

doi:10.3799/dqkx.2012.005

辽西北票晚侏罗世蓝旗组火山岩的 岩浆演化及其岩石成因

李伍平

广州大学土木工程学院, 广东广州 510006

摘要: 辽西北票晚侏罗世蓝旗组火山岩由下段安山质角砾熔岩夹凝灰岩和上段粗安岩组成。通过火山岩的地球化学研究, 安山质角砾熔岩具有埃达克质火山岩特征, 其中, SiO_2 含量为 56.99%~58.22%, 含有较高的 Al_2O_3 (>15.00%), 较高的 MgO ($\leq 4.22\%$, $\text{Mg}^\# = 0.44 \sim 0.49$) 和较低的 K_2O (<2.20%) 含量, 较高的微量元素, 如 Sr (>500.00 $\mu\text{g/g}$)、 Cr (>125.00 $\mu\text{g/g}$) 和 Ni (>47.00 $\mu\text{g/g}$) 及 Sr/Y 比值 (>28.00), 和较低的 ΣREE (<112.00 $\mu\text{g/g}$)、 U (<0.30 $\mu\text{g/g}$)、 Th (<2.00 $\mu\text{g/g}$) 和重稀土 ($\text{Y} < 20.00 \mu\text{g/g}$, $\text{Yb} < 1.60 \mu\text{g/g}$), 且轻稀土分馏明显 ($(\text{La/Yb})_N = 10.49 \sim 10.59$), 具有明显的 Sr 正异常和弱的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.62 \sim 0.99$); 粗安岩不具有埃达克质火山岩特征, 其中, SiO_2 含量为 52.09%~61.08%, 含有较高的 Al_2O_3 (>16.60%) 和 K_2O (>2.00%), 较低的 MgO ($\leq 2.64\%$, $\text{Mg}^\# = 0.08 \sim 0.38$)、 Cr (<28.00 $\mu\text{g/g}$) 和 Ni (<19.00 $\mu\text{g/g}$) 及 Sr/Y 比值 (≤ 23.00), 和较高的 ΣREE (>180.00 $\mu\text{g/g}$)、 U ($\geq 0.80 \mu\text{g/g}$)、 Th (>4.00 $\mu\text{g/g}$) 和 Sr (>350.00 $\mu\text{g/g}$), 且轻稀土分馏明显 ($(\text{La/Yb})_N = 10.22 \sim 16.28$), 具有明显的 Sr 和 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.74 \sim 0.80$)。这些火山岩普遍具有 Ba 、 Pb 富集和 Nb 、 Ta 亏损的特征, Nd/Sr 同位素具有中等的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ (20.15~23.34), T_{DM} (1.45~1.50 Ga) 和低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-7.69~-8.62), 表明蓝旗组安山质岩浆和粗安质岩浆均起源于下地壳玄武质岩石的部分熔融。其中, 安山质岩浆起源较深, 位于壳幔过渡带, 并发生明显的壳幔相互作用。蓝旗组火山岩由早期的安山质岩浆到晚期的粗安质岩浆演化可能预示着地壳由厚变薄的过程, 这对理解华北克拉通中生代岩石圈减薄的深部过程具有重要意义。

关键词: 晚侏罗世; 蓝旗组; 粗安岩; 安山质角砾熔岩; 部分熔融; 北票; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P588.143; P534.52

文章编号: 1000-2383(2012)01-0047-10

收稿日期: 2011-08-29

Magma Evolution of the Late Jurassic Volcanic Rocks and Its Genesis of the Lanqi Formation, Beipiao Area, Western Liaoning Province

LI Wu-ping

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: The Late Jurassic volcanic rocks of the Lanqi Formation in the Beipiao area, the western Liaoning Province, are composed of the lower andesitic breccia lava with tuffs and the upper trachyandesite. Based on the study of geochemistry, andesitic breccia lava are from 56.99% to 58.22% in SiO_2 , high Al_2O_3 (>15%), high MgO ($\leq 4.22\%$, 0.44 to 0.49 in $\text{Mg}^\#$) and low K_2O (<2.2%) characterizes by high Sr (>500 $\mu\text{g/g}$), Cr (>125 $\mu\text{g/g}$), Ni (>47 $\mu\text{g/g}$) contents and higher Sr/Y ratio (>28) and low REE (<112 $\mu\text{g/g}$), U (<0.3 $\mu\text{g/g}$), Th (<2 $\mu\text{g/g}$) and HREE ($\text{Y} < 20 \mu\text{g/g}$, $\text{Yb} < 1.6 \mu\text{g/g}$) contents and by strongly fractionated LREE (10.49 to 10.59 in $(\text{La/Yb})_N$) and distinct positive Sr anomalies and negligible negative Eu anomalies (0.62 to 0.99 in Eu/Eu^*), which are similar to those of the adakitic rock; and trachyandesite are from 52.09% to 61.08% in SiO_2 , high Al_2O_3 (>16.6%) and K_2O (>2%), low MgO ($\leq 2.64\%$, 0.08 to 0.38 in $\text{Mg}^\#$) characterizes by high REE (>180 $\mu\text{g/g}$), U ($\geq 0.80 \mu\text{g/g}$), Th (>4 $\mu\text{g/g}$) and Sr (>350 $\mu\text{g/g}$) contents, and low Cr (<28 $\mu\text{g/g}$), Ni (<19 $\mu\text{g/g}$) contents and low Sr/Y ratio (≤ 23) and by strongly fractionated LREE (10.22 to 16.28 in $(\text{La/Yb})_N$) and distinct negative Eu and Sr anomalies, which differ from those of the adakitic rock. All the volcanic rocks also show positive Pb and Ba anomalies, and negative Nb-Ta anomalies, and have moderate $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ (20.15 to 23.34), T_{DM} (1.45 to 1.50 Ga) and low

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41130315); 国家重点基础研究“973”课题(No. 2006CB403501)。

作者简介: 李伍平(1963—), 男, 博士, 教授, 岩石学专业。E-mail: wpli841@suho.com

$\epsilon_{Nd}(t)$ (−7.69 to −8.62), which are similar to the features of the EMI-like component and of the ancient continental lower crust of the North China craton and the Late Jurassic–Early Cretaceous volcanic rocks in Yanshan orogen belt. In this paper, author thinks that andesitic magmas of Lanqi Formation are derived partial melting of foundered lower continental basaltic crust near the transition between the crust–mantle and occur the interaction of the mantle and crust, and trachyandesitic magmas from partial melting of foundered lower continental basaltic crust. The magma evolution of Lanqi Formation indicates that the process of the crust thinning from the thicken crust, it is an important significance to understand the deep process for the lithospheric thinning of the North China Craton during the Mesozoic era.

