

辽西义县组火山岩：拆沉作用还是岩浆混合作用的产物？^{*}

张宏福¹ 邵济安²

ZHANG HongFu¹ and SHAO JiAn²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2007-08-21 收稿, 2007-12-05 改回.

Zhang HF and Shao JA. 2008. Volcanic lavas of the Yixian Formation in western Liaoning province, China: Products of lower crust delamination or magma mixing? *Acta Petrologica Sinica*, 24(1):37–48

Abstract The authors, based on the systematics of all the published major, trace elemental and isotopic data of volcanic lavas from the Yixian Formation, western Liaoning Province, found that the volcanic lavas of the Yixian Formation are composed dominantly of mafic-intermediate components with the increasing intermediate-acidic components in the upper sequence. Their high $Mg^{\#}$ values and adakitic geochemical characteristics are not the primary features of the initial magma, and thus cannot be regarded as the powerful evidence for the existence of lower crust delamination in the region. The mafic components of the Yixian Formation were originally derived from the lithospheric mantle, which were previously modified by the subducted oceanic crust. The mixing of mafic magma with ancient lower crust-derived magma to a certain degree produced the various volcanic lavas of the Yixian Formation. Therefore, volcanic lavas of the Yixian Formation are the products of magma mixing rather than lower crust delamination. Basaltic underplated lower crust was involved in the origin of these volcanic lavas, with little and limited contribution of the asthenosphere.

Key words Western Liaoning Province, Yixian Formation, Volcanic lava, Magma mixing, Lithosphere extension

摘要 通过对所有已发表的辽西义县组火山岩数据进行系统的主、微量元素和同位素分析,发现义县组火山岩以中性为主,其上部层位中酸性组分增多。其高的 $Mg^{\#}$ 值和埃达克质特征并不是原始岩浆本身的性质,不能作为下地壳拆沉作用的有力证据。义县组火山岩的基性部分主要来自于受洋壳俯冲作用改造过的岩石圈地幔,并存在与古老下地壳来源的熔体不同程度的混合作用。因此,义县组火山岩是岩浆混合作用的产物而非下地壳拆沉作用的产物。底侵的下地壳也参与了义县组火山岩的形成,但软流圈组分的参与有限。

关键词 辽西; 义县组; 火山岩; 岩浆混合作用; 岩石圈伸展

中图法分类号 P588.14

众所周知,我国华北东部古老克拉通显生宙,尤其是中、新生代以来曾遭受过强烈的破坏作用,这不仅导致了岩石圈的大规模减薄,而且诱发了典型的古老克拉通型岩石圈地幔转变成现今的较“年轻”的“大洋型”岩石圈地幔(Fan *et al.*, 2000; Menzies *et al.*, 2007),从而完成了去克拉通化过程。这一去克拉通化过程进一步导致了中、新生代广泛而持续的岩浆作用和地震活动(Zhang *et al.*, 2004; Huang *et al.*,

2007; 李铁明等,2007)。显然,华北中、新生代火山活动是克拉通破坏过程的直接产物。因此,这些火山岩是探讨华北东部克拉通破坏过程、岩石圈减薄机理以及岩石圈地幔组成转变方式的理想对象之一。

辽西中生代火山作用是我国华北中生代火山活动最剧烈的地区,共有四次重要的火山活动时期,其活动产物主要分布在兴隆沟组、蓝旗组、义县组、张老公臣组地层中(辽宁

* 国家自然科学基金委大陆动力学群体项目(40721062)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-103)和百人计划资助成果。

第一作者简介:张宏福,男,1962年生,研究员,地幔岩石学和地球化学专业, E-mail: hfzhang@mail.igcas.ac.cn

省地质矿产局, 1989)。其中, 义县组火山活动(约 125 Ma; Zhu *et al.*, 2007)间歇期形成的主要由火山凝灰物质构成的湖泊相地层中发现大量热河生物群化石(周中和, 2004), 从而引起了国内外地学界的广泛关注。这一地区已经成为世界上研究鸟类的起源, 恐龙的进化, 鸟类、哺乳动物以及被子植物的早期演化和辐射最重要的地区(周中和, 2004)。而热河生物群的繁盛与绝灭无不与义县组的大量火山活动存在千丝万缕的联系。尽管热河生物群的繁盛与当时该地区特有的温暖淡水和陆地环境密切相关, 但频繁的火山活动及其去气作用造成了大量生物的快速死亡, 这又是化石能以完整保存的重要原因。因此, 义县组火山活动及其去气作用的研究不仅对传统地质学如岩石圈演化过程, 而且对环境的变迁、生物的演化和兴衰都具有重要意义。

然而, 遗憾的是尽管义县组火山岩自 1994 年以来已经做了很多工作, 也发表了大量的数据(张招崇等, 1994; 史卜庆等, 1998; 陈树旺等, 2001; 李伍平等, 2001, 2002; 彭艳东等, 2003, 2004; 张宏等, 2004, 2005; 邢德和等, 2005; 张宏和张旗, 2005; Wang *et al.*, 2006; 邵济安等, 2006a, 2007; Yang and Li, 2007), 但对其岩石成因如岩浆来源及其演化过程等问题仍然存在激烈争论。争论的焦点主要是这套义县组火山岩是下地壳拆沉作用的产物还是岩浆混合作用的产物。以 Wang *et al.* (2006) 为代表的研究者认为义县组火山岩是拆沉的下地壳榴辉岩部分熔融形成的熔体与地幔橄榄岩相互作用的结果, 即下地壳拆沉作用观点(史卜庆等, 1998; Wang *et al.*, 2006)。其依据主要是该套火山岩具有高的 $Mg^{\#}$ 值, 并具有埃达克质岩的地球化学特征。但以邵济安等(2006a)为代表的则认为该套火山岩是幔源岩浆和壳源岩浆混合作用的结果, 其高的 $Mg^{\#}$ 值可能是幔源岩浆含有地幔橄榄石捕虏晶造成的。李伍平等(2001, 2002)、张宏和张旗(2005)也认为该套火山岩最初起源于岩石圈地幔, 并具有明显的壳幔相互作用特征。尽管他们对壳幔相互作用过程没有给出明确的限定, 但其观点更趋向于岩浆混合作用。本文是在全面收集和总结已发表的阜新-义县盆地内火山岩数据的基础上, 试图通过系统的岩石、地球化学图解进一步反演义县组火山岩的形成过程, 并对富镁火山岩形成的几个关键科学问题进行深入地探讨。

