005, 2006; Xu *et al.*, 2006a, b; 赵振华等, 2006; 秦秀峰等, 2007)。

作为古亚洲洋造山带和环太平洋造山带叠加转换部位的中国东北地区,发育有早古生代、晚古生代、中生代和古新世的 adakite(张旗等, 2003; 张炯飞等, 2004; 秦秀峰等, 2007; Guo *et al.*, 2007),目前文献报道以中生代 adakite 最多,分布最广(张旗等, 2003)。从地域上看主要分布在吉林,而内蒙古和黑龙江等地发现较少。海拉尔盆地位于内蒙古的东北部,是东北亚地区晚中生代发育起来的众多裂陷盆地群之一,盆地基底为前中生代的兴蒙造山带,属于中亚造山带向东延伸部分(Li, 2006)。我们的研究发现,海拉尔盆地基底的一套中酸性火山-侵入岩组合具有与 adakite 一致

的独特的岩石地球化学特征。本文报道了这些岩石的地球化学特征和铷、钕同位素组成,并讨论了它们的成因及地质意义。

1 地质概况与岩相学特征

海拉尔盆地位于中国东北大兴安岭的西侧,内蒙古自治区的东北部,与蒙古国境内的塔木察格盆地实质上为同一个盆地,是东北亚地区晚中生代发育在兴蒙造山带上的众多裂陷盆地群之一。兴蒙造山带(在中国东北地区)的大地构造单元,自西向东主要由额尔古纳地块、内蒙古-中大兴安岭造山带和布列亚-佳木斯地块等组成(图 1a)(Li, 2006)。兴蒙造山带属中亚造山带(Sengör *et al.*, 1993)向东延伸部分。该区前中生代大致经历了两次大的板块构造拼合演化过程,即早古生代额尔古纳地持续向南增生,在早石炭世与东侧的布列亚-佳木斯地块完成碰撞拼合,形成额尔古纳-布列亚-佳木斯联合地块(李锦轶, 1998; Badarch *et al.*, 2002; Li, 2006)。然后这一联合地块大致在中二叠世沿索伦-林西缝合带又与南侧的华北板块碰撞拼合,其碰撞变形最晚可能持续到三叠纪(Xiao *et al.*, 2003; 李锦轶等, 2007)。中生代以后,位于北部的蒙古-鄂霍次克洋开始呈剪刀式快速消减闭合,并在侏罗纪末期或者早白垩世早期最终完整拼贴,形成亚洲大陆(Zhao *et al.*, 1990; Zonenshain *et al.*, 1990)。晚中生代期间,整个东北亚地区发生了强烈的构造-岩浆作用,发育巨型的中酸性火山岩带(如大兴安岭)和数量众多、分布甚广的裂陷盆地群,如蒙古国境内的东戈壁盆地,我国境内的松辽、海拉尔、银根、二连和三江等盆地(图 1a)(李锦轶, 1998; Ren *et al.*, 2002; Meng, 2002)。

油田勘探钻井揭示,海拉尔盆地基底岩石主要由前中生代前变质、弱变形或者成岩性极高的沉积岩和火山-侵入岩共同组成。初步的锆石 U-Pb 的测年结果证实,火山-侵入岩主要形成于晚石炭世-早二叠世(290 ~ 320Ma),年龄峰值为 310Ma^①。本次研究的 6 件火成岩样品来自盆地中部的贝尔凹陷(图 1b),包括粗面安山岩、英安岩和闪长玢岩。各自详细产状与岩相学特征叙述如下:

粗面安山岩:主要见于德 4 井,钻遇深度区间 1936.1 ~ 2138.4m(未钻穿),厚度超过 200m。斑状结构或显微斑状

^① 葛文春,张吉衡,许文良等. 2007. 大庆探区含火山岩地层同位素年代学应用研究. 大庆油田勘探开发研究院科研报告

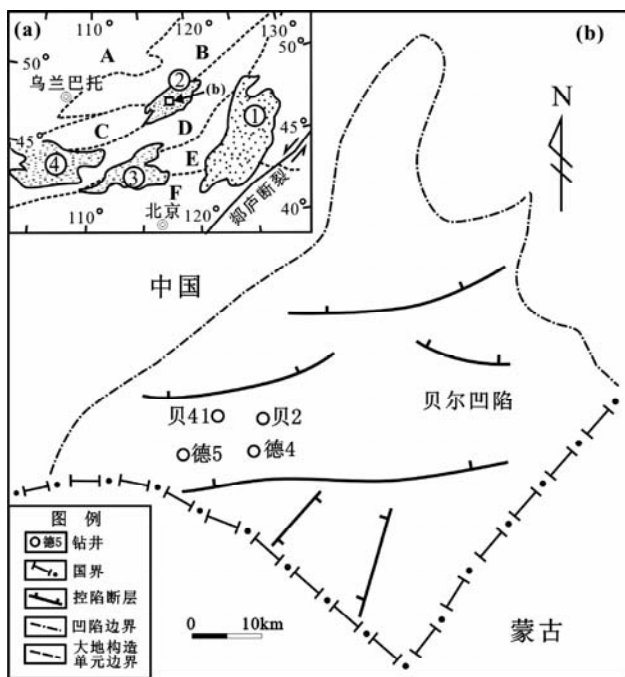


图1 海拉尔盆地贝尔凹陷大地构造位置(a,据 Li, 2006 修改)及钻井位置图(b)