Key words: Late Jurassic; Lanqi Formation; trachyandesite; andesitic breccia lava; partial melting; Beipiao area; petrology; geochemistry.

0 引言

近年来,燕山地区晚侏罗世髫髻山组和蓝旗组火山岩的研究取得了重要进展.一方面对髫髻山组和蓝旗组火山岩进行了年代测试,取得了一批高精度的年龄数据(陈义贤和陈文寄,1997;李伍平等,2001b;袁洪林等,2005;张宏等,2005;刘健等,2006;马强和郑建平,2009);另一方面对髫髻山组和蓝旗组火山岩进行了较系统的岩石地球化学研究,探讨了岩石成因及其动力学过程(李伍平等,2001a,2001c,2007;武广等,2003;李伍平和李献华,2004;袁洪林等,2005;Yang and Li, 2008).髫髻山组和蓝旗组火山岩普遍具有埃达克质火山岩的地球化学特征,其成因是下地壳玄武质岩石的部分熔融(张旗等,2001;李伍平等,2007).为此,张旗等(2001)提出中国东部燕山期可能存在一个类似于当今青藏高原的厚地壳的观点(即东部高原),引起了国内外地质学家的广泛关注.而且,从侏罗纪到白垩纪,燕山造山带发生了重要的构造转换(赵越等,2004;李伍平等,2007),华北克拉通也经历了岩石圈减薄过程(Deng *et al.*, 2007; Yang and Li, 2008).

前人(陈义贤和陈文寄,1997;Yang and Li, 2008)曾对北票地区蓝旗组火山岩进行了初步的地球化学研究,并取得了一定的研究成果,但对该套火山岩地层系统的岩浆演化和岩石学研究还不足.为此,笔者试图通过对辽西北票地区典型蓝旗组火山岩剖面的地层、岩石学和地球化学进行研究,探讨其岩浆演化与岩石成因,并通过与燕山造山带中生代火山岩的对比,探讨其深部作用过程,为理解华北克拉通岩石圈深部减薄过程提供依据.

1 区域地质和火山岩地质

辽西北票位于华北陆块北缘燕山造山带的东

部,是燕山造山带的重要组成部分.广泛分布着不同时代中生代火山岩.近年来,对辽西北票早侏罗世兴隆沟组(J_1x)高镁英安岩的地球化学研究(Gao *et al.*, 2004;李伍平,2006;Yang and Li, 2008),加深了对中生代岩浆深部作用过程的理解.辽西蓝旗组(J_3l)火山岩也广泛分布在北票盆地、金岭寺—羊山盆地、陵源—三家子盆地和汤神庙盆地等地,主要由玄武安山岩、安山岩、粗安岩和流纹岩组成.以北票盆地蓝旗东沟蓝旗组典型剖面为例(图1),该剖面位于106国道562.85 km处蓝旗东沟南部近南东向沟中,地层出露较完整.蓝旗组(J_3l)上伏土城子组(J_3t)紫红色页岩,下覆海房沟组(J_2h)褐黄色砾岩.蓝旗组(J_3l)与土城子组(J_3t)和海房沟组(J_2h)均为平行不整合接触关系(图2).

按照火山岩的喷发相,蓝旗组(J_3l)从下到上分为2段:下段为爆发相堆积,主要为灰紫色安山质角

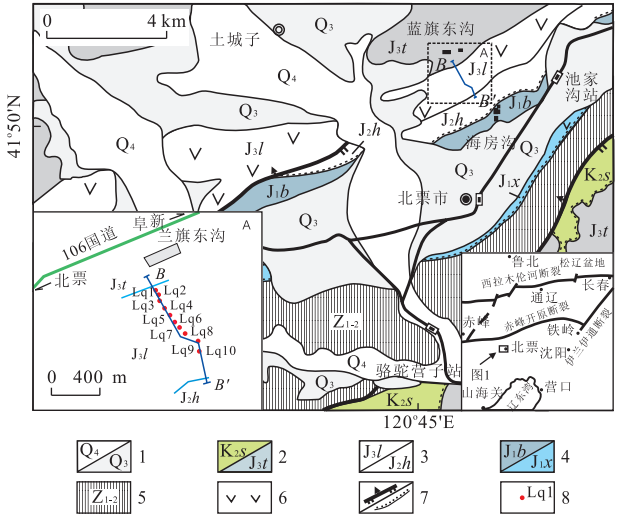


图1 辽西北票地区区域地质(据1:20万区域地质图改编)
Fig.1 Regional geological sketch map of Beipiao area
1. 第四系/第三系;2. 上白垩统孙家湾组/上侏罗统土城子组;3. 上侏罗统蓝旗组/中侏罗统后城组;4. 下侏罗统北票组/下侏罗统兴隆沟组;5. 震旦系;6. 火山岩;7. 断层/角度不整合接触界线;8. 采样位置与样品编号

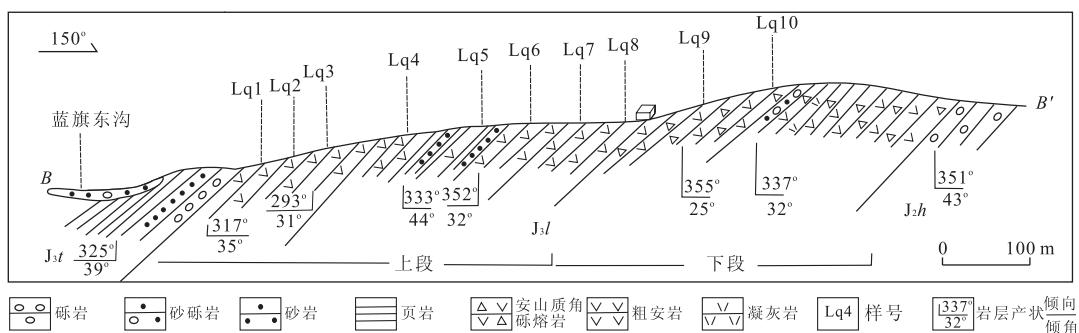


图 2 北票蓝旗东沟蓝旗组火山岩剖面

Fig. 2 Sectional drawing of volcanic rocks of the Lanqi Formation in Lanqidonggou, Beipiao area

