doi:10.3799/dqkx.2013.000

# 辽西中侏罗统海房沟组火山岩的地球化学特征

# 李伍平

广州大学土木工程学院,广东广州 510006

摘要: 辽西中侏罗世海房沟组火山岩是燕山造山带中生代火山岩的重要组成部分. 海房沟组火山岩主要由粗安岩组成,其次 为英安岩和安山岩,属于准铝质岩石和高钾钙碱性火山岩系列岩石.地球化学资料表明,辽西中侏罗世海房沟组火山岩具有 低镁埃达克质火山岩的特征,如  $SiO_2 \ge 51.98\%$ ,  $Al_2O_3 \ge 15.0\%$ , MgO < 4.18% ( $Mg^{\pm} < 0.48$ ),  $Sr \ge 436 \times 10^{-6}$ ,  $Yb \le 2.25 \times 10^{-6}$ 10<sup>-6</sup>, Y≤23, 14×10<sup>-6</sup>, Cr≤81, 09×10<sup>-6</sup>, Ni≤34, 66×10<sup>-6</sup>, Y/Yb≤14, 25, Sr/Y≥39 和 Nb/Ta≈20; 轻稀土元素富集, Ba、 U、Sr 和 Pb 等相对富集,而重稀土元素和高场强元素(如 Nb、Ta、Ti)相对亏损,轻重稀土元素强烈分馏((La/Yb)<sub>N</sub>≥10.37), 具有弱的负铕异常或正异常(0.79~1.05). 另外, Nd、Sr 同位素具有较低的(143 Nd/144 Nd)初始值(0.511 603~0.511 733, ε<sub>Nd</sub>(t)=-15.84~-13.30)、适中的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 初始值(0.7049~0.7056, ε<sub>Sr</sub>(t)=8.64~18.11) 和较高的亏损地幔模式年龄 (T<sub>DM</sub>=1.81~1.99 Ga),显示出富集地幔端员(EMI, Enriched Mantle End-member)特点.上述特征表明,海房沟组埃达克质岩 浆起源于较厚下地壳榴辉岩部分融熔,其成因与玄武质岩浆的底侵作用有关.结合中生代火山岩的地球化学及其成因,认为 早一中侏罗世是燕山造山带从古亚洲洋构造体系向古太平洋构造体系的转折时期,而中侏罗世海房沟组火山岩的形成 (174 Ma)标志着燕山造山带进入了古太平洋构造体系的演化阶段,这对进一步理解燕山运动的深部过程及其岩石圈减薄提 供重要信息.

关键词:火山岩;下地壳部分熔融;海房沟组;中侏罗世;辽西;地球化学.

中图分类号: P588; P534 文章编号: 1000-2383(2013)06-1153-16 收稿日期:2012-12-28

# Geochemical Characteristics of the Middle Jurassic Volcanic Rocks of Haifanggou Formation, Western Liaoning Province, North China

#### LI Wu-ping

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

Abstract: The Middle Jurassic volcanic rocks of Haifanggou formation from the western Liaoning Province is an important component of Mesozoic volcanic rocks in the Yanshan Orogenic belt. The volcanic rocks of Haifanggou formation, which are mainly composed of trachyandesite with dacite and andesite, are metaluminous calc-alkaline and high-K series. Geochemical data indicate that the Middle Jurassic volcanic rocks of Haifanggou from the western Liaoning province have the low Mg adakitic volcanic features, such as  $SiO_2 \geqslant 51.98\%$ ,  $Al_2O_3 \geqslant 15.0\%$ , MgO < 4.18% ( $Mg^{\sharp} < 0.48$ ),  $Sr \geqslant 436 \times 10^{-6}$ ,  $Yb \leqslant 2.25 \times 10^{-6}$ ,  $Y \leqslant 2.25 \times 10^{-6}$ 23.  $14 \times 10^{-6}$ , Cr  $\leq 81.09 \times 10^{-6}$ , Ni  $\leq 34.66 \times 10^{-6}$ , Y/Yb  $\leq 14.25$ , Sr/Y $\geq 39$ , and Nb/Ta  $\approx 20$ . The rocks are enriched in light rare earth elements (LREE), Ba, U, Sr and Pb, and are depleted in heavy rare earth elements (HREE) and high field strength elements (such as Nb, Ta, Ti), and strongly fractionated ((La/Yb)<sub>N</sub>  $\geqslant$  10, 37) with weak negative Eu anomaly or positive Eu anomaly (0.79 to 1.05 in  $Eu/Eu^*$ ). In addition, these adakitic volcanic rocks also have that low ( $^{143}$ Nd/ $^{144}$ Nd) initial ratios (0. 511 603 to 0. 511 733, -15. 84 to -13. 30 in epsilon  $\varepsilon_{Nd}(t)$ ), moderate (87 Sr/86 Sr) initial ratios (0. 704 9 to 0.705 6, 8.64 to 18.11 in epsilon  $\varepsilon_{ST}(t)$ ) and a higher depleted mantle model ages (1.81 to 1.99 Ga in  $T_{DM}$ ), showing enriched mantle end-member (EMI) characteristics. These features indicate that Haifanggou adakitic magma were derived from the partial melting of a thickened eclogite from the lower crust, and its origin is related to underplating of the basaltic magma. Combining with geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Yanshan Orogenic belt, the Early-Middle Jurassic in the Yanshan orogenic belt is a conversion period from the ancient Asian Ocean tectonic system to the paleo-Pacific tectonic system, while the generation of the Middle Jurassic adaktic volcanic rocks of Haifanggou formation (174 Ma) shows that the Yanshan orogenic belt has come into the evolution stage of the paleo-Pacific tectonic system. The research results can facilitate the understanding of the deep mechanism of Yanshan movement and lithospheric thinning process.

**Key words:** volcanic rocks; lower crust partial melting; Haifanggou formation; the Middle Jurassic; the western Liaoning Province; geochemistry.

燕山造山带位于华北克拉通北缘,是典型的陆内造山带(葛肖虹,1989). 由于华北克拉通地处特提斯构造域、古亚洲洋构造域和古太平洋构造域的交叠部位(赵越等,1994),早中生代开始其南部受华北克拉通与华南克拉通拼合的影响(董树文等,2000),北部受鄂霍次克洋封闭的影响以及东部受库拉板块向东亚大陆俯冲的影响(郑亚东等,2000;赵越等,2004),在华北克拉通内部,尤其是燕山造山带发育大规模的岩浆活动、构造变形和断陷盆地,特别是中生代中晚期逐渐发育起来的北东向一北北东向环太平洋构造带叠加在近东西向构造带上,这意味着古亚洲洋构造域为主导的汇聚体制向古太平洋构造域的俯冲消减体制转变(董树文等,2000,2008;赵越等,2004;李伍平等,2007).

近年来,燕山造山带中生代火山岩地球化学及 其成因讨论十分热烈,并取得了重要进展. 中生代火 山岩地球化学研究集中在早侏罗世(Gao et al., 2004; 李晓勇等, 2004a; 李伍平, 2006; Wang et al., 2007; Yang and Li, 2008)、晚侏罗世(李伍平等, 2001a,2001b,2004,2007,2012)和早白垩世(李伍平 等,2000,2002;李晓勇等,2004b;王晓蕊等,2005; 袁洪林等,2005;汪方跃等,2007;肖高强等,2008; Yang and Li, 2008)和晚白垩世(李伍平等, 2011), 而中侏罗世火山岩研究偏弱(武广等,2003,2004). 学者们尽管对这些不同时期火山岩成因机制的解释 存在分歧,但发现这些中酸性火山岩普遍具有埃达 克岩地球化学特征.其中,早侏罗世火山岩的源区明 显受到古亚洲洋壳的制约,晚侏罗世和早白垩世火 山岩的源区则受到华北克拉通富集地幔端元(EMI, Enriched Mantle End-member)制约,而埃达克岩研 究对探讨华北克拉通岩石圈减薄具有重要意义(吴 福元等,2003;翟明国等,2005).同时,早、中侏罗世 正是燕山运动 A 幕(主幕, Wong, 1927) 发生的时 期和古亚洲洋构造域向环太平洋构造带的转折时期 (赵越等,2004;董树文等,2008). 显然,中侏罗世火 山岩地球化学及其岩石成因研究能够为认识燕山运 动的本质和上述构造体系的转变提供重要信息. 本 文通过对辽西朝阳南票盆地中侏罗世海房沟组火山 岩进行较系统的岩石学和地球化学研究,探讨岩石成因,为认识华北克拉通下地壳/岩石圈地幔性质、壳幔相互作用、构造体系转变以及燕山运动的本质提供重要信息.