A-Vitin 和 Stanovoy 地体群; B-额尔古纳地块; C-中蒙古地块; D-南蒙古-中大兴安岭造山带; E-布列亚-佳木斯地块; F-华北克拉通;
①-松辽盆地; ②-海拉尔盆地; ③-二连盆地; ④-东戈壁盆地
Fig. 1 Tectonic location (a, modified after Li, 2006) and well location map of the Beier depression in the Hailaer Basin

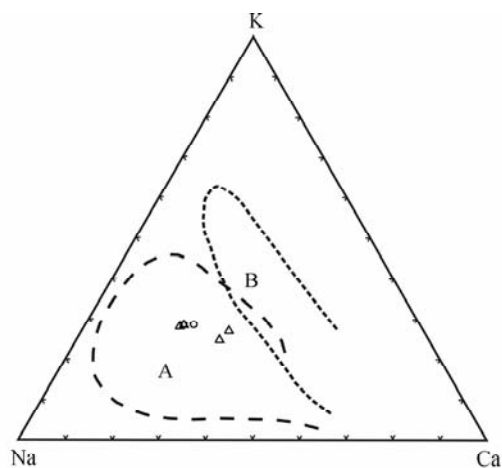


图2 海拉尔盆地基底 adakite 型火成岩的 Na-K-Ca 图解
A-adakite 型安山岩和英安岩及太古宙 TTG/TTD 分布区; B-正常火山弧安山岩和英安岩分布区。A 和 B 范围数据引自 Defant and Drummond(1993)。空心三角形代表火山岩,空心圆代表侵入岩

Fig. 2 Na-K-Ca diagram for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin

结构,斑晶成分为蚀变的斜长石和角闪石;斜长石斑晶可见聚片双晶,有碳酸盐化和绢云母蚀变现象,粒径 0.5 ~ 2.0mm,含量 20%;普通角闪石多呈假晶,已暗化,后又经褐铁矿化和绿帘石化,粒径 0.3 ~ 1.5mm,含量约占 10% ~ 15%;基质以斜长石为主,含少量石英及蚀变角闪石等,自形的斜长石微晶构成典型的安山结构。

英安岩:主要见于贝 2 井,分布深度区间 1788.5 ~ 2430.0 m,单层火山岩厚度从 5m 至 50m 不等,与沉积地层交互发育,累计厚度超过 350 m。玻晶交织结构,可见少量斑晶,为斜长石和石英,基质主要由自形的斜长石微晶和玻璃质组成。

闪长玢岩:主要见于德 5 井和贝 41 井,德 5 井分布深度区间为 1982.8 ~ 2113.5m,厚度约 120m,上下均为粉砂岩和泥岩等高能岩沉积地层,贝 41 井主要与安山质凝灰岩交互共生,火山岩分布深度区间为 2417.0 ~ 2730.0m(未钻穿),总厚度超过 300m。两口井获得的闪长玢岩岩石学特征相似:斑状结构,斑晶主要为斜长石、角闪石、黑云母和少量的石英。斜长石斑晶比较自形,发育明显的环带构造,可见聚片双晶和卡氏双晶,具有不同程度的碳酸盐化和绢云母化,粒径 0.4 ~ 3mm,含量约占 40% ~ 60%,含量占 70% 左右;角闪石呈长柱状,含量约占 5%,具有弱的绿泥石化;黑云母粒径 0.4 ~ 1.0mm,含量占 2%,局部被绿泥石或绿帘石交代;石英斑晶呈他形粒状,粒径 0.2 ~ 0.5mm,含量 < 1%。基质主要以斜长石微晶为主,含少量角闪石;副矿物有磁铁矿、磷灰石和锆石等。

2 地球化学特征

2.1 测试方法

用于主量和微量元素分析的样品首先进行粗碎,然后用玛瑙研钵将碎样磨成可过 200 目筛的粉末。每次换磨样品时,均用蒸馏水和酒精棉对研钵杵、钵体进行清洗和擦拭,以防止样品间相互污染。主量、微量元素和铈、钕同位素分析工作均在南京大学现代分析测试中心完成。其中,主量元素用日本岛津公司 VF320 单道荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于 0.5% ~ 1%;微量元素采用 Finnigan Element II 型 ICP-MS 测定,样品分析数据的相对标准偏差优于 5%。铈、钕同位素比值测定用英国制造的 VG354 多接受质谱计完成,实验测定美国 NBS987 铈同位素标准:以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 为标准化值,测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710236 ± 7 ($n = 10$);测定美国 La Jolla 钕同位素标准:以 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 为标准化值,测得 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511864 ± 3 ($2\sigma, n = 8$),详细实验流程参见有关文献(Zhang *et al.*, 2001, 2002; 王银喜等, 2006),主量及微量元素测定结果列于表 1,铈、钕同位素分析结果列于表 2。

2.2 主量、微量元素特征

从表 1 可知,海拉尔盆地晚古生代基底火成岩具有中酸

表1 海拉尔盆地基底火成岩主量(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major element (wt%) and trace elements($\times 10^{-6}$) contents for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin

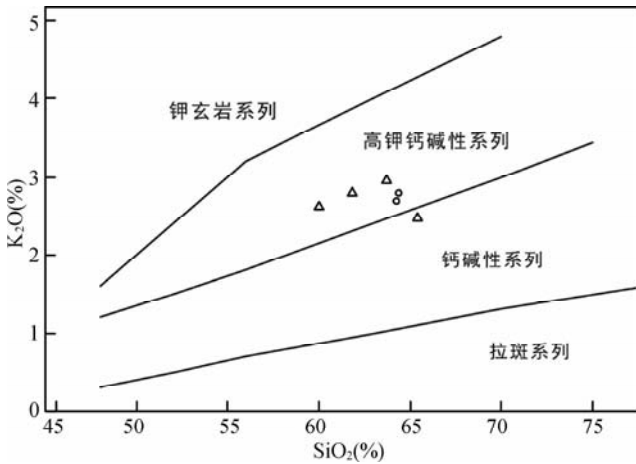
样品号	HLR0806	HLR0812	GW030 *	HLR0821	GW028 *	GW098 *
井名	德5	贝41	德4井	德4	德4井	贝2井
深度(m)	2003.6	2702.0	1993.0	2004.2	1999.2	2401.0
岩石类型	闪长玢岩	闪长玢岩	英安岩	粗面安山岩	粗面安山岩	粗面安山岩
SiO ₂	64.28	64.36	65.42	61.81	59.98	63.72
TiO ₂	0.44	0.45	0.33	0.57	0.55	0.47
Al ₂ O ₃	16.32	16.23	15.91	16.61	15.84	17.00
Fe ₂ O ₃ ^T	3.84	3.97	2.60	4.37	4.29	4.16
MnO	0.06	0.07	0.03	0.08	0.06	0.07
MgO	2.19	1.9	1.25	2.36	2.66	2.04
CaO	2.81	2.63	3.75	2.72	4.24	2.79
Na ₂ O	4.75	5.13	3.99	5.26	4.98	5.69
K ₂ O	2.69	2.79	2.47	2.8	2.62	2.95
P ₂ O ₅	0.26	0.28	0.13	0.41	0.33	0.26
LOI	2.14	2.08	4.2	3.68	4.48	0.98
SUM	99.78	99.89	100.08	100.67	100.03	100.13
Mg [#]	0.35	0.31	0.31	0.34	0.37	0.32
Na ₂ O/K ₂ O	1.77	1.84	1.62	1.88	1.90	1.93
K ₂ O + Na ₂ O	7.44	7.92	6.46	8.06	7.60	8.64
Cr	64.07	96.68	18.42	75.59	57.73	19.2
Co	8.32	8.49	6.57	8.31	14.24	8.91
Ni	29.34	36.09	11.72	43.53	44.53	18.95
Ga	14.73	15.02	14.95	14.92	15.49	16.93
Rb	38.06	38.08	46.45	30.78	33.39	43.06
Ba	965	911	529	905	878	1038
Th	2.18	8.39	2.33	2.51	2.88	2.58
U	0.94	1.16	1.24	1.02	1.21	1.21
Nb	2.76	1.34	2.26	4.30	5.18	4.10
Ta	0.38	0.49	0.21	0.27	0.36	0.27
La	10.73	17.50	9.43	17.57	19.74	16.20
Ce	21.96	38.67	18.11	34.42	37.79	31.24
Pr	2.47	4.39	2.16	3.87	4.63	3.84
Sr	948	948	535	801	825	859
Nd	8.85	14.70	8.16	14.16	17.58	14.73
Zr	35.53	19.72	75.64	65.57	110.8	106.5
Hf	1.02	0.33	2.12	1.64	2.73	2.81
Sm	1.76	2.76	1.45	2.78	2.84	2.39
Eu	0.52	0.58	0.50	0.68	0.90	0.85
Ti	2640	2700	1980	3420	3300	2820
Gd	1.39	1.38	1.31	1.71	2.36	2.01
Tb	0.17	0.17	0.17	0.20	0.29	0.27
Dy	1.02	0.99	0.94	1.14	1.49	1.36
Y	5.72	5.38	5.30	5.61	7.71	7.16
Ho	0.20	0.20	0.16	0.22	0.29	0.26
Er	0.54	0.54	0.44	0.58	0.78	0.72
Tm	0.07	0.08	0.06	0.08	0.11	0.11
Yb	0.45	0.47	0.41	0.47	0.69	0.69
Lu	0.07	0.07	0.07	0.07	0.12	0.10
Sr/Y	179	176	143	101	107	120
La/Yb	24	37	38	23	29	23
δ Eu	0.98	0.82	0.89	1.10	1.03	1.15

标准 * 样品数据引自葛文春等(2007). $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+} (\text{全铁}))$; $\delta Eu = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$, Eu_N, Sm_N, Gd_N 为球粒陨石标准化值