砾熔岩(Lq10, Lq9), 夹多层薄层状凝灰岩及至少 1 层砾岩夹层(<10 m), 总厚度约 200 m; 上段为溢流相堆积, 主要为灰色气孔杏仁状粗安岩(Lq8~Lq1), 中间夹有 2 层紫红色砂页岩(厚约 12 m), 总厚度约 250 m。其中, 粗安岩风化面呈灰紫色, 岩石致密, 具有斑状结构、细小的气孔和杏仁状构造。下段与上段为连续堆积。

辽西北票蓝旗组(J₃l)火山岩形成于晚侏罗世。陈义贤和陈文寄(1997)对河北建昌盆地蓝旗组底部粗安岩进行了 K-Ar 年龄分析, 获得全岩 Ar-Ar 等时线年龄为 161.1 Ma 和 177.8 Ma, 平均年龄为 163.8 Ma。赵越等(2004)对辽西北票蓝旗组上部粗安岩进行了年代测试, 获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 158±1 Ma。张宏等(2005)获得辽西凌源蓝旗组(J₃l)上部英安岩锆石 U-Pb 年龄为 157.1±2.4 Ma。Yang and Li(2008)报道的辽西北票蓝旗组(J₃l)上部安山玢岩和安山岩锆石 U-Pb 年龄分别为 153±2 Ma 和 160±6 Ma。马强和郑建平(2009)报道的北票常河营子蓝旗组(J₃l)上部安山质角砾熔岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 159.4±3.4 Ma。

2 样品采集与样品分析

样品采集于辽西北票东北蓝旗东沟南面蓝旗组剖面上, 采样从上而下沿着露头连续采集(图 2)。选择 10 件代表性样品进行了分析。除 2 件样品(Lq10, Lq9)为火山角砾熔岩外, 其余 8 件样品为粗安质熔岩。这 2 类火山岩的岩相学特征如下。

安山质角砾熔岩: 灰紫色、紫红色, 角砾状构造。角砾主要为安山质角砾, 粒径 1~7 cm 不等, 含量 40%~60%, 安山质角砾具有微晶交织结构和杏仁

状构造, 少量的斜长石或辉石斑晶, 形态不规则, 大部分已绢云母化或褐铁矿化, 粒径<1 mm。角砾之间为熔浆充填, 具有斑状结构。斑晶(7%~10%)主要为斜长石和少量辉石, 均呈自形一半自形板状, 斜长石斑晶聚片双晶发育, 属于中更长石(An₃₅₋₄₅), 辉石大部分已绿帘石化或绿泥石化; 基质(93%~90%)为微晶交织结构, 主要由微晶斜长石和火山玻璃组成。

粗安岩: 灰色, 风化呈灰紫色, 具斑状结构、块状构造或杏仁状构造。斑晶(10%~15%)主要为斜长石(An₂₅₋₄₀), 少量辉石和黑云母, 斜长石斑晶为自形一半自形板状, 具有卡钠复合双晶和聚片双晶, 属于中更长石, 粒径 0.5~8.0 mm 不等, 略具定向性; 辉石半自形状, 多绿泥石化或绿帘石化; 黑云母呈片状, 基本已褐铁矿化; 基质(90%~85%)为玻晶交织结构, 主要由斜长石微晶和火山玻璃组成。杏仁主要充填褐铁矿与石英。

样品新鲜。样品分析前需做适当处理。对于有杏仁体的样品, 将样品碎小, 尽量剔除杏仁体; 对于有火山角砾的样品, 尽量剔除角砾并保留熔浆部分。所有样品经破碎(<10 mm)、用去离子水超声波反复清洗、烘箱烘干(<105 °C)、研磨成粉样(200 目)等程序后, 送中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室进行分析。

在样品分析过程中, 除灼失量用重量法分析外, 主量元素用 X 射线荧光分析, 微量元素用 PE Elan 6000 型 ICPMS 方法分析, 分析方法与流程见李献华等(2002)所述。Nd 和 Sr 同位素比值在英产“ISOPROB”型多接收器等离子体质谱仪上(MC-ICPMS)分析。同位素实验流程本底 Sr 为 2×10⁻¹⁰~5×10⁻¹⁰ g, Nd 小于 5×10⁻¹¹ g。Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量通过 ICPMS 分析测得, 分析方法与流程见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003)。

3 地球化学

实验分析结果见表 1.

在 SiO₂-碱总量图解中(图 3),下段火山岩落在安山岩区;上段火山岩主要落在粗安岩区和玄武粗安岩区.在 SiO₂-K₂O 图解(图 4)中,火山岩主要落入高钾钙碱性系列区,表明蓝旗组火山岩总体富钾.

安山质角砾熔岩(Lq9,Lq10) SiO₂ 为 56.99%~58.22%,较高的 Al₂O₃ (15.11%~15.34%),较高的 MgO(3.33%~4.22%,Mg[#]=0.44~0.49)和 Na₂O(3.35%~3.51%)、较低的 K₂O(1.53%~2.18%)含量及 K₂O/Na₂O 比值(0.46~0.62),较低的 U(0.15~0.28 μg/g)、Th(1.84~1.94 μg/g)、Rb(31.76~58.36 μg/g)和稀土总量 ΣREE (102.75~111.30 μg/g)与重稀土元素(Y=14.85~19.37 μg/g,Yb=1.33~1.58 μg/g)含量.较高的 Cr(125.2~134.4 μg/g)和 Ni(47.00~49.05 μg/g)含量及 Eu/Eu* (0.62~0.99)、Sr/Y 值(28.18~34.84).其中,MgO、Cr 和 Ni 含量在蓝旗组火山岩中最高,而稀土总量最低.

按照 SiO₂ 含量和喷发的次序,粗安岩可以分为 3 类,包括早期喷发的粗安岩(Lq7,Lq8)、中期喷发的玄武粗安岩(Lq6,Lq5,Lq4)和晚期喷发的粗安岩(Lq3,Lq2,Lq1).早期喷发的粗安岩(Lq7,Lq8) SiO₂ 为 56.98%~57.96%,Al₂O₃ 为 16.60%~