## 1 区域地质背景

燕山造山带地处华北克拉通的东北部. 华北克 拉通南部扬子克拉通在晚三叠世与华北克拉通碰撞 形成秦岭一大别一苏鲁超高压变质带(Ernst et al., 2007),其北邻兴蒙造山带在古生代末古亚洲 洋完全封闭后与华北克拉通碰撞的影响下(董树文 等,2000; Xiao et al., 2003; Zhang et al., 2009),在 燕山板内造山带内部、中蒙边境和内蒙古等地形成 了近东西向的褶皱变形和大型推覆构造(郑亚东等, 2000,2005; 赵越等,2002,2004; 徐刚等,2003; 胡建 民等,2004). 中侏罗世开始,华北克拉通受到库拉板 块俯冲和北部蒙古一鄂霍茨克洋板块俯冲与闭合的 综合影响(Maruyama, 1997; Kojima et al., 2002),在燕山造山带形成了北东向的挤压推覆、褶 皱隆起(张之一,1982;杨庚等,2001;张长厚等, 2002; 胡健民等, 2005)和中一晚侏罗世大规模火 山喷发(刘健等,2006;李伍平等,2007,2012);早白 垩世,华北克拉通进入陆内伸展阶段,在燕山造山带 出现大面积的钙碱性火山岩喷发,并伴随碱性花岗 岩(李伍平等,2002; 杨富全等,2005; Yang et al., 2008)和变质核杂岩(Davis et al., 1996; 宋鸿林, 1996; Darby et al., 2004) 与断陷盆地形成. 其中, 早侏罗世与中侏罗世、晚侏罗世与早白垩世之间出 现区域性的角度不整合,分别代表了燕山运动的 A 幕和 B 幕(赵越等,2004;刘健等,2006).

# 2 火山岩地质

本文研究区的北部和南部分别以北东东西向的 康保一赤峰超岩石圈断裂和近东西向的密云一西峰 口一兴城断裂为界,西部和东部分别以北东向朝 阳一药王庙断裂和哈尔套一锦州断裂为界,其内部

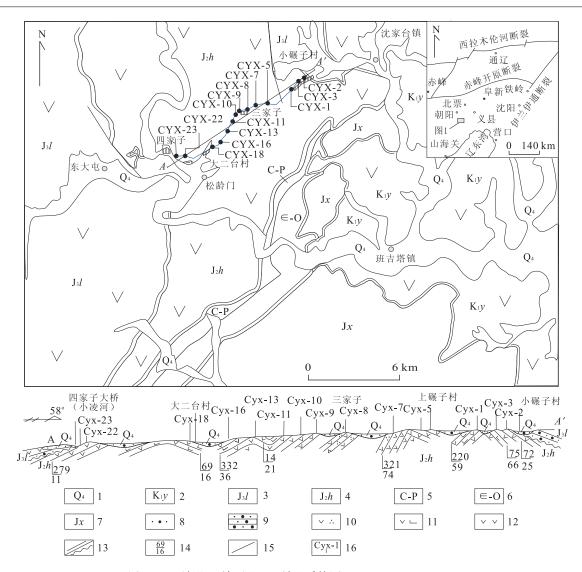


图 1 辽西朝阳一锦西地区区域地质简图(据1:20万地质图改编)

Fig. 1 Regional geological sketch map modified in Chaoyang and Jinxi areas, western Liaoning Province from 1: 200 000 regional geological maps

1. 第四系; 2. 义县组; 3. 蓝旗组; 4. 海房沟组; 5. 石炭一二叠系; 6. 寒武一奥陶系; 7. 蓟县系; 8. 松散沉积物; 9. 砂砾岩; 10. 英安岩; 11. 玄武粗安岩; 12. 粗安岩、安山岩; 13. 角度不整合; 14. 岩层产状; 15. 断层; 16. 采样点及样号

受北西向断裂切割构成菱状断裂网. 辽西中生代火山岩正好就发育在由这些断裂切割的火山一沉积盆地中(图 1). 辽西地区出露的中生代火山岩地层有早侏罗世兴隆沟组( $J_1x$ )、中侏罗世海房沟组( $J_2h$ )、晚侏罗世蓝旗组( $J_3l$ )、早白垩世义县组( $K_1y$ )和晚白垩世大兴庄组( $K_2d$ ). 从火山喷发规模和分布上,晚侏罗世蓝旗组和早白垩世义县组火山岩规模大、分布广泛,其次是中侏罗世海房沟组火山岩,早侏罗世兴隆沟组和晚白垩世大兴庄组规模小、零星分布.

本文研究海房沟组火山岩属于燕山造山带中生 代火山岩的重要组成部分,广泛分布于辽西地区金 羊盆地的南票地区、北票盆地和凌源郭家店等地.该 组底层由沉积碎屑岩夹中酸性火山岩或单一的沉积碎屑岩组成. 在横向上,海房沟组岩石类型、岩性和厚度变化都比较大,厚度  $654\sim1~400~m$ . 在北票盆地,海房沟组主要为由沉积碎屑岩夹流纹质凝灰岩组成. 以角度不整合覆盖于早侏罗统北票组、兴隆沟组或平行不整合于上三叠统老虎沟组或更老的地层之上,与上覆的晚侏罗统蓝旗组为平行不整合接触或早白垩世义县组角度不整合接触. 在南票地区,海房沟组( $J_2h$ )地层呈北东向展布,大致与蓝旗组( $J_3l$ )地层平行,与蓝旗组( $J_3l$ )、土城子组( $J_3t$ )和义县组( $I_1$ ),共同组成了中生代金岭寺一羊山火山一沉积盆地. 在该盆地东南缘为元古宇和古生界组成的

隆起带.

本文研究的海房沟组火山岩剖面位于辽西朝阳市与锦县交界处,即朝阳市东大屯乡四家子一锦县沈家台镇下碾子村之间,本文称之为四家子一下碾子剖面(图1). 该剖面火山岩出露好,剖面起点与终点海房沟组( $J_2h$ )被蓝旗组( $J_3l$ )底砾岩以平行不整合覆盖或被义县组( $K_1y$ )角度不整合覆盖(图1). 在剖面以东南,海房沟组( $J_2h$ )则以角度不整合覆盖于石炭系一二叠系、寒武系一奥陶系和元古代地层之上.

关于海房沟组的时代,辽宁省地质调查局(1969)在1:200000锦西幅区域地质调查时将其划为早侏罗统兴隆沟组.之后,辽宁省区域地质志(1989)根据区域地层对比和古生物化石对比将其划为中侏罗统海房沟组.武广等(2004)取得了海房沟组火山岩的 Rb-Sr 等时线年龄为177.2±28.0 Ma.基于以上研究成果和区域地层层序对比(徐刚等,2005),考虑到本文剖面上下岩石地层接触关系,本文将辽西海房沟组火山岩暂归于中侏罗统.

## 3 岩相学

主要岩石类型是粗安岩,少量见英安岩和安山岩,岩石学特征如下:

玄武粗安岩(CYX-2, 13, 16, 18),灰黑色、灰紫色,斑状结构,致密块状构造或角砾状构造.斑晶(5%~10%)主要为辉石和斜长石,辉石呈自形一半自形,部分已绿帘石化;斜长石斑晶呈自形一半自形,主要为中拉长石( $An_{35-60}$ ). 基质由斜长石和辉石微晶及火山玻璃组成.

粗安岩(CYX-3, 5, 9, 10, 22, 23)为海房沟组分布最广的岩石. 灰黑色、灰紫色、紫色,具斑状结构,致密块状构造或角砾状构造,少量具有气孔状构造. 斑晶(10%)主要为中长石(An<sub>35-50</sub>),少量单斜辉石和角闪石. 基质(90%)为玻晶交织结构,主要由玻璃、斜长石微晶及少量单斜辉石组成.

英安岩(CYX-1, 7, 8),紫色,具有气孔、杏仁状构造.斑晶( $10\%\sim20\%$ )由中长石( $An_{27-41}$ )、普通辉石和普通角闪石组成.基质( $90\%\sim80\%$ )主要由微晶斜长石和玻璃组成,具有交织结构.

安山岩(CYX-11),紫色,具有角砾状结构,气孔、杏仁状构造.安山岩角砾斑晶( $7\%\sim30\%$ )主要由中长石( $An_{30-45}$ )、少量普通辉石和普通角闪石组成,基质( $70\%\sim93\%$ )为火山玻璃和微晶斜长石组成.

# 4 样品采集与分析

#### 4.1 样品采集与分析方法

样品采集于四家子一下碾子剖面. 该剖面上,海房沟组火山岩出露较完整,上下地层接触关系明确. 样品沿公路或附近火山岩露头连续采集,样品均为新鲜的火山熔岩. 所有样品经破碎(<10 mm)用去离子水超声波反复清洗、烘箱哄干(<105 ℃)、研磨成粉样(200 目)后,在中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室分析.