表 2 海拉尔盆地基底火成岩的锶、钕同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotopic data for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
HLR0806	48.09	1145	0.1246	0.704669	0.7041	1.764	8.848	0.1204	0.512713	0.51247	4.49
HLR0812	50.36	1158	0.1284	0.704671	0.7041	2.763	14.7	0.1148	0.512682	0.51245	4.10
HLR0821	38.73	957	0.1194	0.704589	0.7041	2.783	14.17	0.1176	0.512668	0.51243	3.72

图 3 海拉尔盆地基底火成岩 SiO_2 vs. K_2O 图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976)

图例同图 2

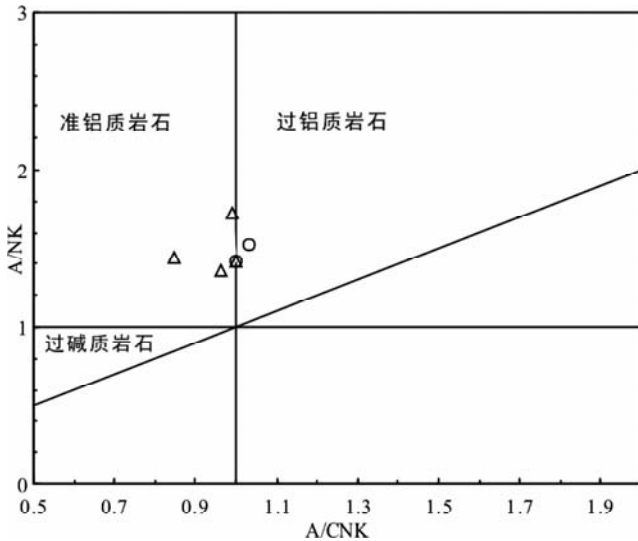
Fig. 3 SiO_2 vs. K_2O diagrams for igneous rock from the basement of the Hailaer Basin (after Peccerillo and Taylor, 1976)

图 4 海拉尔盆地基底火成岩 A/CNK vs. A/NK 图解 (据 Shand, 1943)

图例同图 2

Fig. 4 A/CNK vs. A/NK diagram for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin (after Shand, 1943)

性火成岩(安山质-英安质)成分特征, 高的 Na_2O (3.99% ~ 5.69%)、 Al_2O_3 (15.84% ~ 17.00%), 富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.46\% \sim 8.64\%$), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ (1.62 ~ 1.93)。在 Na-K-Ca 三角图中(图 2)落入 adakite 和太古宙 TTG/TTD 奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗岩(英安岩)域。火成岩总体上低镁 ($\text{Mg}^\#$ 值为 0.31 ~ 0.37, 表 1), 属于高钾钙碱性(图 3)和准铝质岩系(图 4)。微量元素表现为相对亏损 Nb、Ta、Th、Ti 等高场强元素, 与正常的火山弧钙碱性岩特征一致, 但具有独特的高 Sr ($289 \times 10^{-6} \sim 1022 \times 10^{-6}$), 低 Y ($5.3 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6}$)、Yb ($0.4 \times 10^{-6} \sim 0.7 \times 10^{-6}$) 和强烈亏损 HREE 等特征, 并且 $\text{Sr}/\text{Y} > 25$ (101 ~ 179), $\text{La}/\text{Yb} > 20$ (23 ~ 38)、Eu 具有微弱的负异常或者正异常 ($\delta\text{Eu} = 0.82 \sim 1.15$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 5a), 显示了特征的 Sr 正异常; 在稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 5b), 稀土元素配分曲线显示右倾陡斜特征, Eu 显示极微弱的负异常或正异常, 富集 LREE, 亏损 HREE。这与 adakite、太古宙的 TTD/TTG 的特征十分相似, 而与正常的火山弧安山岩和英安岩相对缓斜的稀土元素配分曲线区别明显 (Defant and Drummond, 1993)。在 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ 图解和 $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}$ 图解(图 6)中, 所有数据点均落入 adakite 型的安山岩与英安岩区域, 与正常的火山弧安山岩和英安岩存在显著的区别。综上所述, 海拉尔盆地基底晚古生代的粗面安山岩、英安岩和闪长玢岩具有与 adakite 和太古宙 TTG(TTD)一致的富 Na_2O 和 Al_2O_3 , 高 Sr, 低 Y、Yb 及 Eu 异常不明显和强烈亏损 HREE 等岩石地球化学特征。

2.3 锶、钕同位素组成特征

对 3 件火成岩样品进行了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成的分析(表 2), 利用锆石 U-Pb 年龄 (310Ma) (葛文春等, 2007) 计算了火成岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.7041; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 为 0.51243 ~ 0.51247, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值 (+3.7 ~ +4.5)。这些 Nd、Sr 同位素组成特征与大洋板片熔融形成 adakite 熔体组成, 与 MORB 的高正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 特点比较相似, 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关图(图 7)中显示其源区属于地幔组合区范围。上述特征表明海拉尔盆地基底晚古生代 adakite 型岩浆源区可能属于弱的亏损地幔, 或亏损地幔受到地壳