17.52%,K₂O 为 2.62%~3.15%,MgO 为 1.16%~1.88%(Mg[#]=0.21~0.28),稀土元素总量中等(180.61~221.60 μg/g),U(0.80~1.22 μg/g)、Th(4.28~5.28 μg/g)、Rb(48.65~74.64 μg/g)、Ba(894~929 μg/g)含量较低、Eu/Eu* 比值(0.74~0.80)以及 K₂O/Na₂O 比值(0.62~0.65)较高.中期喷发的玄武粗安岩 SiO₂ 为 52.09%~52.76%,Al₂O₃ 为 17.20%~18.98%,TiO₂ 为 1.55%~1.74%,CaO 为 3.12%~6.89%,稀土总量(247.25~293.46 μg/g)较高,及 K₂O/Na₂O 比值(0.29~0.70)变化大,Cr(12.85~23.35 μg/g)、Ni(13.14~18.81 μg/g)、U(1.44~1.88 ppm)、Th(6.06~7.78 μg/g)、Ba(863~1558 μg/g)含量中等.晚期喷发的粗安岩 SiO₂ 为 58.30%~61.08%,Al₂O₃ 为 16.50%~18.37%,K₂O 为 2.11%~4.21%,Na₂O 为 4.32%~4.50%,TiO₂ 为 0.72%~1.57%,CaO 为 2.76%~4.68%,K₂O/Na₂O 比值(0.47~0.97)较高,稀土总量较高(259.079~274.32 μg/g),Cr(1.22~6.87 μg/g)和 Ni(0.76~12.78 μg/g)含量较低,U(1.97~2.26 ppm)、Th(7.94~8.12 μg/g)、Rb(67.4~126.8 μg/g)和 Ba(610~1251 μg/g)含量较高.

安山质角砾熔岩 MgO 含量偏高(3.33%~4.22%,Mg[#]=0.44~0.49),粗安岩 MgO 含量偏

表 1 北票蓝旗组火山岩主量元素分析结果(%)

Table 1 Chemical compositions of the major elements (%) of the Late Jurassic volcanic rock of Lanqi Formation, Beipiao area										
地层	蓝旗组下段		蓝旗组上段							
			早期		中期			晚期		
样号	Lq10	Lq9	Lq8	Lq7	Lq6	Lq5	Lq4	Lq3	Lq2	Lq1
岩性	安山质角砾熔岩		粗安岩		玄武粗安岩			粗安岩		
SiO ₂	58.22	56.99	56.98	57.96	52.68	52.09	52.76	60.99	61.08	58.30
TiO ₂	0.88	0.89	1.29	1.10	1.74	1.55	1.72	0.77	0.72	1.57
Al ₂ O ₃	15.34	15.11	16.60	17.52	17.20	18.98	18.08	17.59	16.50	18.37
TF _{e2} O ₃	8.36	8.85	9.48	8.67	9.52	10.47	9.79	5.10	4.86	6.19
MnO	0.09	0.08	0.07	0.08	0.14	0.08	0.09	0.12	0.09	0.13
MgO	3.33	4.22	1.88	1.16	2.64	0.43	2.35	1.58	1.19	0.73
CaO	5.68	6.35	5.12	4.20	6.89	3.12	6.89	3.20	2.76	4.68
Na ₂ O	3.51	3.35	4.02	5.10	3.85	7.30	3.95	4.32	4.50	4.47
K ₂ O	2.18	1.53	2.62	3.15	2.71	2.09	2.69	4.21	4.18	2.11
P ₂ O ₅	0.22	0.27	0.51	0.61	0.84	0.69	0.84	0.34	0.33	0.64
LOI	2.27	2.81	1.30	1.02	1.90	2.82	1.51	2.43	2.90	2.52
Total	100.07	100.46	99.86	100.56	100.09	99.63	100.68	100.65	99.10	99.71
Mg [#]	0.44	0.49	0.28	0.21	0.35	0.08	0.32	0.38	0.33	0.19
ACNK	0.83	0.81	0.88	0.90	0.79	0.95	0.82	1.01	0.97	1.01
K ₂ O/Na ₂ O	0.62	0.46	0.65	0.62	0.70	0.29	0.68	0.97	0.93	0.47

注:1. Mg[#] = Mg/(Mg+Fe), ACNK = Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)摩尔数;2. 主量元素分析采用 X 荧光分析.

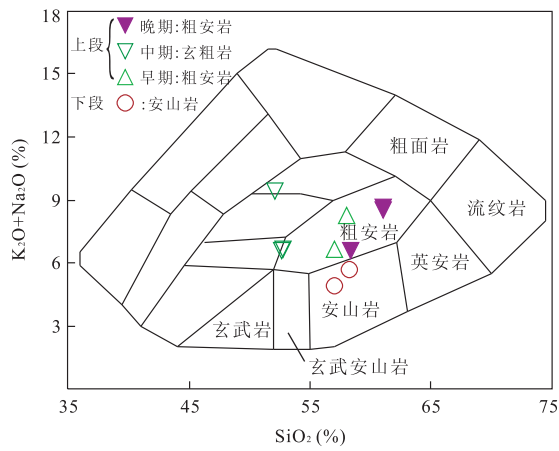


图 3 SiO₂-(K₂O+Na₂O)关系图解
Fig. 3 SiO₂ vs. (K₂O+Na₂O) diagram

低($\text{MgO} \leq 2.64\%$, $\text{Mg}^\# \leq 0.38$), 但它们的 Al_2O_3 含量都高($>15\%$)。总体上大离子亲石元素(如 Rb、Ba、Sr、Pb)及轻稀土元素(LREE)含量高, 相容元素(如 Cr、Ni、Co)和高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Hf)偏低, 铝饱和指数 ACNK ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分子数之比) ≤ 1.01 ($0.79 \sim 1.01$), 属于准铝质类型。

在稀土元素配分曲线图上(图 5a), 安山质角砾熔岩和粗安岩均为轻稀土富集型($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 10.22 \sim 21.55$), 但安山质角砾熔岩稀土元素含量低于粗安岩

($\sum \text{REE} = 102.75 \sim 111.30$), Eu 负异常弱($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.62 \sim 0.80$); 粗安岩稀土元素含量高($\sum \text{REE} = 180.61 \sim 293.46$), Eu 负异常明显($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.93 \sim 0.99$)。在微量元素蛛网图上(图 5b), 安山质角砾熔岩和粗安岩均出现轻稀土元素(如 La~Pr)和 Pb 相对富集、高场强元素(如 Nb、Ta)相对亏损的现象。但安山岩 Ba、Sr 和 Eu 相对富集, 粗安岩则 Ba 相对富集而 Sr、Eu 相对亏损, 这些特征类似于大陆下地壳的地球化学特征(Rudnick and Gao, 2003)。