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 荧光分析,微量元素用 PE Elan 6000型 ICP-MS 方法分析. X 荧光分析制样采用熔融法,即准确称取 0.5000 g 的样品和 4.0000 g  $Li_2B_4O_7$  助熔剂于塑料瓶中,震荡使样品与助熔剂混匀,倒入铂金坩埚并加入少量的 LiBr 混合助熔剂,在高频制饼机内 1200 C 温度下熔融成玻璃片状;然后用Rigaku ZSX-100e XRF 仪器测定样品的主量元素含量,样品的分析精度优于  $1\%\sim3\%$ . 烧失量用重量法分析,即称取  $0.3\sim0.5$  g 样品粉末于白金坩埚内,在高温炉 900 C 温度中灼烧 40 min,冷却 2.5 h后计算灼烧前后的样品损失重量,用所得烧失量对XRF 分析的主量元素成分进行校正.

微量元素分析熔样采用碱熔法,即将 XRF 测试 完毕的玻璃片粉碎,准确称取玻璃片粉末 40 mg 装 入 Teflon 密封溶样器中,加入 1 mL HF+0.3 mL HNO₃溶样,超声波振荡后在电热板上 100 ℃保温 1 d, 开盖蒸干样品, 加入 1.6 mL 1:1HNO3 重新溶 样,超声波振荡后在电热板上保温 2~3 h,所得溶液 用 1% HNO3 稀释至样品重量的 500 倍,取此溶液 约4g于塑料离心管中以1:1比例加入Rh-Re混 合内标溶液(含量分别为  $20 \times 10^{-6}$  和  $1 \times 10^{-6}$ ),然 后用 PE Elan 6000 等离子质谱仪(ICP-MS)对溶液 中的微量元素含量进行测定. 由于仪器分析均采用 外标校正的分析方法,样品在制作和分析过程中选 取一些国际和国内岩石标准样品(如 GSR-1、GSR-2、GSR-3、GSR-4、GSR-5、W-2、AGV-1等)作为外 部标准进行计算和监测分析的质量.同时,选取一个 Blank 样品在相同的条件下用于 ICP-MS 测试时扣 除空白值. 微量元素分析准确度优于 5%. 详细的分 析方法与流程见李献华等(2002)所述.

Nd 和 Sr 同位素比值溶样制作,称取约 150 mg 样品于 Teflon 溶样器内,加入 1.8 mL 1:1 HNO₃ +1.8 mL HF 溶解,在 100 ℃电热板保温约 15 d,蒸

表 1 海房沟组火山岩主量元素(%)和微量元素分析结果(10-6)

Table 1 The analyzed data of major elements (%) by XRF, trace elements (10-6) by ICP-MS for the volcanic rocks of Haifanggou Formation

岩体		CYX-2	CYX-3	CYX-5	CYX-7	CYX-8	CYX-9	CYX-10	CYX-11	CYX-13	CYX-16	CYX-18	CYX-22	CYX-23
	英安岩	玄武粗安岩	粗安岩	粗安岩	英安岩	英安岩	粗安岩	粗安岩	安山岩	玄武粗安岩	玄武粗安岩	玄武粗安岩	粗安岩	粗安岩
$\mathrm{SiO}_2$	64, 44	51, 98	58,09	58.94	66.52	65,35	55.92	62.02	59.34	53.05	54, 28	53, 73	58.89	59, 14
${ m TiO}_2$	0.83	1,05	1,06	1, 10	0.62	0.71	1,09	0.70	0.88	1,01	0.97	1.03	0.99	0.99
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	16.54	18.40	17.49	16.69	15.03	15.81	16.87	16.39	15.37	17.54	17.52	18.24	17.03	16.88
${ m TFe_2O_3}$	4.65	9,85	8, 15	7.19	5, 46	5, 55	8, 47	5,41	8.56	8.89	8, 85	8, 33	6.41	7, 15
$M_{nO}$	0.05	0, 10	0.08	0,10	0.05	0.09	0.03	0.05	0.08	0.13	0.16	0.20	0.06	0.06
$_{ m MgO}$	0.71	2, 82	1,25	2, 19	0.73	0.49	3, 33	1.93	2.87	4.18	3, 44	2, 98	2, 15	2, 30
CaO	2,44	5.86	3,98	5.24	3,06	2, 76	4,48	3.92	5.30	7.46	6.51	5,95	4.34	4, 49
$Na_2O$	4.95	4,24	5, 15	4, 15	3,89	4.65	3,85	4.33	3,68	3, 70	3, 93	4.79	4.45	4, 36
$K_2O$	3, 83	1.96	2,85	2,57	3,09	2,96	2,98	3.03	1.89	1.80	2, 10	1.86	3.10	3, 07
$P_2O_5$	0.27	0.32	0.40	0.47	0.24	0.30	0.40	0.27	0.25	0.29	0.33	0.38	0.38	0.37
IOI	1.40	2, 70	1,36	1,52	1,36	1.10	2,53	2.14	2.03	1,44	1, 46	2,09	1.77	1, 19
Total	100.12	99, 28	99,85	100.16	100.04	99.78	96.95	100.20	100.25	99, 49	99, 56	99.58	99. 26	100.01
$ m Mg^{\#}$	0.23	0.36	0.23	0.38	0.21	0.15	0.44	0.41	0.40	0.48	0.44	0.41	0.40	0.39
ACNK	0.99	0.93	0.93	0.87	0.98	1.00	0.95	0.93	0.87	0.81	0.85	0.88	0.92	0.90
$Na_2O+K_2O$	8.78	6.20	8,00	6.72	6.97	7,61	6.83	7.36	5, 56	5, 50	6.04	6,65	7,55	7, 43
${ m K_2O/Na_2O}$	0.77	0.46	0.55	0.62	0.79	0.64	0.77	0.70	0.51	0, 49	0.53	0.39	0.70	0.70
La	48.01	23.25	35, 12	34,75	24.88	28.86	31.02	25.47	19,73	21.12	24.70	26.98	38.83	36.67
Ce	81.09	45.27	66.02	67.77	46.58	53,93	62.08	49.26	39.28	43, 91	50, 39	53, 30	80.61	76.40
Pr	11.49	6.34	8,64	8.98	5,92	7,40	8, 16	6.07	5, 25	5, 76	6.56	6.98	10.13	9,65
PN	44.15	26.78	34,72	36.22	23, 19	29.09	32,74	23, 32	21.75	24.00	26.11	28.76	39, 53	37.80
Sm	7.47	5.03	5.86	6, 10	3,90	4.92	5.38	3.76	4.13	4, 41	4.78	5.08	6.62	6.55
Eu	1.92	1.62	1,74	1.82	1.12	1.38	1.62	1.21	1.26	1.37	1.40	1,51	1.61	1, 56
PS	6.32	4, 59	4, 59	4.80	3,05	3, 72	4.12	3, 11	3,74	3, 78	4, 25	3,96	5.41	5, 11
$^{\mathrm{Tb}}$	0.82	0.61	0.56	0.56	0.37	0.45	0.50	0.36	0.50	0.51	0.57	0.49	0.68	0.62
Dy	4, 42	3, 20	2, 75	2,69	1,78	2, 19	2,46	1.78	2,82	2, 73	2, 97	2, 46	3, 33	3,09
Но	0.86	0.62	0.52	0.48	0.33	0.37	0.48	0.33	0.54	0.54	0.59	0.46	0.62	0.57
Er	2, 28	1.66	1.29	1, 23	0.85	0.98	1.19	0.88	1.54	1,44	1.57	1.22	1.67	1, 53
Tm	0.33	0.23	0.17	0.15	0.12	0.12	0, 16	0.13	0.21	0.19	0.23	0.16	0.22	0.22

0. 23 117. 70 25. 91 114. 34 112. 00 0. 90 0. 90 12. 00 0. 90 12. 00 0. 90 12. 00 0. 48 0. 48 0. 48 10. 33 10. 33 10. 33 10. 33 11. 30 10. 33 10. 33 11. 30 10. 33 10. 33 11. 30 11. 30 12. 55 13. 55 14. 49 10. 33 11. 30 12. 55 13. 55 14. 49 16. 55 17. 55 18. 66 19. 67 19. 67 19. 77 19.