1 义县组火山岩层序

根据邢德和等(2005)和陈树旺等(2005)研究结果认为辽西义县组为一套中生代火山-沉积岩系, 主要由中-基性熔岩、火山碎屑岩和湖泊相沉积岩构成, 河流相沉积岩少。依据阜新-义县盆地火山活动的规律性, 他们将义县组划分为 4 个岩性段, 自下而上依次为: 底砾岩 + 基性—中基性火山岩段, 含沉凝灰岩夹层; 湖相沉积岩(含珍稀化石) + 中性、基性火山岩段; 基性、中基性—酸性、偏碱性火山岩段; 和砾岩、沉火山角砾岩 + 中酸性、偏碱性火山岩段。其中含

6 个化石层位, 义县组一段中基性火山岩的(沉)凝灰岩中产有丰富的以鹦鹉嘴龙为代表的古脊椎动物化石; 二段的湖相沉积岩中含有大量热河生物群化石(腹足类、双壳类、叶肢介、介形类、昆虫、鱼类、两栖类、爬行类、鸟类、哺乳类以及植物), 其中包括中华龙鸟、孔子鸟和辽宁古果等珍稀化石, 是义县组最主要的化石产出层位。化石发掘和微量元素分析表明热河生物群经历了集群死亡和快速掩埋, 火山活动的有毒气体是生物灾难事件的主要因素(陈树旺等, 2005)。其详细的义县组综合地层柱状图见邢德和等(2005)图 1。总体上, 义县组火山岩地层中, 下部以基性火山熔岩为主, 中上部以中基性、酸性和偏碱性火山熔岩和角砾岩为主。即从底部到顶部, 火山岩有从基性向偏酸性和碱性演化的趋势。但在局部地区如绥中, 也存在以酸性火山岩为主的现象。

在义县四合屯新开岭地区, 义县组底部一段出现多层含大量(5% ~ 15%) 橄榄石捕虏晶的玄武岩(邵济安等, 2006a)。其每个旋迴底部为含橄榄石捕虏晶的玄武岩(图 1a), 中上部为含大量气孔或近垂直层面的气管状玄武安山岩(图 1b)、安山岩, 部分气孔被玛瑙或水晶簇充填。大量气孔的出现说明当时岩浆中存在大量的挥发份(气体和水)。而在三宝营地区义县组上部出现灰色含少量橄榄石的玄武岩夹红色—紫红色安山质-英安质火山角砾岩的现象(图 1c)。泡子地区义县组顶部出现一套含大量辉石晶体的玻璃质辉石安山岩(图 1d), 该套玻璃质熔岩为水下喷发的产物, 其岩浆锆石的 U-Pb 年龄为 115 Ma(邵济安等, 2007), 标志着该时期义县组火山活动的结束。

2 义县组火山岩的岩石化学特征

义县组火山岩的常量元素相关图见图 2。义县组火山岩具有非常宽的化学组成变化范围(图 2), 其 SiO_2 和全碱($K_2O + Na_2O$) 含量变化范围为 43% ~ 77.6% 和 4.1% ~ 8.8%, 即岩石类型从玄武岩(碧玄岩)到流纹岩皆存在, 但主要为偏碱性的粗面玄武岩-粗面安山岩。 MgO 含量从高达 15% 到 0%, 主要分布在 2% ~ 9% 之间。 MgO 、 FeO^T 、 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量的升高而降低, 即具有明显负相关关系。有趣的是尽管 MgO , 尤其是 FeO^T , 随 SiO_2 含量的升高而降低, 但 $Mg^{\#}$ 并不随 SiO_2 含量的升高而明显降低。 SiO_2 含量为 43% ~ 70%, 即从碧玄岩到粗面安山岩甚至到粗面英安岩, $Mg^{\#}$ 皆分布在 40 ~ 70 之间(图 2), 即 Wang *et al.* (2006) 认为的高镁火山岩。 Al_2O_3 含量亦不随 SiO_2 含量的变化而变化, 多在 14% ~ 16.8%。少数 SiO_2 不饱和的玄武质岩石和 SiO_2 过饱和的粗面英安质-流纹质岩石具有很低的 Al_2O_3 含量。值得注意的是义县组火山岩与碱锅玄武岩存在明显的化学组成上的差异, 尤其表现在前者具有低的 CaO 和 TiO_2 含量和高的 SiO_2 含量(图 2)。而附近阜新地区稍晚出现的碱锅玄武岩(约 105 Ma) 则为华北北缘典型的来自软流圈的未分异岩浆(Zhang *et al.*, 2003); 同样, 与义县组火山