3 件粗安岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.512\,103 \sim 0.512\,151$, $\epsilon_{\text{Nd}}(160)$ 为 $-8.62 \sim -7.69$, 亏损地幔模式年龄(T_{DM})为 $1.45 \sim 1.50\text{ Ga}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.706\,6 \sim 0.706\,9$, $\epsilon_{\text{Sr}}(160)$ 为 $20.15 \sim 23.34$ 。Pb 同位素具有非放射成因铅特征($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.17 \sim 16.78$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.62 \sim 37.00$ (Yang and Li, 2008))。显然, 蓝旗组火山岩具有低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、适中的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和非放射成因 Pb 同位素特征, 类似于富集地幔端元 EMI 组分(Zindler and Hart, 1986)或大陆岩石圈地幔(Fraser *et al.*, 1985)。

4 讨论

4.1 北票蓝旗组火山岩的演化

为了探讨北票蓝旗组火山岩岩浆演化, 有必要探

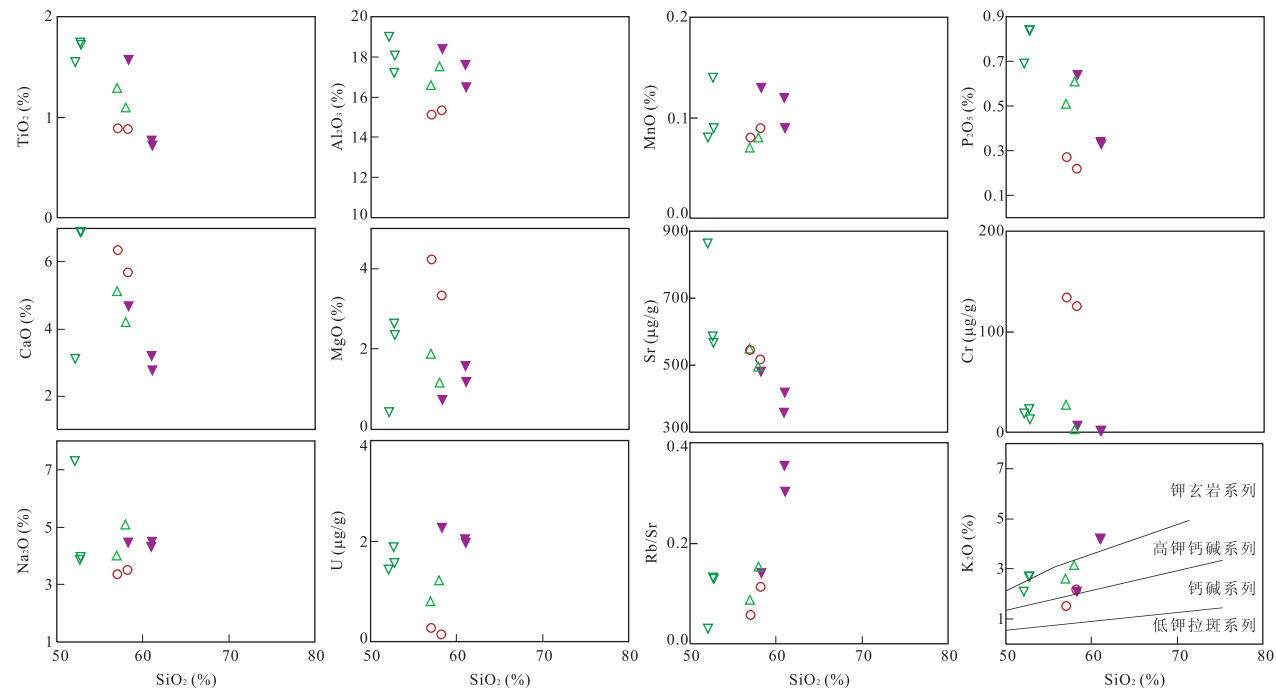


图 4 SiO₂ 与主要氧化物及微量元素哈克图解(图例同图 3)
Fig. 4 SiO₂ vs. main oxides and trace elements Hark diagram

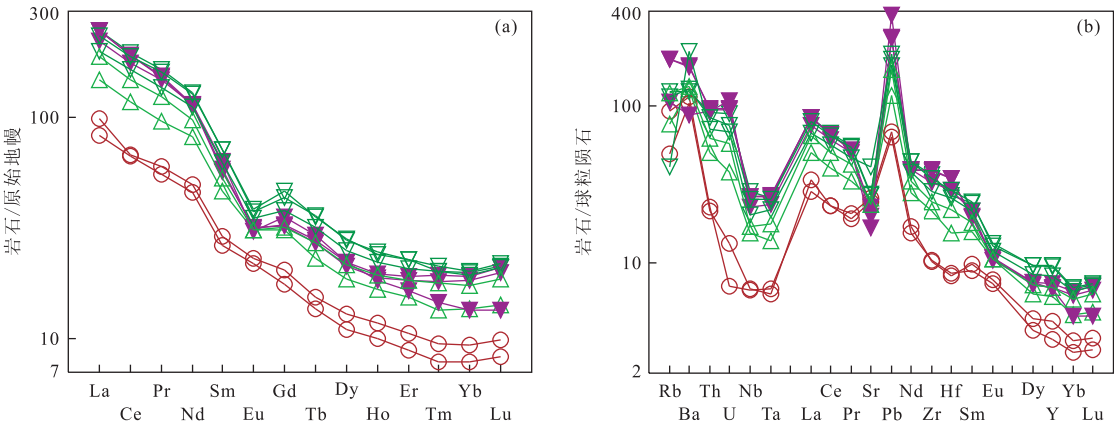


图 5 北票蓝旗组火山岩稀土元素配分曲线模式(a)与微量元素蛛网图(b)(图例同图 3, 标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primary mantle-normalized incompatible element patterns (b) for the Late Jurassic Lanqi Formation, Beipiao area

究清楚火山岩在地层中的分布情况. 从蓝旗东沟火山地层分析, 北票蓝旗组火山岩地层至少夹有 3 层沉积岩, 表明其火山岩是多次岩浆活动的产物. 下段安山质角砾熔岩夹多层凝灰岩, 至少夹有 1 层砾岩, 说明下段至少发生过 2 次较大规模(厚度分别约 100 m)的安山质岩浆喷发事件; 上段粗安质岩浆夹 2 层沉积岩, 且沉积岩夹层上下火山熔岩的成分有明显差异, 说明上段至少发生过 3 次喷发事件. 上段沉积岩夹层中出现的粗安质岩浆活动规模相对较小(厚度<10 m). 从火山爆发的强度来看, 北票蓝旗组下段火山爆发强烈, 为爆发相, 火山喷出物为安山质角砾熔岩及其凝灰岩; 上段火山爆发强度较弱, 为溢流相, 产物为粗安质熔岩. 从火山岩的成分分析, 北票蓝旗组火山岩至少发生 2 种成分的岩浆活动, 即安山质岩浆和粗安质岩浆. 其中, 下段为安山质岩浆, 上段为粗安质岩浆, 但上段粗安质岩浆的成分变化较大. 该蓝旗组火山岩剖面缺失玄武质岩浆、英安质岩浆和粗面质岩浆活动等过渡性成分的岩浆(图 3), 表明岩浆结晶分异作用在岩浆演化过程中并非起主导作用, 即北票蓝旗组火山岩并非起源于玄武岩浆结晶分异的产物.