17. 41 24. 88 21. 60 14. 54 0. 44 1. 94 1. 94 1. 94 7. 7 7. 7 7. 2 9. 28 9. 20 1. 29 1. 29 1. 29 1. 20 1. 32 1. 32 1. 32 1. 43 2. 67 3. 20 1. 20 1. 32 3. 20 4. 36 4. 36 5. 49 6. 70 7. 10 7

16. 47 72. 26 23. 83 27. 55 0. 28 1. 47 4. 88 99. 44 899. 44 700 0. 21 4. 22 81 10. 21 11. 62 11. 62 11. 62 11. 63

41. 43 15. 13 14. 46 11. 11 2. 06 10. 00 10. 00 72. 69 82. 41 8. 24 1. 22 1. 22 1. 22 1. 22 1. 22 1. 22 1. 22 1. 3

15. 78 70. 64 26. 54 34. 66 0. 38 1. 78 1. 78 2. 12 2. 81 1. 29 1. 29 2. 20 3. 55 5. 00 2. 81 1. 29 1. 29 1. 29 1. 29 1. 29 1. 29 1. 20 2. 81 1. 20 3. 35 3. 55 3. 55 4. 64 4. 7. 12 4. 7. 12

13. 46 79. 57 24. 65 34. 32 0. 32 1. 29 15. 79 15. 79 9.17 2. 38 13. 0 2. 3 16. 94 0. 88 103. 80

0. 22 21. 75 21. 75 15. 69 12. 76 0. 89 3. 74 10. 04 118. 10 76. 27 220 0. 47 9. 74 5. 39 21. 80 11. 03

 样号
 CYX-1
 CYX-2
 CYX-3
 CYX-5
 CYX-7
 CYX-8

 岩性
 英安岩
 玄武相安岩
 相安岩
 相安岩
 建安岩
 英安岩
 大田名
 1.06
 1.01
 0.77
 0.82

 Lu
 0.37
 0.22
 0.16
 0.15
 0.15
 0.12
 0.13
 0.13
 0.13
 0.13
 0.13
 0.11
 0.14
 0.77
 0.84
 11.14
 0.13
 0.11
 0.14
 0.13
 0.11
 0.11
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14
 0.14

 $\mathbb{E}: Mg^{\sharp} = Mg/(Mg + Fe).$ 

· 农 4     两   两   约   1	表 2	海房沟组火山岩 Nd、Sr	同位素分析结果
-------------------------	-----	---------------	---------

Table 2	The applyzed data	of Nd Sri	otopies by	" MC-ICP-MS	for the volcenie	rocks of Haifanggo	11 Formation
Table 2	i ne anaiyzed data	LOI ING. 51 19	otobies by	V MICTICE-MS	for the voicanio	: rocks of Hallanggo	u Formation

样号	$^{147}{\rm Sm}/^{144}{\rm Nd}$	$^{143}{\rm Nd}/^{144}{\rm Nd}$	2s	$^{87}\mathrm{Rb}/^{86}\mathrm{Sr}$	$87 \mathrm{Sr}/86 \mathrm{Sr}$	2s	$T_{\rm DM}({ m Ga})$	$\varepsilon_{ m Nd}(t)$	$\varepsilon_{\mathrm{Sr}}(t)$
CYX-1	0. 102 3	0.511822	7	0.5793	0. 706 999	14	1.81	<b>—13.79</b>	17.81
CYX-5	0.1018	0.511736	7	0.1603	0.705 693	14	1.92	-15.46	14.24
CYX-8	0.1023	0.511719	6	0. 225 9	0.705 748	16	1.95	-15.80	12.67
CYX-13	0.1110	0.511859	6	0.1244	0.705 820	13	1.91	-13.27	17.32
CYX-18	0.1067	0.511751	6	0.1059	0.705 244	11	1.99	-15.28	9.81
CYX-22	0.1011	0.511730	7	0.3117	0.705 670	16	1.92	-15.56	8.50

干样品. 将蒸干样品加入 3 mL 1:1 HCl,100 ℃保 温 1 d 后重新蒸干,加入纯化 2 mL 2% H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> -2 mol/L HCl 使样品充分溶解,冷却后倒入离心管 离心 25 min,按 2 mL/柱的量在 AG50-8X 离子交换 柱分离 Sr、REE;将所得 REE 样品蒸干,以 1 mL 0.18 mol/L HCl 提取样品,使用 HDEHP 柱分离 Nd. Sr、Nd 样品分别用 MicroMass IsoProbe 型多 收集器等离子质谱仪(MC-ICPMS)测得 Sr、Nd 同 位素比值,Sr 同位素比值用国际标样 NBS987 和实 验室标样 Sr-GIG 监控, 87 Sr/86 Sr 值用86 Sr/88 Sr= 0.119 4标准化(韦刚健等,2002); Nd 同位素比值用 国际标样 JNdi-1 和实验室标样 Nd-GIG 监控, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值用<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0. 721 9 标准化(梁 细荣,2003). 同位素实验流程本底 Sr 为 2×10<sup>-10</sup>~ 5×10<sup>-10</sup> g, Nd 小于 5×10<sup>-11</sup> g. Rb, Sr, Sm 和 Nd 含量通过 ICP-MS 分析测得. 详细的分析方法与流 程见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003)所述.

#### 4.2 样品分析结果

本文分析了 14 件主微量元素样品和 6 件同位素样品,实验分析结果见表 1,2.

在  $SiO_2$  一碱总量图解中(图 2),海房沟组火山岩样品落在碱性与亚碱性分界线附近,大部分样品(CYX-3,5,9,10,22,23)落在粗安岩区,个别样品落在英安岩区(CYX-1,7,8)、安山岩区(CYX-11)和玄武粗安岩区(CYX-2,13,16,18).在 $SiO_2$ - $K_2$ O图解(图 3)主要落入高钾钙碱性系列区; $Na_2$ O/ $K_2$ O为 0.38~0.79,在 $Na_2$ O- $K_2$ O图解(图 4)主要落在系列,表明海房沟火山岩相对富钠富碱.

除玄武粗安岩样品 (CYX-2) SiO<sub>2</sub> 含量 (51.98%) 偏低外,其他火山岩 SiO<sub>2</sub> 含量在 53.05%~66.52%. 所有火山岩都具有较高的  $Al_2O_3$  (15.03%~18.40%)、 $K_2O+Na_2O$  (5.50%~8.78%)和 CaO (2.44%~7.46%)含量,且相对富钠 ( $K_2O/Na_2O=0$ .39~0.79),其中粗安岩、英安岩相对于玄武粗安岩和安山岩略富钾;玄武粗安岩、粗

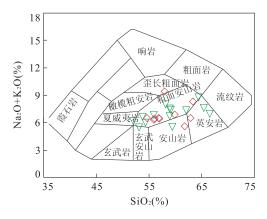


图 2 SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)关系图解(图中三角形符号代表样品数据:菱形符号资料见于武广等(2003))

Fig. 2 Relation of SiO<sub>2</sub> and (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)

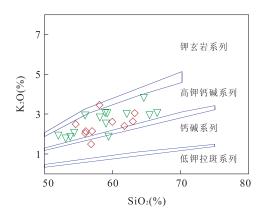


图 3 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 关系图解(图例同图 2) Fig. 3 Relation of SiO<sub>2</sub> and K<sub>2</sub>O

安岩和安山岩具有较高的 MgO(1.  $25\% \sim 4.18\%$ , Mg<sup>#</sup> = 0.  $23 \sim 0.48$ ) 和 TiO<sub>2</sub>(0.  $70\% \sim 1.10\%$ ) 含量,而英安岩则具有较低的 MgO(0.  $49\% \sim 0.73\%$ , Mg<sup>#</sup> = 0.  $15 \sim 0.23$ ) 和 TiO<sub>2</sub>(0.  $62\% \sim 0.83\%$ ) 含量. 所有火山岩的铝饱和指数(ACNK =  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ 分子数之比)  $\leq 1.0(0.81 \sim 1.00)$ ,属于准铝质岩石.

所有火山岩大离子亲石元素,如 U(0. 28× $10^{-6}\sim1.11\times10^{-6}$ )、Th(1. 244× $10^{-6}\sim3.83\times10^{-6}$ 

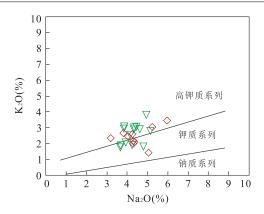


图 4 K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O 关系图解(图例同图 2) Fig. 4 Relation of K<sub>2</sub>O and Na<sub>2</sub>O