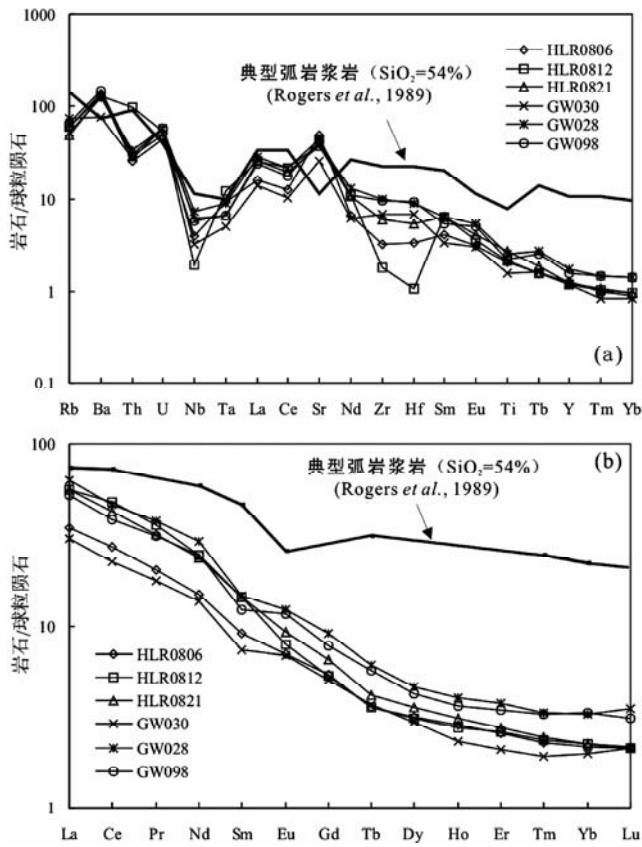


图5 海拉尔盆地基底火成岩微量元素蛛网图(a,原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)与稀土元素配模式图(b,球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (a, after Sun and McDonough, 1989) and chondrite-normalized REE patterns (b, after Boynton, 1984) for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin

物质的混染。

3 成因及地质意义

尽管目前地质界对于 adakite 的成因和类型仍然还存在激烈的争论,但越来越多的研究证实大洋板块的俯冲熔融并非是产生 adakite 组成特征的唯一机制(张旗等, 2001, 2004; Xiong *et al.*, 2005; 熊小林等, 2005; 赵振华等, 2006; Castillo, 2006; Xu *et al.*, 2006a, b; Xiao and Clemens, 2007; Zhao *et al.*, 2008)。张旗等(2004)总结前人研究后认为 adakite 的形成主要受到基性源岩(大洋岩石圈或基性下地壳)、较高的压力(1.2 ~ 4GPa)、热源以及区域地球动力学背景等因素的影响。其中,后两者是诱发因素,前两者才是决定 adakite 地球化学特殊性的基本控制因素,不论是热洋壳还是冷洋壳的熔融,或者加厚陆壳的基性下地壳熔融,只要压力足够大,使得源岩中大部分斜长石和一定量角闪石发生

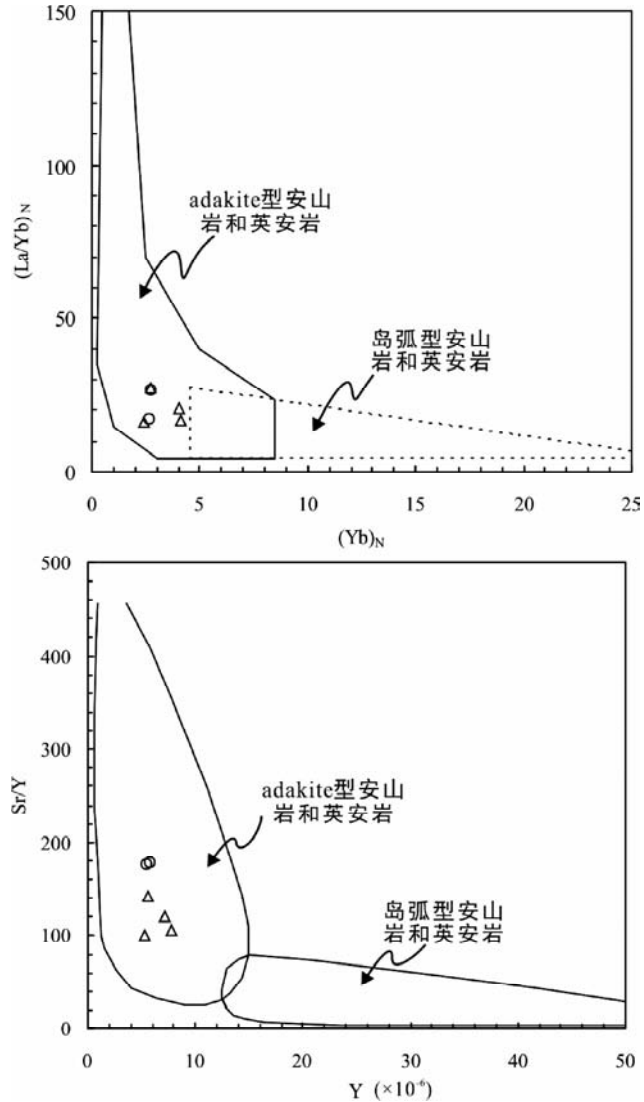


图6 海拉尔盆地基底火成岩 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图和 Sr/Y - Y 图(据 Martin, 1990)

样品图例同图2

Fig. 6 $(La/Yb)_N$ - Yb_N and Sr/Y - Y diagrams for igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin (after Martin, 1990)