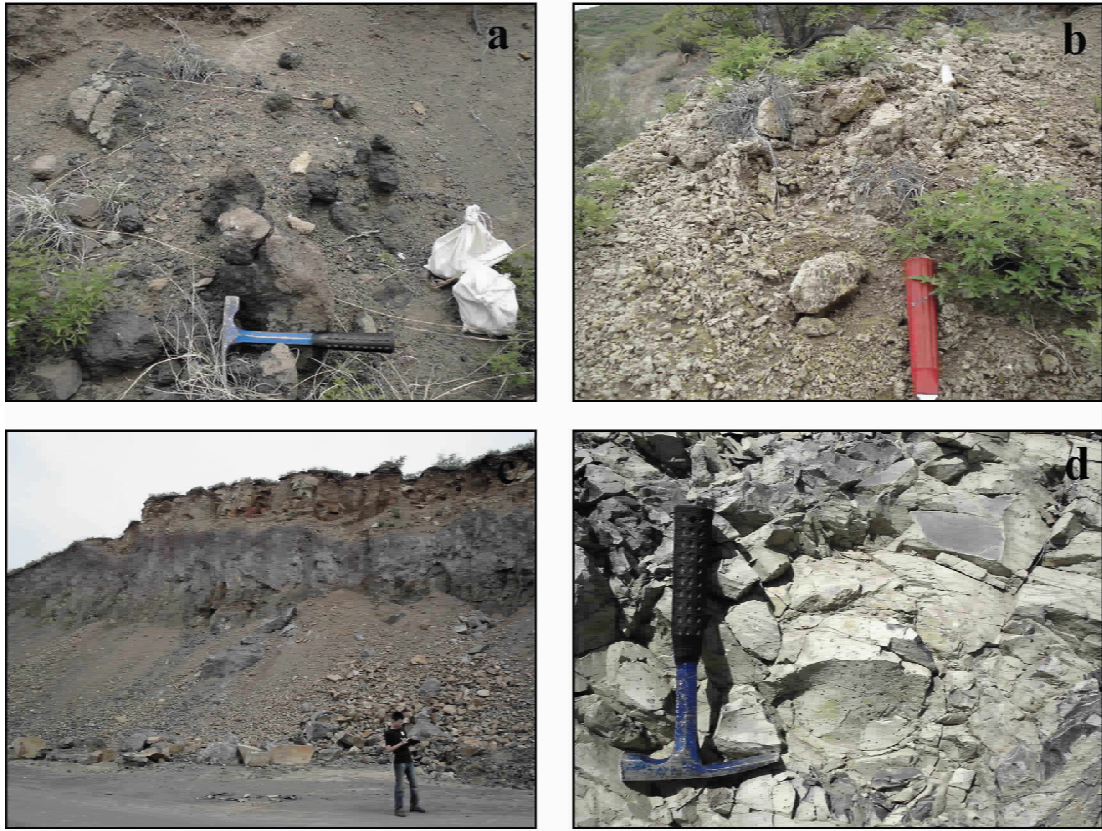


图1 义县组火山岩的野外照片

照片 a- 新开岭义县组底部含大量橄榄石捕虏晶的玄武岩, 每个旋迴底部含橄榄石捕虏晶多, 并球形风化呈黑色块体; 照片 b- 新开岭义县组底部含橄榄石捕虏晶少的玄武安山岩, 每个旋迴中上部为含大量气孔或近垂直层面的气管状玄武安山岩, 风化后呈土黄色; 照片 c- 三宝营义县组上部两层含少量橄榄石的玄武岩夹红色—紫红色安山质—英安质火山角砾岩, 玄武岩风化后呈灰黄—灰绿色; 照片 d- 泡子义县组顶部含大量辉石晶体的玻璃质辉石安山岩, 玻璃致密, 风化后的小空洞即原为辉石晶体

Fig. 1 Photos of volcanic rocks from the Yixian Formation

岩同时期出现的华北内部以方城玄武岩(125 Ma)为代表的青山组火山岩则为典型的来自华北改造过的中生代岩石圈地幔的原始岩浆(Zhang *et al.*, 2002)。因此, 将辽西义县组火山岩的地球化学特征与碱锅玄武岩和方城玄武岩地球化学特征进行系统的对比探讨义县组火山岩的来源及其形成过程尤为重要。

3 义县组火山岩的微量元素特征

3.1 稀土元素

义县组火山岩的稀土元素总量、球粒陨石标准化的La/Yb比值以及Eu异常与常量元素SiO₂和MgO相关图见图3。义县组火山岩的稀土元素总量变化范围很宽, 但绝大多数分布在 100×10^{-6} ~ 300×10^{-6} 之间, 且基本上不随SiO₂和MgO含量的变化而变化。少数富镁贫硅的玄武质岩石具有很高或很低的稀土元素总量(高达 550×10^{-6} 或低至 70×10^{-6})。这些火山岩皆具有LREE富集的配分型式(La_N/Yb_N

>1), 尽管La_N/Yb_N比值变化很大, 但多在10~80之间, 且大致随SiO₂的升高和MgO的降低而增加。极个别样品具有极高或很低的La_N/Yb_N比值(高达110或低至3)。这些火山岩具有弱的Eu负异常(Eu/Eu* = 0.7~1), 且Eu异常基本不随SiO₂和MgO含量的变化而变化。个别流纹质岩石具有极明显的Eu异常(Eu/Eu* = 0.05)。义县组火山岩稀土元素特征总体上与方城玄武岩(平均稀土总量 = 392×10^{-6} ; La_N/Yb_N = 44; Eu/Eu* = 0.85; Zhang *et al.*, 2002)和碱锅玄武岩(平均稀土总量 = 190×10^{-6} ; La_N/Yb_N = 12.7; Eu/Eu* = 0.97)相近, 但方城玄武岩稀土元素总量更高, 而碱锅玄武岩La_N/Yb_N比值偏低。

3.2 大离子亲石元素

义县组火山岩的大离子亲石元素、高场强元素及其比值与常量元素SiO₂和MgO相关图见图4。义县组火山岩极富大离子亲石元素, 并具有非常宽的变化范围。其Rb、Sr、Ba含量和Rb/Sr比值分别多在 20×10^{-6} ~ 100×10^{-6} (个别高达 $176 \times$