 $10^{-6}$ )、Rb (22.81× $10^{-6}$ ~87.33× $10^{-6}$ )都比较低, 较高的  $Sr(436 \times 10^{-6} \sim 917 \times 10^{-6})$ 、 $Ba(682 \times 10^{-6})$ 、 $Sr(436 \times 10^{-6})$ 、 $Sr(436 \times 10^{-6})$ 、 $Sr(436 \times 10^{-6})$ 10<sup>-6</sup>~1309×10<sup>-6</sup>)含量,相对于玄武粗安岩,粗安 岩、安山岩和英安岩具有略高的 U、Th、Rb 含量;相 容元素如 Cr(15.65×10<sup>-6</sup>~81.09×10<sup>-6</sup>)、Ni  $(0.84 \times 10^{-6} \sim 34.66 \times 10^{-6})$ 含量和稀土总量  $(102\times10^{-6}\sim212\times10^{-6})$ 适中,相对粗安岩和英安 岩,玄武粗安岩和安山岩具有较低的稀土总量 (102×10<sup>-6</sup>~132×10<sup>-6</sup>). 所有火山岩的 Cr、Co、Ni 和 V 含量都低于下地壳平均值, U、Th、Rb、Sr、Ba 和轻稀土元素含量高于下地壳平均值;较低的重稀 土元素(Yb≤2.25×10<sup>-6</sup>, Y≤23.14×10<sup>-6</sup>)含量; 除英安岩(CYX-1)外,其他火山岩都具有较高的 Sr/Y 比值 (34.83 ~ 79.97), 较低的 Y/Yb (10.30~14.25)和 Rb/Sr(0.03~0.11)比值,轻重 稀土元素分馏强烈((La/Yb)<sub>N</sub>=10, 37~25, 25,  $(Ho/Yb)_N=1.03\sim1.47)$ ,出现不明显的铕负异常

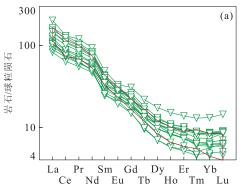
或正异常( $Eu/Eu^* = 0.79 \sim 1.05$ )(图 5a),表现出典型的埃达克岩特征(图 6). 在微量元素蛛网图上(图 5b),Ba,U分别相对于 Rb、Th 富集,明显富集轻稀土元素(LREE),显著的高场强元素(如 Nb、Ta)负异常和 Sr、Pb 正异常,显示出典型的大陆地壳特征.

海房沟组火山岩的 Sr-Nd 同位素分析表明 (表 2),( $^{143}$  Nd/ $^{144}$  Nd),和( $^{87}$  Sr/ $^{86}$  Sr),初始值的变化范围分别为 0. 511 600~0. 511 730 和 0. 704 9~ 0. 705 5,相应的  $\varepsilon_{Ndi}$  和  $\varepsilon_{Sri}$  变化范围分别为 -15.80~-13.27 和 8. 64~17. 81, $T_{DM}$ 为 1. 81~ 1. 99 Ga,具有富集地幔端员组分(EMI)特征,且同位素组成与燕山造山带晚侏罗世髫髻山期/蓝旗期/埃达克质火山岩相似.

### 5 讨论

#### 5.1 火山岩的成因

根据埃达克岩 (Adakite) 的定义 (Defant and Drummond, 1990),埃 达 克 岩 是 由 年 轻 的 ( $\leq$ 25 Ma)、热的俯冲洋壳经部分熔融形成的一套中酸性火山岩或侵入岩. 典型的地球化学特征是: SiO<sub>2</sub> $\geq$ 56%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> $\geq$ 15%,MgO $\leq$ 3. 00% (很少 $\geq$ 6. 00%),亏损重稀土元素 (HREE) (如 Yb $\leq$ 1. 9×10<sup>-6</sup>,Y $\leq$ 18×10<sup>-6</sup>),高 Sr(大多数>400×10<sup>-6</sup>),La/Yb( $\geq$ 10. 0)与 Sr/Y( $\geq$ 20. 0 $\sim$ 40. 0),一般具有正铕异常 (少数具有极弱负铕异常);发育于岛弧环境;主要矿物组合是斜长石和角闪石,可以出现黑云母、辉石和不透明矿物. 对比这些特征,海房沟组火



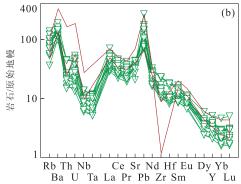


图 5 海房沟组火山岩稀土元素配分曲线模式(a)与微量元素蛛网图(b)(标准化值引自 Sun and McDonough (1989);棕色曲线资料来源于武广等(2003))

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primary mantle-normalized incompatible element patterns (b) for the volcanic rocks of Haifanggou Formation. Normalization values for primitive mantle are from Sun and McDonough (1989)

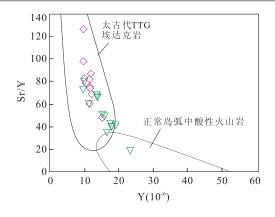


图 6 Sr/Y-Y 关系图解(图例同图 2)

Fig. 6 Relation of Sr/Y and Y after Defant and Drummond (1990)

山岩具有埃达克岩特征,属于 C 型埃达克质岩(张旗等,2001).

尽管海房沟组火山岩具有埃达克岩特征,但海 房沟组火山岩形成与典型的埃达克岩不同.

- (1)海房沟组埃达克质火山岩形成于非岛弧一俯冲环境. 辽西处在华北克拉通内部,构造上属于陆内造山带,远离中生代岛弧一俯冲带,故海房沟组埃达克质火山岩并非岛弧一俯冲环境的产物.
- (2)中侏罗世,燕山造山带可能受到古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用的影响(吴福元等,2003;赵越等,2004),燕山造山带的构造格局由 EW 向转向NE向,其内部发生了大规模的逆冲推覆构造和地壳加厚过程(Davis,2003)、强烈的地壳快速隆起、剥蚀和盆地堆积(赵越等,2002;胡建民等,2005;徐刚等,2006).而这种挤压构造背景下可使下地壳保持高的热状态,有利于下地壳岩石的部分熔融.高温高压实验表明,在水不饱和以及增厚的下地壳(>40 km,800~1 000 ℃,0.8~1.2 Gpa)环境中,斜长石将变得极不稳定,底侵的玄武质下地壳发生部分熔融形成埃达克质熔体(Rapp et al.,1991;Rushmer,1993; Wyllie and Wolf,1993; Peacock et al.,1994; Wolde and Team,1996).
- (3)埃达克岩成因复杂. 近年来研究表明,埃达克岩的形成由以下几种途径:①俯冲洋壳/或残留的洋壳残片熔融(Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski et al., 2001; 李伍平,2006);②增厚下地壳玄武质岩石部分熔融(张旗等,2001; Kay and Kay, 2002;李伍平等,2007);③玄武质岩浆的结晶分异作用和地壳混染作用(Castillo et al., 1999);④拆沉作用引起的下地壳榴辉岩玄武质岩石的部分熔融(Defant et al., 2002; Gao et al., 2004; 袁洪林

等,2005). 尽管海房沟组埃达克质火山岩具有火山弧火山岩的某些特征(如较低的 Nb、Y、Y+Nb 和Rb等),但较低的重稀土元素和较高的 Sr/Y 比值、不明显的铕负异常;Nd、Sr 同位素具有富集地幔源区的特点,而非洋壳( $^{143}$  Nd/ $^{144}$  Nd = 0. 512 5 ~ 0.513 0, $^{86}$  Sr/ $^{87}$  Sr=0. 702~0. 704,Hoffman,1997)组成等,说明海房沟组埃达克质火山岩不是俯冲洋壳或洋壳残片熔融的产物;结合 SiO<sub>2</sub>、Mg、Cr、Ni 等主微量元素组成,说明海房沟组火山岩不可能起源富集地幔而是古老的大陆地壳物质.

- (4)从岩石成分变化来看,SiO<sub>2</sub>含量变化于51.98%~66.52%,随着SiO<sub>2</sub>含量增加,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Sr、Cr、Ni等含量降低,而K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、U、Th、Rb、Ba和Pb等含量相应增加,似乎具有岩浆结晶分异的特点(图7).但由于该地区海房沟组剖面缺乏玄武岩(武广等,2003,2004),岩石组合简单,且不明显斜长石结晶分异,以及La和La/Sm正相关关系,表明海房沟组火山岩可能并非玄武质岩浆结晶分异的产物.另外,SiO<sub>2</sub>的变化并未引起<sup>143</sup> Nd/<sup>144</sup> Nd 初始值和<sup>86</sup> Sr/<sup>87</sup> Sr初始值的明显变化,表明岩浆保持了原始同位素特征并未受到同化混染的明显影响(图7),为此,本文认为海房沟组埃达克质火山岩并非玄武质岩浆的结晶分异作用和地壳混染作用的产物.
- (5)高 Sr 低 Yb、Y 特征说明岩浆源区岩石含石 榴石,应为榴辉岩或榴闪岩(Rapp and Watson, 1995; Foley et al., 2002); 高的 Nb/Ta 比值(变化 范围为 16~23,平均为 20),意味着源区应为榴辉岩 而非榴闪岩(Foley et al., 2002),说明岩浆起源于 较厚的大陆下地壳(>50 km)(Xiong et al., 2005);较低的 Cr、Ni 和 MgO 含量,以其岩石中并 未发现橄榄石斑晶,表明岩浆未与地幔橄榄岩发生 过明显的相互作用. 然而,能够诱发较厚下地壳榴辉 岩的部分熔融,主要有2种方式:一是拆沉作用,二 是底侵作用. 拆沉作用认为当陆壳厚度大于 50 km 时,玄武质下地壳在高压一超高压下向"榴辉岩"相 转变(Kay and Kay, 1993),因榴辉岩的密度比地幔 橄榄岩大(Rudnick and Fountain, 1995),导致下地 壳下部和下伏岩石圈地幔—同拆沉至软流圈中, 榴 辉岩随后发生部分熔融,熔体上升过程中与地幔橄 榄岩发生相互作用,然后喷发至地表形成埃达克质 火山岩(Gao et al., 2004; 袁洪林等, 2005). 由于壳 幔相互作用,由这种机制形成的埃达克质岩一般具 有较高的 Cr、Ni 和 MgO 含量,这点与海房沟组埃