从岩浆成分演化分析, 北票蓝旗组下段安山角砾熔岩(SiO_2 为 56.99%~58.22%)与上段早期的粗安岩(SiO_2 为 56.98%~57.96%)相比, 两者 SiO_2 含量接近, 但主、微量元素差异明显. 安山角砾熔岩具有较高含量的 CaO 、 MgO ($\text{Mg}^\#$)、 Cr 、 Ni 、 Co 等和较低含量的 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 K_2O 、 Pb 、 U 、 Th 等. 其中, 安山质角砾熔岩中 Cr 、 Ni 、 Co 和 MgO 含量介于燕辽地区晚侏罗世髯髻山组和蓝旗组埃达克质火山岩(李伍平等, 2007)、早侏罗世北票兴隆沟组高镁英安

岩(Gao *et al.*, 2004; 李伍平, 2006)及早白垩世义县组粗安岩(李伍平等, 2002; Yang and Li, 2008), 这意味着蓝旗组下段安山质岩浆发生了明显的壳幔相互作用, 或者岩浆来源更深, 或者受到大陆地壳影响较小. 上段粗安岩, 从早到晚, SiO_2 含量由 56%~58%→52%~53%→58%~62%, 相应的 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 Cr 、 Co 、 Ni 和 Sr 含量呈现出“低→高→低”演化趋势, 而 U 、 Th 、 Pb 、 Rb 、稀土等元素含量出现“低→高→高”的演化趋势. 相对于安山质角砾熔岩, 所有粗安岩普遍具有较低的 MgO 、 Cr 、 Ni 和 Co , 较高 K_2O 、 U 、 Th 、 Pb 和 Rb , 说明粗安质岩浆未发生过明显的壳幔相互作用, 或者粗安质岩浆受地壳影响要比安山质岩浆大. 这与粗安岩在显微镜下观察到含有黑云母相吻合. 另外, 从岩浆成分演化上, 上段粗安质岩浆并非安山质岩浆结晶分异的产物或者由玄武质岩浆结晶分异形成. 因此, 北票蓝旗组安山质岩浆和粗安质岩浆可能是部分熔融的产物.

4.2 北票蓝旗组火山岩的起源

北票蓝旗组火山岩具有低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、适中的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和非放射成因 Pb 同位素特征, 类似于富集地幔端元 EMI 组分(Zindler and Hart, 1986)或大陆岩石圈地幔(Fraser *et al.*, 1985), 与华北克拉通寒武纪结晶基底基性麻粒岩和燕辽地区晚侏罗世中酸性埃达克质火山岩的地球化学特征相似(李伍平等, 2007), 但明显不同于本地区早侏罗世兴隆沟组高镁英安岩高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、适中的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和放射成因 Pb 同位素特征(Gao *et al.*, 2004; 李伍平, 2006). 所有蓝旗组火山岩具有轻稀土元素和 Pb 相对富集、高场强元素(如 Nb 、 Ta)相对亏损(图 5b)以及较低的 Ce/Pb 比值, 类似于燕山造山带晚侏罗世火山岩的总体

特征(李伍平等,2007),或大陆下地壳的地球化学特征(Rudnick and Gao, 2003). 这表明北票蓝旗组火山岩起源于华北克拉通下地壳玄武质岩石的部分熔融,而非俯冲洋壳或洋壳残片的部分熔融,即古亚洲洋的俯冲残片并未参与蓝旗组火山岩的形成。

从火山岩的地球化学分析可知,北票蓝旗组下段安山质角砾熔岩具有埃达克岩地球化学特征. 如较高 SiO_2 ($>56\%$) 和 Al_2O_3 ($>15\%$) 含量,较高的 MgO ($\leq 4.22\%$) 含量和较低的重稀土元素含量 ($\text{Y} \leq 14.37 \mu\text{g/g}$, $\text{Yb} \leq 1.58 \mu\text{g/g}$);稀土分馏明显 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 10.49 \sim 10.59$),无明显的 Eu 负异常;富集大离子亲石元素(如 Ba, Pb)和亏损高场强元素(Nb-Ta),Sr、Eu 正异常;较高的 Sr/Y 比值(>28). 这些特征与岛弧俯冲环境下洋壳部分熔融形成典型的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990)、残留洋壳部分熔融形成的埃达克质岩(李伍平,2006)和燕辽地区同时代增厚下地壳玄武质岩石部分熔融形成的埃达克质火山岩(李伍平等,2001a,2001b,2001c; Yuan *et al.*, 2006; 李伍平等,2007)相似. 结合同位素组成,发现蓝旗组下段安山质角砾熔岩与燕辽地区晚侏罗世埃达克质火山岩相似. 因此,较高的 Sr 含量与 Sr/Y 比值和较低的重稀土元素含量与不明显的 Eu 负异常,表明安山质岩浆源区应残留石榴石或者少量的角闪石,不含斜长石等;Nb-Ta 负异常表明源区可能残留有金红石(Xiong *et al.*, 2005)或地壳源区的制约;而石榴石和金红石残留在源区,意味着安山质岩浆起源于较厚的下地壳(深度大于50 km). Pb 正异常表明岩浆受到地壳源区成分的制约. 安山质角砾熔岩中较高的 Cr、Ni、Co 和 MgO 含量,意味着蓝旗组安山质岩浆发生了明显的壳幔相互作用。

北票蓝旗组上段的粗安岩 SiO_2 变化于 $52\% \sim 62\%$, Al_2O_3 ($\geq 16.6\%$)、 Na_2O ($\geq 3.8\%$)、 K_2O ($\geq 2.09\%$) 含量较高,稀土总量($>180 \mu\text{g/g}$)和重稀土元素含量及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(平均0.66)较高, Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.6 \sim 0.8$)、Sr 负异常,表明粗安质岩浆发生了斜长石的结晶分异;Nb-Ta 负异常和更明显的 Pb 正异常,较高的 K_2O 、U 和 Th 含量,表明粗安质岩浆可能受到地壳源区成分的制约(即源区富钾富碱);较低 MgO、Cr、和 Ni 含量,表明粗安质岩浆未发生过壳幔相互作用。