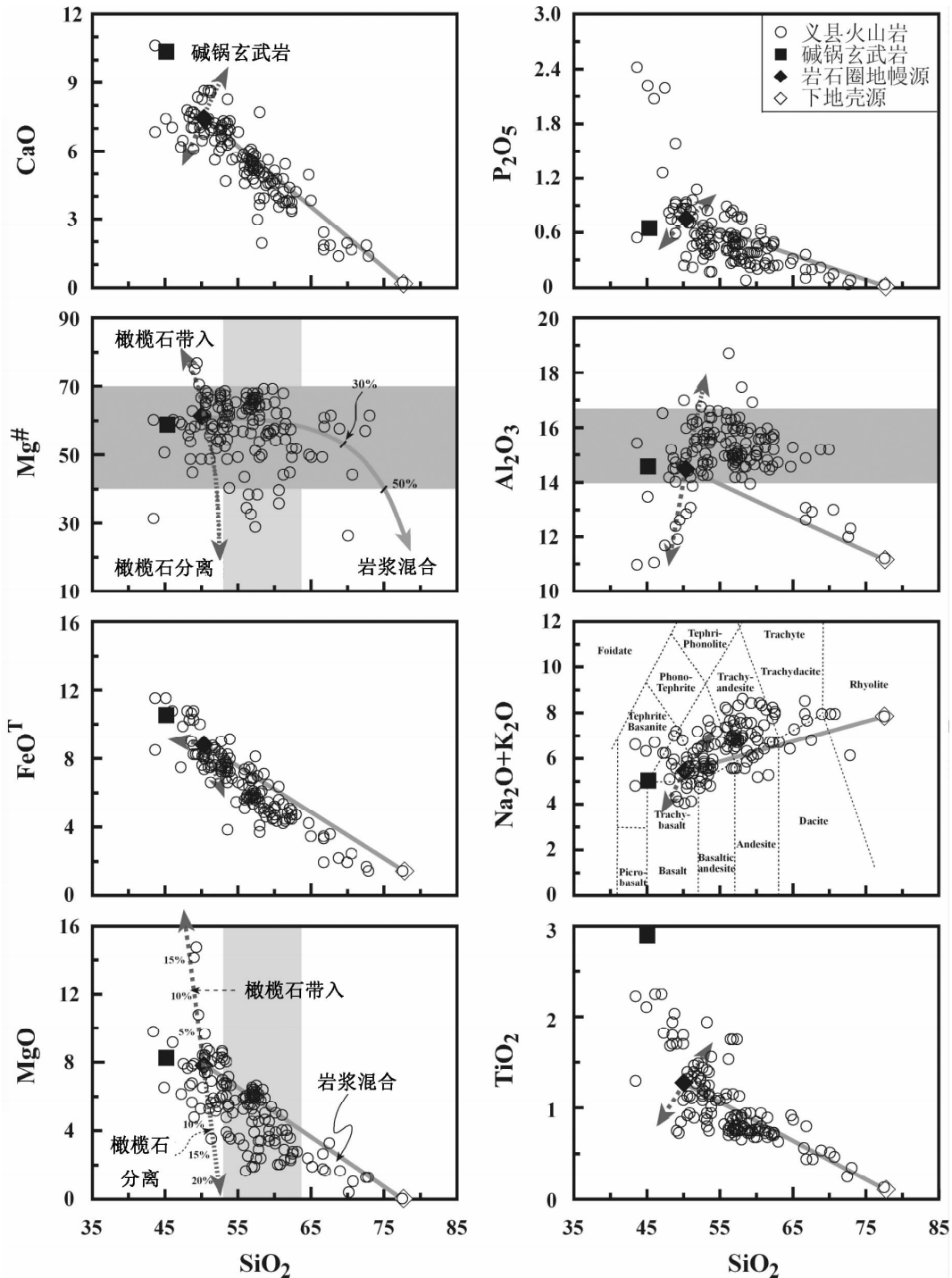


图2 义县组火山岩的常量元素相关图

数据来源于张招崇等(1994),史卜庆等(1998),陈树旺等(2001),李伍平等(2001, 2002),彭艳东等(2003, 2004),张宏等(2004, 2005),邢德和等(2005),张宏和张旗(2005),Wang *et al.* (2006),邵济安等(2006a, 2007)和Yang and Li (2007);碱锅玄武岩为平均值,数据来源于Zhang *et al.* (2003);幔源和壳源火山岩、橄榄石捕虏晶带入、橄榄石斑晶分离以及岩浆混合趋势线数据见表1

Fig.2 Major element variations of volcanic rocks from the Yixian Formation

10^{-6} 、 $400 \times 10^{-6} \sim 1700 \times 10^{-6}$ (图4)、 $600 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$ (个别高达 2300×10^{-6}) 和 $0.01 \sim 0.2$ (个别可达 0.52) 之间。火山岩的 Y 含量相对较低,多为 $9 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$,个别可低

至 2×10^{-6} (图4)。其 Sr/Y 比值为 $30 \sim 90$ 。火山岩的 Y 和 Sr 含量以及 Sr/Y 比值基本不随 SiO_2 和 MgO 含量的变化而变化,但 Rb/Sr 比值随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的降低而增加。

表 1 原始幔源岩浆随橄榄石捕房晶的带入、橄榄石斑晶的分离以及与壳源岩浆混合的组成变化 (wt%)

Table 1 Compositional variation of the primitive mantle-derived magma with olivine xenocryst input, olivine phenocryst fractionation and mixing with the crust-derived magma

比例	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	总量	Mg [#]	数据来源
橄榄石捕房晶带入														
F ₉₀	40.74	0.00	0.00	9.74	0.13	49.54	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	100.27	90.06	邵济安等(2006a)
5%	49.63	1.21	13.75	8.86	0.14	9.89	7.17	3.16	1.98	0.71	2.85	99.36	66.55	
10%	49.16	1.15	13.02	8.91	0.14	11.98	6.80	2.99	1.88	0.68	2.70	99.41	70.56	
15%	48.69	1.09	12.30	8.95	0.14	14.07	6.43	2.83	1.77	0.64	2.55	99.46	73.68	
20%	48.23	1.02	11.58	9.00	0.14	16.15	6.06	2.66	1.67	0.60	2.40	99.50	76.18	
橄榄石斑晶分离														
F ₈₀	38.48	0.00	0.00	19.30	0.43	41.47	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	99.91	79.29	邵济安等(2006a)
5%	50.68	1.34	15.20	8.29	0.12	6.12	7.91	3.49	2.19	0.79	3.15	99.28	56.83	
10%	51.26	1.40	15.92	7.77	0.11	4.44	8.28	3.66	2.29	0.83	3.30	99.25	50.47	
15%	51.84	1.47	16.64	7.24	0.09	2.76	8.64	3.82	2.40	0.86	3.45	99.22	40.43	
20%	52.42	1.53	17.37	6.72	0.08	1.08	9.01	3.99	2.50	0.90	3.60	99.19	22.20	
岩浆混合作用														
幔源岩浆	50.10	1.28	14.47	8.82	0.14	7.81	7.54	3.32	2.08	0.75	3.00	99.31	61.22	
10%	52.85	1.16	14.15	8.08	0.13	7.03	6.81	3.30	2.35	0.68	2.86	99.39	60.79	
20%	55.61	1.05	13.82	7.34	0.12	6.25	6.08	3.28	2.62	0.60	2.71	99.47	60.27	
30%	58.36	0.93	13.49	6.60	0.11	5.47	5.34	3.25	2.88	0.53	2.57	99.54	59.61	
40%	61.11	0.81	13.17	5.87	0.11	4.69	4.61	3.23	3.15	0.46	2.42	99.62	58.75	
50%	63.87	0.70	12.84	5.13	0.10	3.91	3.87	3.20	3.42	0.39	2.28	99.70	57.59	
60%	66.62	0.58	12.51	4.39	0.09	3.13	3.14	3.18	3.68	0.31	2.13	99.77	55.94	
70%	69.38	0.47	12.19	3.65	0.08	2.35	2.40	3.15	3.95	0.24	1.99	99.85	53.40	
80%	72.13	0.35	11.86	2.92	0.08	1.57	1.67	3.13	4.22	0.17	1.84	99.93	48.95	
90%	74.89	0.24	11.54	2.18	0.07	0.79	0.93	3.10	4.48	0.09	1.70	100.01	39.24	
壳源岩浆	77.64	0.12	11.21	1.44	0.06	0.01	0.20	3.08	4.75	0.02	1.55	100.17	1.22	张招崇等(1994)