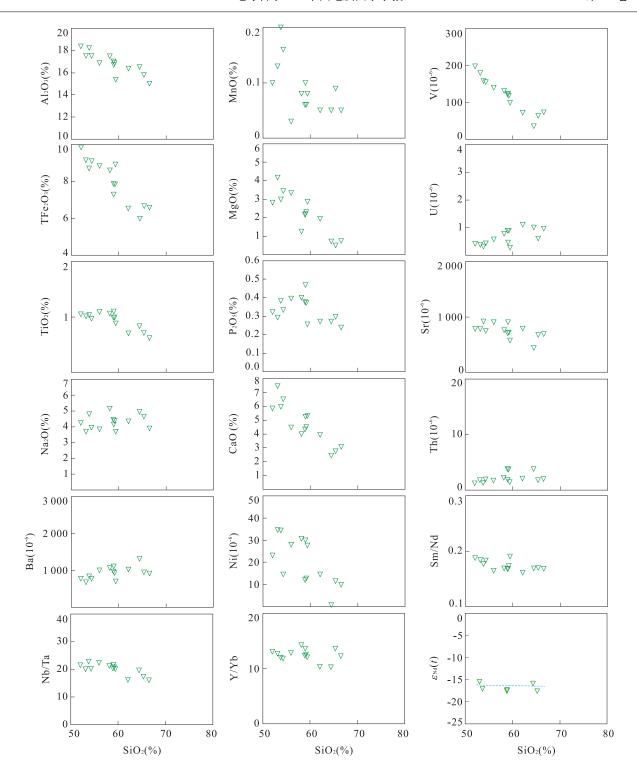


图 7 SiO<sub>2</sub> 与主要氧化物、微量元素相关图

Fig. 7 SiO<sub>2</sub> vs. main oxide and rare elements diagrams

达克质火山岩特征不符. 底侵作用是埃达克质岩形成的主要途径之一(Defant et al., 2002; Kay and Kay, 2002; Robert and Xiao, 2002; Zhao et al., 2008),由于幔源玄武质岩浆底侵于下地壳提供巨大的热能促使下地壳岩石部分熔融形成埃达克质岩浆(Atherton and Petford, 1993). 底侵的玄武质岩浆

一般不参与到熔融过程或者参与的程度非常低,由此形成的埃达克质岩具有较低的 Cr、Ni 和 MgO 含量,但也不排除底侵的玄武质岩浆与下地壳岩浆发生壳幔相互作用的可能性,有可能造成下地壳熔融的岩浆 SiO<sub>2</sub> 含量偏低(如 CYX-2),这点与海房沟组埃达克质火山岩特征相符. 近年来研究表明,燕山

造山带中生代不同时期都发育着埃达克质火山岩,如早侏罗世兴隆沟组(Gao et al., 2004; 李伍平, 2006)、中侏罗世海房沟组(武广等, 2003, 2004)、晚侏罗世髫髻山组/蓝旗组(李伍平等, 2001a, 2001b, 2004, 2007, 2012; Yang and Li, 2008)、早白垩世东岭台组/义县组(李伍平等, 2000, 2002; 李晓勇等, 2004b; 王晓蕊等, 2005; 袁洪林等, 2005; 汪方跃等, 2007; 肖高强等, 2008; Yang and Li, 2008)和晚白垩世大兴庄组(李伍平, 2011),均有埃达克质火山岩的报道,显然用拆沉作用模式是无法解释所有埃达克质火山岩的成因,本文认为海房沟组火山岩的形成可能与底侵作用有关.

#### 5.2 地质意义

燕山造山带中生代不同时期火山岩或埃达克质火山岩研究表明,早侏罗世北京南大岭组玄武岩源区和辽西兴隆沟组高镁英安岩的源区受到古亚洲洋俯冲或古亚洲洋洋壳的制约(李晓勇等,2004a;赵越等,2004;李伍平,2006),中侏罗世以后的中生代火山岩和侵入岩的源区均来源于富集的地幔端元组分EMI(李伍平等,2000,2001a,2001b,2002,2004,2007,2011,2012;刘红涛等,2002;王晓蕊等,2005;汪方跃等,2007;肖高强等,2008; Yang et al.,2008; Yang and Li,2008),即岩浆源区受华北克拉通下地壳岩石或富集的岩石圈地幔制约.显然,早、中侏罗世是燕山造山带一个重要的转变时期.

根据区域地质、典型盆地沉积记录、岩浆活动等 研究,辽西中生代出现的两个区域性角度不整合正 好位于早侏罗世与中侏罗世(即辽西地区北票组与 海房沟组)、晚侏罗世与早白垩世(土城子组与义县 组)之间,分别对应于燕山运动 A 幕(主幕)和燕山 运动 B幕(赵越等,2004;刘健等,2006). 区域构造 研究表明,中一晚三叠世华北克拉通受南部扬子克 拉通强烈碰撞作用与早中生代受鄂霍次克海自西向 东的逐渐封闭和西伯利亚地块与华北一蒙古地块的 碰撞的影响(董树文等, 2000; Xiao et al., 2003; Ernst et al., 2007; Zhang et al., 2009), 燕山板内 造山带内部、中蒙边境和内蒙古等地形成了近东西 向的褶皱变形和大型推覆构造(郑亚东等,2000;赵 越等, 2002, 2004; 徐刚等, 2003; 胡建民等, 2004, 2005;郑亚东和王涛,2005),反映了南北向的挤压和 显著的地壳缩短与增厚过程. 晚三叠世到早侏罗世 则地壳处于拉伸阶段,如水泉沟组和邓杖子组沉积 和南大岭组玄武岩喷发(胡建民等,2004; Wang et al., 2007). 区域上火山一沉积盆地走向和控盆构

造线呈东西向展布,岩浆源区受俯冲的古亚洲洋或洋壳残片控制,属于古亚洲洋构造体系的产物.

中侏罗世,燕山造山带受到古太平洋板块开始 沿北西向朝东亚大陆俯冲的远程效应的影响(Maruyama, 1997; Kojima et al., 2002), 使其内部很 快转为北东向的挤压推覆和褶皱隆起(胡健民等, 2005),随后爆发了中一晚侏罗世大规模埃达克质 火山喷发.此时,区域上火山一沉积盆地和控盆构造 线均转向为北东向,目中侏罗世火山沉积地层异度 不整合或平行不整合覆盖于早侏罗世地层,这一时 期形成的角度不整合在燕山造山带称为燕山运动 (A幕, Wong, 1927). 中侏罗世后,燕山造山带中 生代岩浆均起源于华北克拉通古老下地壳或富集的 岩石圈地幔.显然,早、中侏罗世期间东亚构造体制 发生了重要转变,即由古亚洲洋构造体系向古太平 洋构造体系的转变. 因此,中侏罗世海房沟组埃达克 质火山岩的形成(174 Ma)标志着燕山造山带进入 了古太平洋构造体系的演化阶段.

### 6 结论

(1)中侏罗世海房沟组火山岩为埃达克质火山岩,其岩浆起源于增厚下地壳榴辉岩的部分熔融,而下地壳岩石的部分熔融与玄武质岩浆的底侵作用密切相关.

(2)早、中侏罗世是造山造山带重要的构造体系转化阶段.中侏罗世海房沟组埃达克质火山岩的形成(174 Ma)代表了燕山造山带从此进入了古太平洋构造体系演化的新的发展阶段.

#### References

Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust.

Nature, 362(11):144—146. doi:10.1038/362144a0

Bureau of Geology and Minernal Resources of Liaoning, 1969. 1: 200 000 K-51-XXV (Jinxi Sheet) and K-51-XXXI (Xingcheng Sheet) Regional Geological Maps and Its Books of People's Republic of China, 1—30 (in Chinese with English abstract).

Bureau of Geology and Minernal Resources of Liaoning, 1989. Regional Geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-856 (in Chinese with English abstract).