分解,石榴子石在残余固相中占有较大的比例(含角闪石的榴辉岩和(或)无斜长石的石榴子石角闪岩、麻粒岩或榴辉岩),通过脱水熔融即可形成具有地球化学特征的岩石(张旗等, 2004 及其引用的文献)。

本文获得的岩石地球化学特征显示,海拉尔盆地基底晚古生代的火山-侵入岩属于高钾钙碱性 adakite,与典型的板块熔融形成的 adakite (Defant and Drummond, 1990, 1993; Martin, 1999)相比更为富钾(但属于钠质, $1 < Na_2O/K_2O < 2$)。在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解和 Sr/Y - Y 图解(图6)中,所有数据点均落入典型的 adakite 岩石区域。这类 adakite 最早是 Atherton and Petford (1993)报道的秘鲁安第斯带 Cordillera

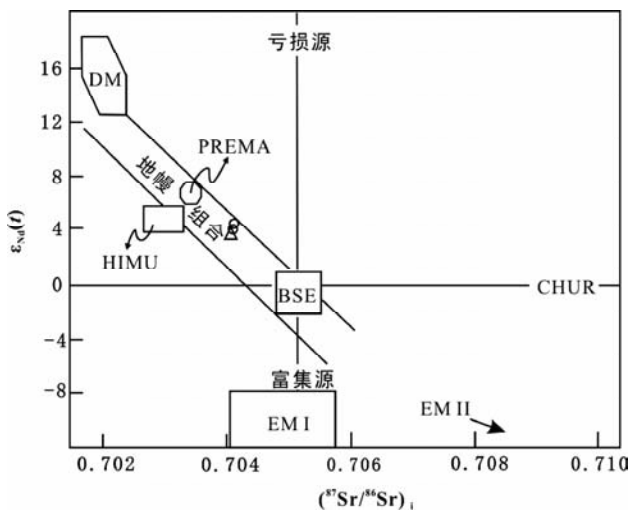


图7 海拉尔盆地基底火成岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关图 (据 Yogodzinski *et al.*, 1996)

DM-亏损地幔; PREMA-普通地幔; BSE-大硅质地球; HIMU-高U/Pb 比值地幔; EM I-型富集地幔; EM II-型富集地幔; CHUR-球粒陨均一库。样品图例同图2

Fig. 7 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for the igneous rocks from the basement of the Hailaer Basin (after Yogodzinski *et al.*, 1996)

Blanca 岩基, 他们认为该富 Na 质的岩基不是板片熔融的产物, 而是地壳加厚及伸展的背景下由新近底侵至下地壳的玄武岩在高压下 (>1.5 ~ 2.0 GPa) 部分熔融的结果, 类似的解释包括北美 Cascade 地区的 St. Helens 山、新西兰南岛、南极半岛、Klamath 山、中国西天山 (熊小林等, 2001; 张旗等, 2004 及其引用文献; 赵振华等, 2006)。中国东部晚侏罗世-早白垩世的许多火山岩和侵入岩也属此类岩石 (Zhao *et al.*, 2004, 2008)。其形成机理可能有三种方式 (张旗等, 2004; 赵振华等, 2006): (1) 底侵至下地壳的玄武质岩浆的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; Zhao *et al.*, 2008); (2) 加厚下地壳底部基性岩的部分熔融 (张旗等, 2001a, b); (3) 拆沉的下地壳沉入地幔, 受到软流圈地幔的加热, 导致部分熔融形成 adakite 岩浆 (Kay *et al.*, 1993; Chung *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2006a, b; Wang *et al.*, 2006)。

中国东北的兴蒙造山带是在早石炭世额尔古纳地块与布列亚-佳木斯地块完成拼贴而初步形成的, 并经历了中二叠世古亚洲洋闭合碰撞的影响 (Xiao *et al.*, 2003)。尽管晚石炭世时, 古亚洲洋还处在向南增生过程 (Xiao *et al.*, 2003; Li, 2006), 但此时的海拉尔盆地所处兴蒙褶皱带, 距离南部的古亚洲洋消减带较远 (推测超过 800km), 实际上该区已经大体进入陆内演化或者向陆内过渡演化的阶段。从上述大地构造位置并结合本文火成岩的地球化学特征, 大致可以排除消减俯冲带附近由大洋板片部分熔融成因

(Defant and Drummond, 1990, 1993) 或者是远距离“水平俯冲大洋板片”部分熔融成因 (Gutscher *et al.*, 2000) 的可能。区域重力等地球物理勘探^①表明, 海拉尔盆地现今地壳厚度为 39 ~ 40km, 考虑到晚古生代以来地层显著的剥蚀作用 (晚侏罗世至早白垩世地层直接覆盖在前中生代地层之上) 以及晚中生代强烈的裂陷伸展减薄过程 (如区域上大量断陷盆地的发育与变质核杂岩的隆升), 海拉尔晚古生代期间的地壳厚度至少超过 40km。因此, 倘若晚古生代存在底侵于海拉尔地区壳幔边界附近的玄武质岩石, 这一地壳厚度无疑使其处在石榴石稳定的压力范围之内。本文获得的铈、钕同位素结果显示, 海拉尔盆地基底 adakite 型火成岩具有较高的 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i (0.51243 ~ 0.51247) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.7 ~ +4.5) 和较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7041), 反映了这些 adakite 岩浆源区较深, 具有明确的岩石圈地幔组分, 而与大陆下地壳拆沉后部分熔融成因的高 Mg 的 adakite 型岩浆 (Xu *et al.*, 2006b; Wang *et al.*, 2006) 相差甚大。熊小林等 (2001) 曾报道了与本文岩石十分相似的西天山阿吾勒晚古生代 adakite, 并且认为底侵的玄武质岩石在高压下部分熔融是该区高钾钙碱性且为钠质的 adakite 最合适的成因解释模型。