注: FeO^T为全铁, LOI为烧失量; 幔源岩浆成分取自图2文献中SiO₂含量48%~52%的平均值; 壳源岩浆为张招崇等(1994)中的流纹岩;

橄榄石捕房晶 (Fo = 90) 和橄榄石斑晶 (Fo = 80) 数据取自邵济安等(2006a)

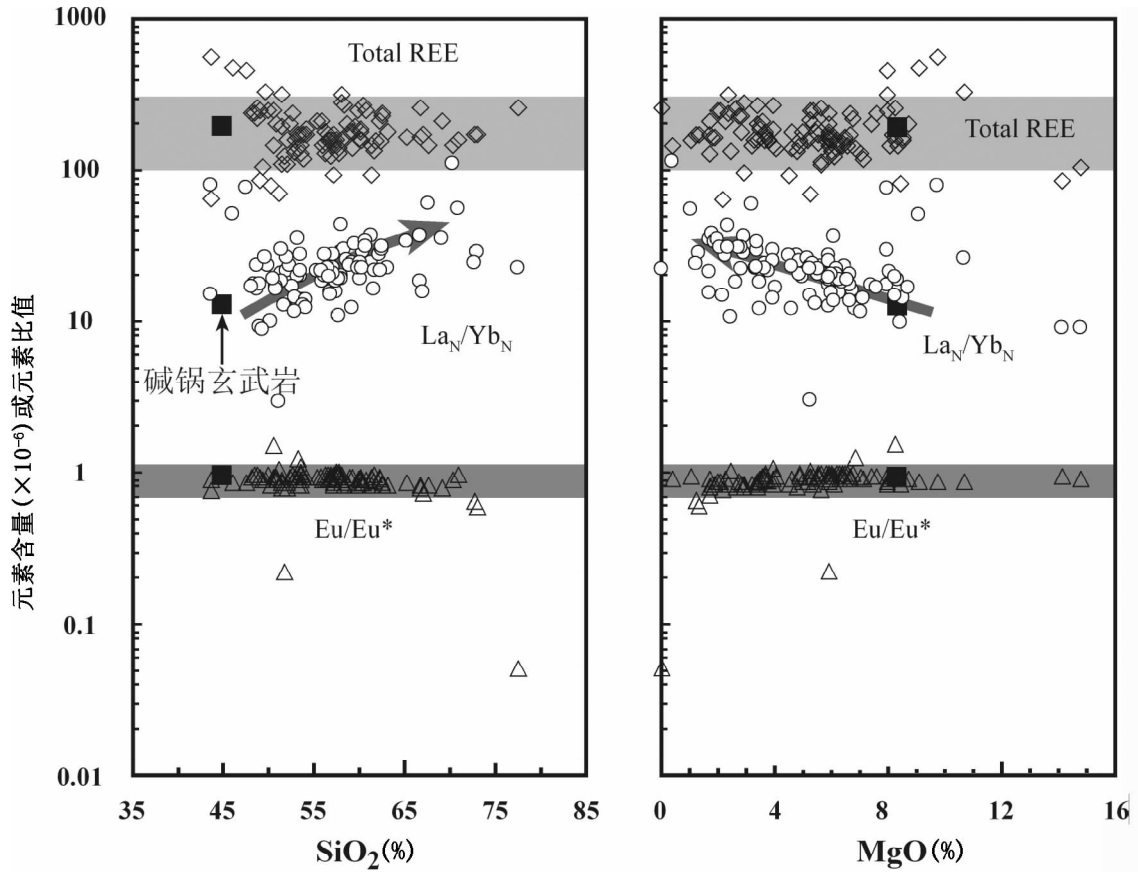


图3 义县组火山岩的 SiO_2 和 MgO 含量与稀土元素总量 ($\times 10^{-6}$), 球粒陨石标准化的 La/Yb 比值以及 Eu 异常投图

义县组火山岩数据来源同图2; 碱钠玄武岩为平均值, 数据来源于 Zhang *et al.* (2003);

$$\text{Eu}/\text{Eu}^* = (\text{Eu}/0.056) / [(\text{Sm}/0.1471 + \text{Gd}/0.1966)/2]$$

Fig. 3 SiO_2 and MgO contents versus total REE abundances ($\times 10^{-6}$), chondrite-normalized La/Yb ratios and Eu anomalies of volcanic rocks from the Yixian Formation

火山岩的 U 、 Th 含量较低, 分别为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$ (个别可达 4.6×10^{-6}) 和 $2 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。 U/Th 比值为 $0.1 \sim 0.4$ 。而且其 Th 含量和 U/Th 比值随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的降低而增加。这些特征亦与方城玄武岩 (平均值为: $\text{Rb} = 14.7 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} = 1310 \times 10^{-6}$, $\text{Ba} = 1057 \times 10^{-6}$, $\text{Rb}/\text{Sr} = 0.011$, $\text{Y} = 32.2 \times 10^{-6}$, $\text{Sr}/\text{Y} = 40.6$, $\text{U} = 2.2 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 13.8 \times 10^{-6}$, $\text{U}/\text{Th} = 0.155$; Zhang *et al.*, 2002) 和碱钠玄武岩 (平均值为: $\text{Rb} = 50.3 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} = 735 \times 10^{-6}$, $\text{Ba} = 773 \times 10^{-6}$, $\text{Rb}/\text{Sr} = 0.0685$, $\text{Y} = 26.3 \times 10^{-6}$, $\text{Sr}/\text{Y} = 28$, $\text{U} = 1.2 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 4.8 \times 10^{-6}$, $\text{U}/\text{Th} = 0.25$) 相近, 但义县组火山岩比碱钠玄武岩具有更低的 Y 含量和高的 Sr/Y 比值, 而方城玄武岩的 Rb 含量低, Th 和 Y 含量高。

3.3 高场强元素

同样, 义县组火山岩具有很宽的高场强元素变化范围, 如 Zr 为 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$, 个别样品可达 330×10^{-6} ,