Castro, A., Patino Douce, A. E., Correge, L. G., et al., 1999. Origin of Peraluminous Granites and Granodior-

- ites, Iberian Massif, Spain; An Experimental Test of Granite Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135 (2 3): 255 276. doi: 10. 1007/s004100050511
- Darby, B. J., Davis, G. A., Zhang, X. H., et al., 2004. The Newly Discovered Waziyu Metamorphic Core Complex, YiwulüShan, Western Liaoning Province, Northwest China. Earth Science Frontiers, 11(3):145-155.
- Davis, G. A., 2003. The Yanshan Belt of North China; Tectonics, Adakitic Magmatism, and Crustal Evolution. *Earth Science Frontiers*, 10(4):373-384.
- Davis, G. A., Qian, X. L., Zheng, Y. D., et al., 1996. Mesozic Deformation and Plutonism in the Yunmengshan: A Metamorphic Core Complex North of Beijing, China. In: An Yin, Harrison, T. M., eds, The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cmbridge, 253—280.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Deriveation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(18): 662—665. doi:10.1038/ 347662a0
- Defant, M. J., Xu, J. F., Kepezhinskas, P., et al., 2002. Adakites: Some Variations on a Theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129—142.
- Dong, S. W., Wu, X. H., Wu, Z. H., et al., 2000. On Tectonic Seesawing of the East Asia Continent—Global Implication of the Yanshanian Movement. *Geological Review*, 46(1):8—13 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Chen, X. H., et al., 2008. The Formation and Deformational Characteristics of East Asia Multi-Direction Convergent Tectonic System in Late Jurassic. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(3):306—317 (in Chinese with English abstract).
- Ernst, W. G., Tsujimori, T., Zhang, R., et al., 2007. Permo-Triassic Collision, Subduction-Zone Metamorphism, and Tectonic Exhumation along the East Asian Continental Margin. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 73 110. doi: 10. 1146/annurev. earth. 35. 031306. 140146
- Foley, S. F., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of Early Continental Crust in Subduction Zones Controlled by Melting of Amphibolite. *Nature*, 417 (6891): 837 — 840. doi:10.1038/nature00799
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. Nature, 432 (7019): 892 897. doi: 10. 1038/nature03162
- Ge, X. H., 1989. The History of Formation of Intraplate

- Orogenic Belts in the North China Paleoplate, *Geological Review*, 35(3):255—261 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman, A. W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. Nature, 385: 219 — 228. doi: 10.1038/385219a0
- Hu, J. M., Liu, X. W., Xu, G., et al., 2005. The Slidding-Slump-Mud Flow Sedimentation during the Late-Triassic to Middle Jurassic in Western Liaoning Province, China. Acta Geologica Sinica, 79(4):453-464 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. M., Liu, X. W., Zhao, Y., et al., 2004. On Yanshan Intraplate Orogene: An Example from Taiyanggou Area, Lingyuan, Western Liaoning Province, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 256 271 (in Chinese with English abstract).
- Kay, R. W., Kay, S. M., 2002. Andean Adakites: Three Ways to Make Them. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (3): 303-311.
- Kojima, S., Kemkin, I. V., Kametka, M., et al., 2002. A Correlation of Accretionary Complexs of Southern Sikhote-Alin of Russia and Inner Zone of Southwest Japan. Geosciences Journal, 4 (3): 175 — 185. doi: 10. 1007/ BF02910136
- Li, W. P., 2006. Geochemical Characteristics of the Early Jurassic Dacites of the Xinglonggou Formation in Beipiao Area, West Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1608—1616 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., 2011. Geochemistry Characteristics of the Late Cretaceous Adakitic Rhyolites of Daxingzhuang Formation and Its Genesis in Yixian Area, Western Liaoning Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(3):429—439 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., 2012. Magma Evolution of the Late Jurassic Volcanic Rocks and Its Genesis of the Lanqi Formation, Beipiao Area, Western Liaoning Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (1):47—56 (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 Petarologica 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 Y Type Volcanic Rocks in Fuxin Area of West Liaoning,

- Northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (4): 523-532 (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., Li, X. H., 2001b. Genesis for Jurassic Trachyandesite in Western Hills of Beijing of Eastern China and Its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 247 254 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Lu, F. X., Sun, S. P., et al., 2000. Disscution on the Origin of Volcanic Rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and Its Geological Setting. *Acta Petrologica Sinca*, 16(3): 345 — 352 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Zhao, Y., Li, X. H., et al., 2007. The Genesis of the Middle-Later 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 ICP-MS: A Compatative Study of Sample Diagestion Techniques of Alkali Fusion and Acid Dissolution. *Geochimica*, 31(3):289—294 (in Chinese with English abstract)
- Li, X. Y., Fan, W. M., Guo, F., et al., 2004a. Modification of the Lithospheric Mantle beneath the Northern North China Block by the Paleo-Asian Ocean; Geochemical Evidence from Mafic Volcanic Rocks of the Nadaling Formation in the Xishan Area, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):557—566 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Y., Guo, F., Fan, W. M., et al., 2004b. Early Retaceous 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 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd and Sm/Nd Ratios Using Multiple-Collectors Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1):91—96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. T., Sun, S. H., Liu, J. M., et al., 2002. The Mesozoic High-Sr Granitoids in the Northern Marginal Region of

- North China Craton: Geochemistry and Source Region. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 257 274 (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): 2617—2646 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., 1997. Pacific-Type Orogeny Revisited: Mi-yashiro-Type Orogeny Proposed. *Island Arc*, 6 (1): 91-120. doi:10.1111/j.1440-1738.1997.tb00042.x
- Peacock, S. M., Rushmer, T., Thompson, A. B., 1994. Partial Melting of Subducting Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121:227—244. doi:10.1016/0012—821X(94)90042—6
- Rapp, R. B., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar; Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36 (4): 891—931. doi: 10. 1093/petrology/36.4.891
- Rapp, R. P., Waston, E. B., Miller, C. F., 1991. Partial Melting of Amphibolite/Eclogite and the Origin of Archaean Trondhjemites and Tonalite. *Precambrian Research*, 51 (1-4):1-25, doi:10.1016/0301-9268(91)90092-O
- Robert, P. R., Xiao, L., 2002. Experimental Constraints on the Origin of Potassium-Rich Adakites in Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293-302. doi: 10. 3321/j. issn:1000-0569. 2002. 03. 003
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and Composition of the Continental Crust; A Lower Crustal Perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267—309. doi: 10. 1029/95RG01302
- Rushmer, T., 1993. Experimental High-Pressure Graulites: Some Application to Natural Mafic Xenolith Suites and Archean Granulite Terranes. *Geology*, 21 (5): 411 414. doi: 10. 1130/0091 7613 (1993) 021 < 0411: EH-PGSA>2. 3. CO; 2
- 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).
- Wang, F. Y., Gao, S., Niu, B. G., et al., 2007. Geochemistry of Dabeigou Basalt in Chengde Basin, Hebei Province and Constrains on Lithospheric Mantle Thinning of North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 14 (2): 98—108 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2006. Geochemistry of High-Mg Andesites from the Early Cretaceous Yixian Formation, Western Liaoning: Implications for Low-

- er Crustal Delamination and Sr/Y Variations, *Science in China* (*Series D*), 35(8): 700 709 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Zhao, Y., Zou, H. B., et al., 2007. Petrogenesis of the Early Jurassic Nandaling Flood Basalts in the Yanshan Belt, North China Craton; A Correlation between Magmatic Underplating and Lithospheric Thinning. Lithos, 96: 543 — 566. doi: 10. 1016/j. lithos. 2006, 12, 004
- Wei, G. J., Liang, X. R., Li, X. H., et al., 2002. Precise Measurement of Sr Isotopic Composition of Liquid and Solid Base Using MC-ICPMS, Geochimica, 31(3):295— 299 (in Chinese with English abstract).
- Wolde, B., Team, G-G. G., 1996. Tonalitie-Trondhjemite-Granite Genesis by Partial Melting of Newly Underplated Basaltic Crust: An Example of the Neoproterozoic Birbir Magmatic Arc, Western Ethiopia. *Precambrian Research*, 76(1-2):3-14.
- Wong, W. H., 1927. Crustal Movement and Igneous Activities in Eastern China since Mesozoic Time. *Acta Geologica Sinia*, 6(1):9-36. doi:10.1111/j.1755-6724. 1927. mp6001002. x
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the Lithospheric Thinning in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3):51—60 (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).
- Wu, G., Li, Z. T., Wang, W. W., 2004. Geochemical Characteristics of the Middle Jurassic Volcanic Rocks from Haifanggou Formation in Western Liaoning Area and Geological Significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(2):97-108 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie, P., Wolf, M. B., 1993. Amphibolite Dehydration-Melting: Sorting out the Solidus. In: Prichard, H. M., et al., eds., Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geological Society Special Publication No76, the Geological Society Publishing House, London, 405—416.
- Xiao, G. Q., Gao, S., Hunag, H., et al., 2008. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks from Dasijiazi Area at Zhangwu, West Liaoning Province. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 33(2):151—164 (in Chinese with English abstract).