基于区域地质演化认识和地球化学及铈、钕同位素特征, 笔者认为海拉尔地区晚古生代 adakite 型岩浆很可能也是由晚古生代新底侵的玄武质下地壳在角闪岩相向榴辉岩相过度或榴辉岩相条件部分熔融形成。而这些 adakite 岩石的出现反映了晚古生代兴蒙造山带南侧古亚洲洋俯冲消减作用过程中, 经历了强烈的幔源玄武质岩浆的底侵作用, 并由此导致了地壳垂向上显著的增生加厚。从中亚造山带 (包括兴蒙造山带) 大面积晚古生代-中生代正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 花岗岩的就位特征也反映了显生宙以来陆壳垂向增生作用在中亚造山带演化过程中扮演着十分重要的角色 (洪大卫等, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000; Hong *et al.*, 2004), 而这一动力学过程可能与古亚洲洋古生代期间的持续的俯冲消减并由此引发的幔源岩浆上涌有着密切的关系。

4 结论

(1) 海拉尔盆地基底地层中发育晚古生代 adakite, 岩石类型包括粗面安山岩、英安岩和闪长玢岩, 属于钠质的高钾钙碱性和准铝质岩石系列, 富硅和高铝, 高 Sr、Sr/Y 和 La/Yb 值, 富集 LREE, 亏损 HREE、Y 和 HFSE, Eu 表现弱的负异常或轻微的正异常, 相容元素 Mg、Cr 和 Ni 含量低, 总体特征与增厚下地壳部分熔融成因的 adakite 非常相似。

(2) 火成岩的同位素组成表现为低 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7041), 高 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i (0.51243 ~ 0.51247) 和正的

^① 大庆油田海拉尔石油勘探开发指挥部. 2007. 海拉尔盆地 07-HT-II 重磁电综合勘探成果报告. 大庆油田勘探开发研究院科研报告

$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+3.7 ~ +4.5), 显示其岩浆源区属于弱亏损地幔, 或亏损地幔受到地壳物质混染。

(3)海拉尔地区晚古生代 adakite 型岩浆很可能是由当时新底侵的玄武质下地壳在角闪岩相向榴辉岩相过度或榴辉岩相条件下部分熔融形成。反映了兴蒙造山带陆壳在晚古生代期间存在显著的垂向上增生加厚过程, 而这一过程可能与古亚洲洋的俯冲消减过程所引发的地幔玄武质岩浆强烈的底侵作用有关。

致谢 大庆油田勘探开发研究院为本次研究提供了珍贵的岩芯样品; 地球化学和同位素的分析测试工作得到南京大学现代分析测试中心王银喜研究员的帮助; 采样和文献资料收集得到大庆油田勘探开发研究院海拉尔勘探评价研究室李敬生、白雪峰、侯艳萍等工程师的热情帮助; 中国科学院广州地球化学研究所赵振华研究员审阅了本文初稿, 并提出了宝贵的修改意见; 两位匿名审稿人提出了重要的建设性意见。在此对上述单位和个人表示衷心的感谢!

References

Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 – 146

Badarch G, Cunningham WD and Windley BF. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia; Implication for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 87 – 110

Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry*, 2: 63 – 114

Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 258 – 268

Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Chu MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakite from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31: 1021 – 1024

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665

Defant MJ and Drummond MS. 1993. Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547 – 550

Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayoshi K and Li CW. 2007. Generation of Paleocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661 – 692

Gutscher MA, Maury R, Eissen JP and Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535 – 538

Hong DW, Wang SG, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive ε_{Nd} granitoids in the Da Hinggar Mts-Mongolia orogenic belt and continental crustal growth. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441 – 456 (in Chinese with English abstract)

Hong DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799 – 813

Jahn BM, Griffin WL and Windley B. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: vii – x

Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesite Melts from subducted Pacific Oceanic Crust. *Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117

– 132

Kay RW and Kay SM. 2002. Andean adakites: Three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 303 – 311

Kay SM, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro-Pampa volcanic rocks for lab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *Journal of Geology*, 101(6): 703 – 714

Li JY. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339 – 347 (in Chinese with English abstract)

Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3 – 4): 207 – 224

Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565 – 582 (in Chinese with English abstract)

Martin H. 1999. Adakite magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411 – 429

Meng QR. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3 – 4): 155 – 174

Peacock SM, Rushmer T and Thompson AB. 1994. Partial melting of subducting oceanic-crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1 – 2): 227 – 244

Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63 – 81

Petford N and Atherton MP. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 491 – 521