Nb 为 $7 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$, 个别高达 30×10^{-6} (图4)。但其 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值变化范围较小, 分别为 $33 \sim 46$ 和 $14 \sim 25$ 。值得注意的是 Zr 、 Nb 含量和 Zr/Hf 比值基本不随 SiO_2 和 MgO 含量的变化而变化 (图4), 但 Nb/Ta 比值随 SiO_2 含量的增加而降低。这些火山岩的最明显特征是亏损高场元素 ($\text{Zr}/\text{Zr}^* = 0.38 \sim 1.0$, 个别可达 1.1 ; $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0.13 \sim 0.6$; $\text{Ti}/\text{Ti}^* = 0.27 \sim 0.9$, 个别流纹岩可低至 0.06)。这一高场强元素特征与方城玄武岩 (平均值为: $\text{Zr} = 222 \times 10^{-6}$, $\text{Zr}/\text{Hf} = 37.6$, $\text{Zr}/\text{Zr}^* = 0.38$, $\text{Nb} = 10.4 \times 10^{-6}$, $\text{Nb}/\text{Ta} = 9.7$, $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0.1$, $\text{Ti}/\text{Ti}^* = 0.33$; Zhang *et al.*, 2002) 类似, 但与碱钠玄武岩 (平均值为: $\text{Zr} = 207 \times 10^{-6}$, $\text{Zr}/\text{Hf} = 39.4$, $\text{Zr}/\text{Zr}^* = 0.84$, $\text{Nb} = 63.4 \times 10^{-6}$, $\text{Nb}/\text{Ta} = 17.5$, $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 1.63$, $\text{Ti}/\text{Ti}^* = 1.31$) 明显不同, 后者不具有高场强元素的亏损特征。义县组火山岩的高场强元素的亏损程度 (如 Nb/Nb^* 和 Ti/Ti^*) 随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的降低而增加 (图4), 但 Zr/Zr^* 的变化趋势则相反。

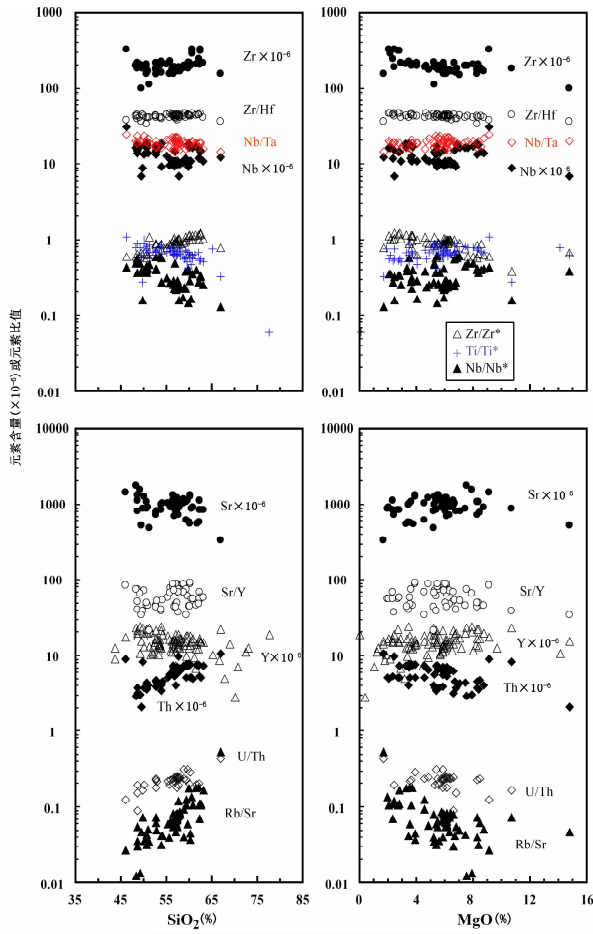


图4 义县组火山岩的 SiO₂ 和 MgO 含量与 Y, LILE、HFSE 及其比值投图

义县组火山岩数据来源同图2, 其中 Zr/Zr*、Nb/Nb* 和 Ti/Ti* 相当于其本身原始地幔标准化值与微量元素蛛网图上相邻两元素标准化的平均值之差, 即亏损程度; $Zr/Zr^* = (Zr/10.5) / [(Nd/1.25 + Sm/0.406)/2]$; $Nb/Nb^* = (Nb/0.658) / [(U/0.0203 + La/0.648)/2]$; $Ti/Ti^* = (Ti/1205) / [(Gd/0.544 + Tb/0.099)/2]$

Fig. 4 SiO₂ and MgO contents versus Y ($\times 10^{-6}$), LILE, HFSE and their ratios of volcanic rocks from the Yixian Formation

4 义县组火山岩的同位素特征

已有的义县组火山岩 Sr-Nd 同位素数据(李伍平等, 2002; 张宏等, 2004, 2005; Yang and Li, 2007) 显示这些火山岩具有非常一致的 Sr 同位素初始比值 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{125\text{Ma}} = 0.706 \sim 0.707$), 但 Nd 同位素变化很大, 其校正至 125 Ma 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-7.2 \sim -15.2$, 其中张宏等(2004) 报道的一个样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 高达 -2.1 。这些 Sr-Nd 同位素特征与邻近的 105

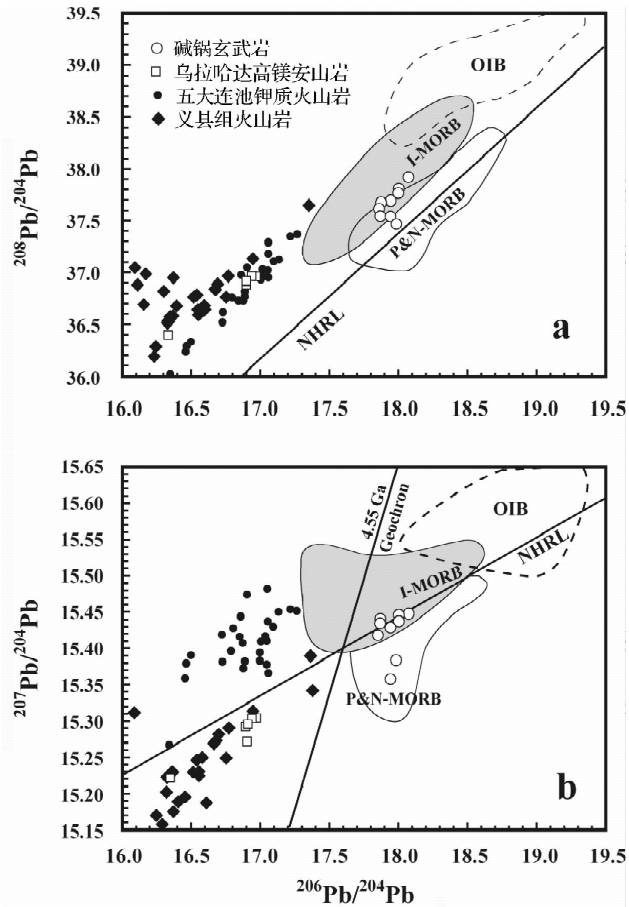


图5 义县组火山岩的 Pb 同位素组成

数据来源于李伍平等(2002), 张宏等(2004, 2005) 和 Yang and Li (2007); 碱锅玄武岩和乌拉哈达高镁玄武安山岩数据来自 Zhang *et al.* (2003); 钾质火山岩为黑龙江五大连池新生代火山岩(Zhang *et al.*, 1998); I-MORB 为印度洋 MORB, P&N-MORB 为太平洋和北大西洋 MORB; OIB 和 NHRL 参考 Barry and Kent(1998) 和 Zou *et al.* (2000)