尽管 Sr 含量也较高,但由于较高的重稀土元素含量,导致 Sr/Y 比值(<23)较低,类似于正常岛弧安山岩,表明岩浆源区未残留石榴石,或者可能残留

斜长石等,这意味着粗安质岩浆的形成深度浅于安山质岩浆. 在显微镜下,无论是粗安岩还是安山质角砾熔岩,都含有中长石和辉石斑晶,表明其岩浆不可能起源于上地壳或下地壳长英质岩石. 结合 Nd、Sr 和 Pb 同位素组成,笔者认为粗安质岩浆仍起源于下地壳玄武质岩石的部分熔融,但岩浆形成深度则较安山质岩浆浅。

从本文资料及 Yang and Li(2008)获得的蓝旗组安山岩和粗安岩共 14 个样品($\text{SiO}_2 = 52\% \sim 60\%$)的初始 Sr-Nd 同位素组成与 SiO_2 之间没有明显的相关性, Nb/Ta (16.00 ~ 19.35) 和 Z/Hf (40.36 ~ 49.97) 总体保持不变,说明这些同位素组成和微量元素比值总体代表了岩浆的原始特征,岩浆在演化过程中受地壳混染作用影响较小. 对比燕辽地区同期埃达克质火山岩地球化学特征及其成因,笔者认为北票蓝旗组下段安山质岩浆和上段粗安质岩浆均起源于下地壳玄武质岩石的部分熔融,其中,安山质岩浆起源深度大于粗安质岩浆,很可能起源于壳幔过渡带并可能受到地幔物质的影响,这意味着晚侏罗世北票地区蓝旗组安山质岩浆到粗安质岩浆经历了地壳减薄的过程。

从近年来已发表的燕山造山带晚侏罗世火山岩资料来看(图6),除北票蓝旗组上段粗安岩外,晚侏罗世髫髻山期/蓝旗期普遍具有埃达克质火山岩地球化学特征(李伍平等,2007; Yang and Li, 2008). 类似北票蓝旗组火山岩这种现象在晚侏罗世少见,仅在北京西山早白垩世东岭台组中酸性火山岩中出现过(李伍平等,2000; 李晓勇等,2004; 袁洪林等,

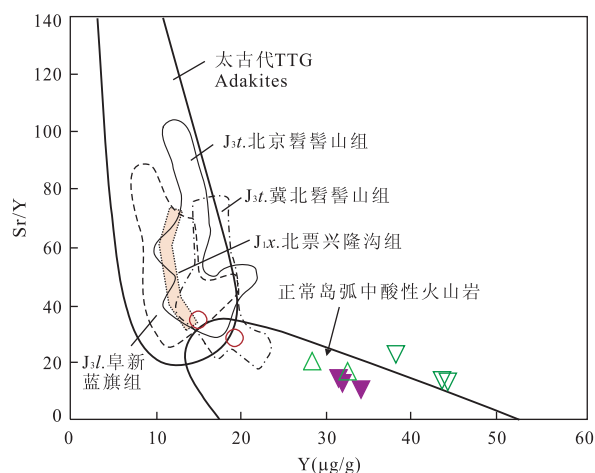


图6 Sr/Y-Y关系图解(据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 6 Sr/Y vs. Y diagram

图例同图3,图中北京、冀北髫髻山组和阜新蓝旗组资料见李伍平等(2001a,2001b,2001c,2007)及李伍平和李献华(2004)

2005),冀北大面积分布的早白垩世张家口组中酸性火山岩已不具备埃达克质岩地球化学特征(未发表资料),尽管辽西义县组粗安岩具有埃达克质岩地球化学特征,但成因不同(李伍平等,2002;Yang and Li, 2008).因此,从燕山造山带辽西早侏罗世埃达克质岩的出现,到晚侏罗世埃达克质岩的大规模形成,直至早白垩世埃达克质岩的逐渐消失,总体说明了在燕山造山带地壳厚度由厚变薄.这种减薄过程在燕山地区不是同时发生的,有些地方(如辽西北票)发生较早(早侏罗世—晚侏罗世),有些地方(如北京西山和辽西义县)发生较晚(晚侏罗世—早白垩世),有些地方(如冀北下板城)则介于二者之间(晚侏罗世).即使是同一地区时间上也是有差异的(如辽西地区),但总体来看,地壳减薄过程的高峰期是在晚侏罗世—早白垩世(如冀北和辽西).同时也说明,燕山造山带在中生代期间地壳厚度是不均匀的.

燕山造山带中生代地壳减薄过程与区域上岩石圈减薄几乎是同步发生的.表现在区域上有限的岩石圈伸展,在辽西出现了大规模的基性火山岩喷发(李伍平等,2002;Yang and Li, 2008),数量不多的碱性花岗岩侵入(李伍平,中国科学院广州地球化学研究所博士后研究报告,2002;杨富全等,2003;Yang *et al.*, 2008)和变质核杂岩形成(宋鸿林,1996).因此,晚侏罗世到早白垩世是燕山造山带岩浆活动、岩石圈演化和构造变形的重要转折时期(赵越等,2004;李伍平等,2007).

5 结论

(1)辽西北票晚侏罗世蓝旗组火山岩地层是多次岩浆活动的产物,早期为安山质岩浆活动,晚期为粗安质岩浆活动.

(2)辽西北票晚侏罗世蓝旗组下部安山质角砾熔岩具有埃达克质岩的地球化学特征,而上部粗安岩不具有埃达克质岩地球化学特征,二者地球化学特征的差异说明其成因不同.其中,安山质岩浆起源深度较粗安质岩浆深度大,可能源于壳幔过渡带下地壳玄武质岩石的部分熔融,并发生了明显的壳幔相互作用,而粗安质岩浆起源于下地壳玄武质岩石的部分熔融.

(3)北票蓝旗组从安山质岩浆到粗安质岩浆的演化,表明北票地区晚侏罗世地壳发生了由厚减薄的过程.同时也说明,燕山造山带在中生代期间地壳厚度是不均匀的,岩石圈减薄不是同时进行的.

致谢:样品分析过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所梁细荣研究员、涂湘林副研究员、刘颖副研究员、胡光黔工程师、曾文工程师和马金龙工程师等帮助,野外采样得到了马强同志的帮助,在此一并表示感谢!