Qin XF, Yin ZG, Wang Y, Guo YS, Liu XG and Zhou SQ. 2007. Early Paleozoic adakite rocks in Mohe area at the northern end of the Da Hinggan Mountains and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1501 – 1511 (in Chinese with English abstract)

Ren JY, Tamakib K, Li ST and Zhang JX. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175 – 205

Rogers G and Hawkesworth CJ. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: Evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91: 271 – 285

Shand SJ. 1943. *Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with A Chapter on Meteorite*. New York: John Wiley & Sons

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process. In: Sauder AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spe. Pub.*, 42: 313 – 345

Wang Q, Medemott F, Xu JF, Hervé B and Zhu YT. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33(6): 465 – 468

Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89: 424 – 446

Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Zhang KJ, Li HM and Yang JD. 2006. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1215 – 1224 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1 – 2): 89 – 113

Xiao L and Clemens JD. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95(3 – 4): 399 – 414

Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to

- collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22 (6): 1069
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai Z H, Mei HJ, Wang YX, Wang Q, Xu JF and Bao ZW. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 811-817
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339-359
- Xiong XL, Xia B, Xu JF *et al.* 2006. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle. *Chemical Geology*, 229(4): 273-292
- Xiong XL, Adam J, Green TH, Niu HC, Wu JH and Cai ZY. 2006. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation condition of adakitic melts. *Science in China (Series D)*, 49 (9): 915-925
- Xu JF, Mei HJ, Yu XY, Bai ZH, Niu HC, Chen FR, Zheng ZP and Wang Q. 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting. *Chinese Science Bulletin*, 46(15): 1312-1316
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30 (12): 1111-1114
- Xu WL, Gao S, Wang QH, Wang DY and Liu YS. 2006a. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34(9): 721-724
- Xu WL, Wang QH, Wang DY, Guo JH and Pei FP. 2006b. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou - Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 230-240
- Yogodzinski GM, Naumann TR, Smith EI, Bradshaw TK and Walker JD. 1996. Evolution of a mafic volcanic field in the central Great Basin, south central Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B8): 17425-17445
- Zhang HF, Sun M, Lu FX, Zhou XH, Zhou M, Liu YS and Zhang GH. 2001. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China. *Geochemical Journal*, 35: 315-331
- Zhang HF, Sun M and Zhou XH. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241-253
- Zhang JF, Li ZT and Jin CZ. 2004. Adakite in northeastern China and their mineralized implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 361-368 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001a. An East China Plateau in Mid-Late Yanshannian period: Implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248-255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001b. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236-244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu HT, Wang YL and Li ZT. 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China, annex: Controversies over differing options for andakites in China. *Earth Science Frontiers*, 10 (4): 385-400 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Xu JF, Wang Y, Xiao L, Liu HT and Wang YL. 2004. Diversity of adakite. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 959-965 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q. 2008. Adakite research: Retrospect and prospect. *Chinese Geology*, 35(1): 32-39 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XX, Coe RS, Zhou YX, Wu HR and Wang J. 1990. New paleomagnetic results from northern China: Collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 14: 43-81
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bai ZH, Xu JF and Qiao YL. 2004. Association of Late Paleozoic adakitic rocks and shoshonitic volcanic rocks in the western Tianshan, China. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 68-72
- Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HY, Niu HC, Xu JF, Bai ZH and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1249-1265 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Wyman DA, Bao ZW, Bai ZH and Qiao YL. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102(1-2): 374-391
- Zonenshain L, Kuzmin M and Natapov L. 1990. Geology of RSSR: A plate tectonic synthesis. American Geophysical Union, *Geodynamic Series*, 21: 242

附中文参考文献

- Castillo PR. 2006. 埃达克岩成因回顾. *科学通报*, 51(6): 617-627
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴安造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地质前缘*, 7(2): 441-456
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. *岩石学报*, 23(3): 565-58
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. *地质论评*, 44(4): 339-347
- 秦秀峰, 尹志刚, 汪岩, 郭原生, 刘旭光, 周世强. 2007. 大兴安岭北端漠河地区早古生代埃达克质岩特征及地质意义. *岩石学报*, 23(6): 1501-1511
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 张开均, 李惠民, 杨杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征. *岩石学报*, 22(5): 1215-1224
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 王一先, 王强, 许继峰, 包志伟. 2001. 西天山阿吾勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. *科学通报*, 46(4): 281-287
- 熊小林, Adam J, Green TH, 牛贺才, 吴金花, 蔡志勇. 2005. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克岩体产生条件. *中国科学(D辑)*, 35(9): 837-846
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 郑作平, 王强. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. *科学通报*, 46(8): 684-687
- 张炯飞, 李之彤, 金成洙. 2004. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义. *岩石学报*, 20(2): 361-368
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001a. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 36(2): 248-255
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001b. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 17(2): 236-244
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景, 附:《国内关于埃达克岩的争论》. *地质前缘*, 10(4): 385-400
- 张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 2004. 埃达克岩的多样性. *地质通报*, 23(9-10): 959-965
- 张旗. 2008. 埃达克岩研究的回顾和前瞻. *中国地质*, 35(1): 32-39
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. *岩石学报*, 22(5): 1249-1265