Fig. 5 Pb isotopic compositions of volcanic rocks from the Yixian Formation

Ma 的碱锅玄武岩 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703 \sim 0.704$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 4 \sim 5$ 相差甚远, 但与乌拉哈达高镁安山岩 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7057$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.5$) 和 125 Ma 的方城玄武岩 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.710$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -13 \sim -14$) 接近。

义县组火山岩具有较宽但较低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (分别为 $16.1 \sim 17.4$ 和 $15.16 \sim 16.38$)。在图 5b 中与乌拉哈达高镁安山岩组成接近, 但与碱锅玄武岩和五大连池富钾火山岩组成差别较大。其 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 组成相对于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 富集, 分布在北半球参考线(NHRL)之上, 这表明义县组火山岩相对贫 U 富 Th。

5 讨论

5.1 高 Mg[#]安山岩、埃达克质岩石与下地壳拆沉?

自从 Gao *et al.* (2004) 利用下地壳拆沉模式来解释辽西兴隆沟组埃达克质高 Mg[#]安山岩的岩石成因以来,下地壳拆沉模式被广泛应用到辽西火山岩的研究之中(史卜庆等, 1998; Wang *et al.*, 2006)。其主要依据是这些义县组火山岩具有高的 Mg[#]值,并具有埃达克质地球化学特征,从而需要拆沉的下地壳榴辉岩的部分熔融形成富 Si 低 Y 的熔体,并且这些富 Si 低 Y 熔体还需要与软流圈橄榄岩相互作用形成高的 Mg[#]值。那么这些义县组火山岩的高 Mg[#]值和埃达克质地球化学特征是不是原始岩浆的性质即成为非常值得关注的问题。

高镁安山岩: 根据 Crawford *et al.* (1989) 的定义,高镁安山岩(high magnesian andesites)是一套中性岩石,其 SiO₂ 含量(剔除挥发份后) > 53% 和 MgO 含量 > 8%。一般认为形成这些高镁安山岩需要两个重要条件:(1)需要有足够的含水组分供应难熔的岩石圈地幔以降低其固相线温度;(2)地幔楔中存在能够产生和维持很高地温条件的机制(Crawford *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2002)。因此,高镁安山岩通常出现在活动大陆边缘、构造活动带或板内裂谷环境,其地幔源区通常认为是比 MORB 源区(软流圈)更难熔的岩石圈地幔(Crawford *et al.*, 1989; Tatsumi and Maruyama, 1989)。故高镁安山岩的形成环境类似于玻安岩(Boninites)。辽西地区中生代的确存在这种高镁安山岩(Zhang *et al.*, 2003)。

然而,义县组火山岩当 SiO₂ 含量大于 53% 时,其 MgO 含量远低于 8% (图 2),即义县组火山岩中安山岩部分(SiO₂ = 53% ~ 63%; MgO = 2% ~ 7%)并不属于典型的高镁安山岩,尽管这些安山岩大部分具有高的 Mg[#]值(40 ~ 70,部分可低至 30; 图 2)。因此,作者认为将这些 MgO 含量不高但却具有高的 Mg[#]的安山岩最好叫做高 Mg[#]安山岩。Rapp *et al.* (1999) 最初也使用的是高 Mg[#]安山岩一词,而非高镁安山岩。二者存在本质的区别。

那么,这些 MgO 含量不高但 Mg[#]却高的安山岩是否必须通过拆沉下地壳岩石熔融形成的岩浆与地幔橄榄岩反应形成呢? 答案不是唯一的。至少另外两个过程可以造成同样的效果:(1)原始岩浆含大量橄榄石捕虏晶(Fo₉₀, 邵济安等, 2006a),岩浆消耗橄榄石造成岩浆中 Mg[#]值的增加,在随后的岩浆演化过程中又结晶出橄榄石斑晶(Fo₈₀, 邵济安等, 2006a)造成 MgO 的降低,这一吸收高镁橄榄石结晶出低镁橄榄石的过程无疑造成了残余岩浆中 Mg[#]值的增加;(2)原始的玄武质岩浆与流纹质岩浆的混合作用,简单的模拟计算(图 2)可知混合岩浆中 Mg[#]值并不象 MgO 和 FeO 含量一样随着流纹质岩浆混合比例的增加而显著降低,即当流纹质岩浆比例高达 30%,甚至 50% 时,混合后岩浆 SiO₂ 含量已变成英安质时仍具有高的 Mg[#]值(40 ~ 60, 图 2)。另外, Rapp *et*

al. (1999) 实验岩石学研究亦认为俯冲板片形成的熔体与地幔橄榄岩反应产生的混合熔体为高 Mg[#]埃达克质熔体,而高 Mg[#]安山岩则来源于俯冲板片熔融形成的熔体对弧下地幔交代作用改造后的岩石圈地幔的部分熔融,而并非直接来源于俯冲板片形成的熔体与地幔橄榄岩的反应。因此,义县组火山岩的高 Mg[#]值特征很可能不是原始岩浆本身的性质,故很难作为判断存在下地壳拆沉作用的标志。