References

- Chen, Y. X., Chen, W. J., 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning Province and surrounding area—geochronology, geochemistry and tectonic environment. Seismic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(18): 662—665.
- Deng, J. F., Su, S. G., Niu, Y. L., et al., 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China craton: evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96 (1—2): 22—35. doi:10.1016/j.lithos.2006.09.009
- Fraser, K. J., Hawkesworth, C. J., Erland, A. J., et al., 1985. Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(1—2): 57—70. doi:10.1016/0012-821X(85)90148-7
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432:892—897. doi:10.1038/nature03162
- Li, W. P., 2006. Geochemical characteristics of the Early Jurassic dikes of the Xinglonggou Formation in Beipiao area, West Liaoning Province. *Acta Petrological Sinica*, 22(6):1608—1616 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Li, X. H., 2004. Petrogenesis and its implication for the Middle-Late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen. *Acta Petrological Sinica*, 20(3): 501—510 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Li, X. H., Lu, F. X., 2001a. Genesis and geological significance for the Middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of West Liaoning, northeastern China. *Acta Petrological Sinica*, 17(4): 523—532 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Lu, F. X., Li, X. H., et al., 2001b. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing. *Acta Petrological Mineralogica*, 20(2): 123—133 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Lu, F. X., Li, X. H., 2001c. Genesis for Jurassic trachyandesite in Western Hills of Beijing and its geo-

- logical significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 247—254 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Li, X. H., Lu, F. X., et al., 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of Early Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 193—204 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Lu, F. X., Sun, S. P., et al., 2000. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 345—352 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Zhao, Y., Li, X. H., et al., 2007. Genesis of the Middle-Late Jurassic volcanic rocks of Tiaojishan (Lanqi) period and its geodynamic implication, Yanshan orogen, East China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 557—564 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Liu, Y., Tu, X. L., et al., 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICPMS: a comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochemica*, 31(3): 289—294 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Y., Guo, F., Fan, W. M., et al., 2004. Early Cretaceous trachytes of Donglingtai Formation from the Xishan area in the northern North China block: constraints on melting of lower mafic crust. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2): 155—164 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X. R., Wei, G. J., Li, X. H., et al., 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochemica*, 32(1): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Zhao, Y., Liu, X. M., 2006. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chengde basin, northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2717—2630 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Zheng, J. P., 2009. In-Situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons in the volcanic rock of the Lanqi Formation in the Beipiao area, western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3287—3297 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick, R. L., ed., *Treatise on geochemistry*, volume 3. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1—64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
- Song, H. L., 1996. Characteristics of Fangshan metamorphic core complex, Beijing and a discussion about its origin. *Geoscience*, 10(2): 149—158 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. J., Liang, X. R., Li, X. H., et al., 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS. *Geochemica*, 31(3): 295—299 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G., Li, Z. Q., Li, Z. T., 2003. Identification of adakite-like rocks in the Middle Jurassic volcanic rocks from Haifanggou Formation in West Liaoning area and its geological significance. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30(5): 457—461 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3—4): 339—359. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.01.014
- Yang, F. Q., Wu, H., Liu, X. W., et al., 2003. The Jiashan syenite in northern Hebei Province: an early record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt. *Geological Review*, 49(5): 474—485 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and thrust belt, eastern North China craton: geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. *Journal of Petrology*, 49(2): 315—351. doi: 10.1093/petrology/egm083
- Yang, W., Li, S. G., 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning: implications for lithospheric thinning of the North China craton. *Lithos*, 102(1—2): 88—117. doi: 10.1016/j.lithos.2007.09.018
- Yuan, H. L., Liu, X. M., Liu, Y. S., et al., 2006. Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of Late-Mesozoic lavas from Xishan, Beijing. *Science in China (Ser. D)*, 49(1): 50—67.
- Zhang, H., Liu, X. M., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Zircon U-Pb ages and significance of bottom and top beds of Zhangjiakou Formation in Liaoning and Hebei Provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 387—401 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001. An East China plateau in Mid-Late Yanshanian period: implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2):

248—255 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S. H., et al., 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319—328 (in Chinese with English abstract).

Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 14: 493—571.

附中文参考文献

陈义贤, 陈文寄, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社.

李伍平, 2006. 辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩的地球化学特征. 岩石学报, 22(6): 1608—1616.

李伍平, 李献华, 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义. 岩石学报, 20(3): 501—510.

李伍平, 李献华, 路凤香, 2001a. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. 岩石学报, 17(4): 523—532.

李伍平, 路凤香, 李献华, 等, 2001b. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. 岩石矿物学杂志, 20(2): 123—133.

李伍平, 路凤香, 李献华, 2001c. 北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 20(3): 247—254.

李伍平, 李献华, 路凤香, 等, 2002. 辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景. 岩石学报, 18(2): 193—204.

李伍平, 路凤香, 孙善平, 等, 2000. 北京西山东岭台组(J₃d)火山岩的成因及其构造环境探讨. 岩石学报, 16(3): 345—352.

李伍平, 赵越, 李献华, 等, 2007. 燕山造山带中一晚侏罗世髻髻山期(蓝旗期)火山岩的成因及其动力学意义. 岩石学报, 23(3): 557—564.

李献华, 刘颖, 涂湘林, 等, 2002. 硅酸盐岩石化学组成的

ICP-AES 和 ICPMS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289—294.

李晓勇, 郭锋, 范蔚茗, 等, 2004. 北京西山东岭台组粗面质火山岩地球化学: 下地壳熔融成因. 大地构造与成矿学, 28(2): 155—164.

梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等, 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91—96.

刘健, 赵越, 柳小明, 2006. 冀北承德盆地髻髻山组火山岩的时代. 岩石学报, 22(11): 2617—2630.

马强, 郑建平, 2009. 辽西北票蓝旗组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(12): 3287—3297.

宋鸿林, 1996. 北京房山变质核杂岩的基本特征及其成因探讨. 现代地质, 10(2): 149—158.

韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等, 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学, 31(3): 295—299.

武广, 李忠权, 李之彤, 2003. 辽西中侏罗统海房沟组埃达克质岩的确认及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(5): 457—461.

杨富全, 吴海, 刘晓文, 等, 2003. 冀北承德甲山正长岩——燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录. 地质论评, 49(5): 474—485.

袁洪林, 柳小明, 刘勇胜, 等, 2005. 北京西山晚中生代火山岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究. 中国科学(D辑), 35(9): 821—836.

张宏, 柳小明, 张晔卿, 等, 2005. 冀北滦平—辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石 U-Pb 测年及意义. 地球科学, 30(4): 387—401.

张旗, 钱青, 王二七, 等, 2001. 燕山中晚期的中国东部高埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248—255.

赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319—328.