- Xiao, W. J., Zhang, L. C., Qin, K. Z., et al., 2003. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia, *American Journal of Sciences*, 304(4):370—395. doi:10.2475/ajs.304.4.370
- 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
- Xu, G., Zhao, Y., Gao, R., et al., 2006. Mesozoic Basin Deformation of Yanshan Folded Fault Belt-Records of the Intraplate Deformation Process: A Case Study of Xiabancheng, Chengde-Shangbancheng and Beitai Basins. *Acta Geosicientia Sinica*, 27(1):1—12 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G., Zhao, Y., Hu, J. M., et al., 2003. Late Triassic Thrusting in the Niuyingzi Region, Western Liaoning, China. Acta Geologica Sinica, 77(1): 25-34 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G., Zhao, Y., Wu, H., et al., 2005. Late Triassic-Middle Jurassic Stratigraphic Succession in the Niuyingzi Basin, Lingyuan County, Western Liaoning and the Correlation of Regional Stratigraphic Sequences in the Yanliao Region. *Acta Geoscientica Sinca*, 26(4):299—308 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. Q., Wu, H., Liu, X. W., et al., 2005. Mineralogy, Geochemical and Sr and Nd Isotopic Characteristics of the Jiashan Syenite in Northern Hebei. *Geoscience*, 19 (4):522-530 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G., Chai, Y. C., Wu, Z. W., 2001. Thin-Skinned Thrust Nappe Structures in Western Liaoning in the Eastern Sector of the Yanshan Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 322—332 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S., 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
- Yogodzinski, G. M., Lees, J. M., Churikova, T. G., et al., 2001. Geochemical Evidence for the Melting of Subduc-

- ting Oceanic Lithosphere at Plate Edges. *Nature*, 409: 500-504. doi:10.1038/35054039
- 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 (Series D), 35(9): 821—836 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Fan, Q. C., Zhang, H. F., et al., 2005. Lower Crust Processes during the Lithosphere Thinning in Eastern China; Magma Underplating, Replacement and Delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1509—1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. H., Wang, G. H., Wang, G. S., et al., 2002. Thrust Tectonics in the Eastern Segment of the Intraplate Yanshan Orogenic Belt, Western Liaoning Province, North China. *Acta Geologica Sinica*, 76(1):64—76 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001. The Characteristics and Tectonic-Metallogening Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic Intrusive Suites from the Northern Margin of the North China Craton: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1-2):181-200. doi:10.1130/B26157.1
- Zhang, Z. Y., 1982. The Mesozoic Faulting, Magmatism, and Geo-Dynamics in Western Yanshan Area. *Journal of Hebei Geological College*, 5(1-2):64-75 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Cui, S. Q., Guo, T., et al., 2002. Evolution of a Jurassic Basin of the Western Hills, Beijing, North China and Its Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 21(4-5): 211-217 (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).
- Zhao, Y., Yang, Z. Y., Ma, X. H., 1994. Geotectonic Transition from Paleoasian System and Paleotethyan System to Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia. *Scientia Geological Sinica*, 29(2): 105—119 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Xiong, X. L., Wang, Q., et al., 2008. Underplating-Related Adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102 (1-2): 374-391. doi: 10. 1016/j. lithos.

- 2007.06.008
- Zheng, Y. D., Davis, G. A., Wang, Z., et al., 2000. Major Mesozoic Tectonic Events in the Yanshan Belt and the Plate Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 289—302 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. D., Wang, T., 2005. Kinematics and Dynamics of the Mesozoic Orogeny and Late-Orogenic Extensional Collapse in the Sino-Mongolian Border Areas. *Science in China* (*Series D*), 35(4):291 303 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 董树文,吴锡浩,吴珍汉,等,2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义. 地质论评,46(1):8-13.
- 董树文,张岳桥,陈宣华,等,2008.晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征.地球学报,29(3):306-317
- 葛肖虹,1989. 华北板内造山带的形成史. 地质论评,35(3): 255-261.
- 胡健民,刘晓文,徐刚,等,2005. 辽西晚三叠世末一中侏罗世崩塌一滑坡一泥石流沉积及其构造意义. 地质学报,79 (4): 453-464.
- 胡健民,刘晓文,赵越,等,2004. 燕山板内造山带早期构造变 形演化——以辽西凌源太阳沟地区为例. 地学前缘,11 (3): 256-271.
- 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,2011. 辽西义县晚白垩世大兴庄组流纹岩的地球化学特征及其成因. 地球科学——中国地质大学学报,36(3): 429-439.
- 李伍平,2012. 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. 地球科学——中国地质大学学报,37 (1): 47-56.
- 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,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,李献华,2001b. 北京西山髫髻山组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,路凤香,孙善平,等,2000. 北京西山东岭台组( $J_3d$ ) 火山岩起源及其构造背景探讨. 岩石学报,20(3): 345-352.
- 李伍平,赵越,李献华,等,2007. 燕山造山带中一晚侏罗世髫 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. 硅酸盐岩石样品化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 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,范蔚茗,郭锋,等,2004a. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用:来自于西山南大岭组中基性火山岩的地球化学证据. 岩石学报,30(3): 557-566.
- 李晓勇,郭锋,范蔚茗,等,2004b.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<sup>143</sup> Nd/<sup>144</sup> Nd 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91-96.
- 辽宁省地质局,1969. 中华人民共和国地质图及其说明书,1:200 000 K-51-XXV(锦西)-K-51-XXXI(兴城)幅,1-30.
- 辽宁省地质矿产局,1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社,1-856.
- 刘红涛,孙世华,刘建明,等,2002. 华北克拉通北缘中生代高 锶花岗岩类地球化学与源区性质. 岩石学报,18(3): 257-274.
- 刘健,赵越,柳小明,2006. 冀北承德盆地髫髻山组火山岩的时代. 岩石学报,22(11): 2617-2646.
- 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.
- 汪方跃,高山,牛宝贵,等,2007. 河北承德盆地 114 Ma 大北 沟组玄武岩地球化学及其对华北克拉通岩石圈地幔减 薄作用的制约. 地学前缘,14(2): 98-108.
- 王晓蕊,高山,柳小明,等,2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学:对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学(D辑),35(8): 700-709.
- 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.
- 吴福元,葛文春,孙德有,等,2003.中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘,10(3):51-60.
- 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.
- 武广,李之彤,王文武,2004. 辽西地区中侏罗世海房沟组火山岩地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志,23 (2): 97-108.

- 肖高强,高山,黄华,等,2008. 辽西彰武大四家子地区中生代 火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征. 地球科 学——中国地质大学学报,33(2): 151-164.
- 徐刚,赵越,高锐,等,2006. 燕山褶断带中生代盆地变形一板内变形过程的记录——以下板城、承德一上板城、北台盆地为例. 地球学报,27(1): 1-12.
- 徐刚,赵越,胡健民,等,2003. 辽西牛营子地区晚三叠世逆冲构造. 地质学报,77(1): 25-35.
- 徐刚,赵越,吴海,等,2005.辽西凌源牛营子盆地晚三叠世一中侏罗世地层层序及区域对比.地球学报,26(4):299-308.
- 杨富全,吴海,刘晓文,等,2005. 冀北甲山正长岩的矿物学、 地球化学及 Sr-Nd 同位素特征. 现代地质,19(4): 522-530.
- 杨庚,柴育成,吴正文,2001. 燕山造山带东段—辽西地区薄皮逆冲推覆构造. 地质学报,75(3): 322-332.
- 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.
- 翟明国,樊祺诚,张宏福,等,2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程:岩浆底侵、置换与拆沉作用. 岩石学报,21 (6): 1509-1526.
- 张长厚,王根厚,王果胜,等,2002. 辽西地区燕山板内造山带 东段中生代逆冲推覆构造. 地质学报,76(1): 64-76.
- 张旗,王焰,钱青,等,2001.中国东部燕山期埃达克岩的特征 及其构造一成矿意义.岩石学报,17(2):236-244.
- 张之一,1982. 燕山西部地区中生代的断裂变动、岩浆活动及 其动力学问题,河北地质学院学报,5(1-2):64-75.
- 赵越,崔盛芹,郭涛,等,2002.北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义.地质通报,21(4-5):211-217.
- 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.
- 赵越,杨振宇,马醒华,1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学,29(2): 105-119.
- 郑亚东, Davis, G. A., 王琮, 等, 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. 地质学报, 74(4): 289-302.
- 郑亚东,王涛,2005. 中蒙边界区中生代推覆构造与伸展垮塌作用的运动学和动力学分析. 中国科学(D辑),35(4): 291-303.