埃达克质岩: Defant and Drummond (1990) 通过对岛弧火山岩的系统研究指出典型埃达克岩很可能是年轻的(25 Ma 以来)俯冲洋壳(榴辉岩和角闪岩)部分熔融的产物,同时指出只有年轻的洋壳才有足够的热量导致其部分熔融,这可能就是现在岛弧地区典型埃达克岩很少的主要原因。Rapp *et al.* (1999) 实验岩石学研究证明俯冲洋壳部分熔融的确可以形成埃达克岩。因此,典型埃达克岩是一种中(酸)性富钠火成岩,其地球化学特征为 SiO₂ ≥ 56%、Al₂O₃ ≥ 15%、重稀土元素和 Y 含量低(如 Yb ≤ 1.9 × 10⁻⁶, Y ≤ 18 × 10⁻⁶)、高 Sr (大多数 > 400 × 10⁻⁶) 和 Sr/Y 比值(> 20 ~ 40)。显然,根据这一标准,以中基性为主(图 2)钾含量较高的义县组火山岩明显不属于典型的埃达克岩。然而,义县组火山岩却具有埃达克质火山岩的某些地球化学特征,特别是那些 SiO₂ 含量在 56% ~ 63% 之间的火山岩(图 6)。那么这些具有埃达克质地球化学特征的义县组火山岩是否能够通过加厚的下地壳(斜长角闪岩、石榴石麻粒岩和榴辉岩)部分熔融获得呢? 即 C 型埃达克岩(张旗等, 2001)。2002 年两位埃达克岩研究的先驱(Defant *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2002) 同时在岩石学报上撰文认为加厚的下地壳部分熔融可以形成(富钾)埃达克质岩石。他们同时也指出能熔出埃达克质熔体的下地壳岩石并不一定是榴辉岩,斜长角闪岩和石榴石麻粒岩同样可以形成高 Sr、低 Y 的埃达克质熔体。而且,在同样的温压条件下后者更易熔,因为角闪石的脱水会降低岩石的固相线温度。因此,即使这些义县组埃达克质岩石是直接加厚的下地壳熔出的,也并不一定能指示存在下地壳拆沉。

更何况加厚的下地壳熔出的埃达克质熔体是中酸性的(Defant *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2002),而义县组火山岩中具有埃达克质性质的岩石是中基性的。另外,义县组 SiO₂ 含量在 46% ~ 56% 的部分火山岩亦投在埃达克岩(图 6) 范围内说明著名的 Y-Sr/Y 图解也很难准确厘定火山岩的属性。作者认为义县组火山岩中那些具有埃达克质性质的岩石可以通过幔源与壳源岩浆混合作用来解释(见后节)。因此,义县组火山岩的高 Mg[#]值和埃达克质地球化学特征并不是原始岩浆本身的性质,故不能用来指示该地区曾发生过下地壳拆沉作用。

5.2 原始岩浆组成: 软流圈或岩石圈地幔?

岩石圈地幔: 义县组火山岩(≈ 125 Ma) 的组成主要是中基性的,其玄武质组分(SiO₂ = 48% ~ 52%) 的平均常量元素组成(表 1) 与碱钙玄武岩(除 TiO₂ 外, 图 2) 和方城玄武岩

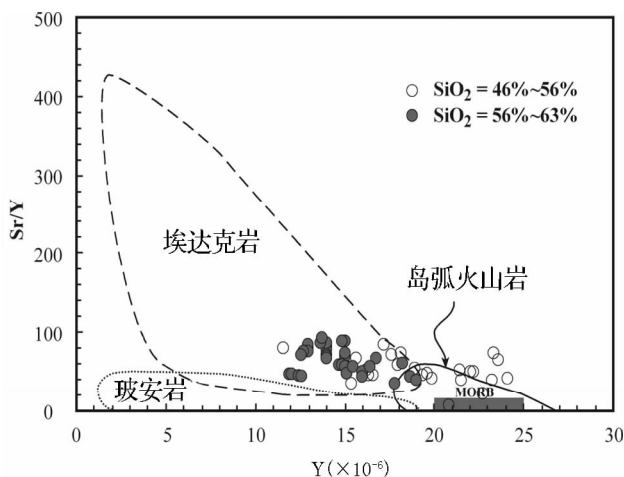


图6 义县组火山岩的Y与Sr/Y比值相关图

义县组火山岩数据来源同图2; MORB、岛弧火山岩、埃达克岩、玻安岩范围来自 Defant and Drummond(1990)

Fig. 6 Y versus Sr/Y diagram of volcanic rocks from the Yixian Formation

很接近,这说明其原始岩浆应该是幔源的。现在的问题是他们是来自类似碱玄武岩(105 Ma)的软流圈还是来自类似方城玄武岩(125 Ma)的岩石圈地幔。义县组下部玄武质岩石中大量橄榄石捕虏晶的存在(图1a)(邵济安等,2006a)、义县组火山岩较低的TiO₂含量、亏损高场强元素特征(图4)和富集的Sr-Nd同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{125\text{Ma}} = 0.706 \sim 0.707$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.2 \sim -15.2$)皆说明这些玄武质岩石的原始岩浆来源于岩石圈地幔而非软流圈。橄榄石捕虏晶较低的Fo(88~90; 邵济安等,2006a)和岩浆中大量挥发份的存在(图1b)说明形成这些义县组玄武质岩石的岩石圈地幔曾受到过俯冲流/熔体的改造,为相对饱满的含水橄榄岩。与碱岩和方城玄武岩相比,义县组玄武质岩石相对较低的CaO含量说明橄榄岩熔融时单斜辉石参与比例较少。这可能暗示岩石圈地幔主要为贫单斜辉石的二辉橄榄岩和/或方辉橄榄岩,并不存在大量的辉石岩脉。这明显不同于华北南缘中生代被改造的岩石圈地幔的情况(Zhang *et al.*, 2002)。这一现象是否反映了华北南部受俯冲陆壳、而华北北部受俯冲洋壳的影响所造成的不同值得进一步探讨。

原始岩浆组成:根据上节探讨,作者认为义县组火山岩SiO₂在48%~52%之间的平均常量元素组成(表1)可以近似代表原始岩浆组成。个别具有极高(>15%)或很低(<4%)MgO和Al₂O₃的玄武质岩石可以通过橄榄石捕虏晶的带入或橄榄石斑晶的分离来解释(图2)。简单的模拟计算表明加入橄榄石捕虏晶会使全岩MgO含量迅速升高和Al₂O₃适当降低,当加入橄榄石捕虏晶达20%时,全岩MgO迅速从7.81%升高至16.15%,而Al₂O₃从14.47%降低至11.58%(表1和图2)。同理,橄榄石斑晶的分离会造成岩浆

中MgO的迅速降低和Al₂O₃快速升高,当橄榄石斑晶分离达20%时,全岩MgO迅速从7.81%降低至1.08%,而Al₂O₃从14.47%升高至17.37%(表1和图2)。值得注意的是无论是橄榄石捕虏晶的加入还是橄榄石斑晶的分离结晶对岩浆中其他氧化物的相对含量影响很小。另外,橄榄石捕虏晶的环带结构说明橄榄石捕虏晶的加入途径是通过岩浆熔蚀橄榄石来实现的,这种过程造成了岩浆中MgO含量的升高和Al₂O₃含量的降低。但个别样品极高的MgO含量还很可能是分析过程中橄榄石捕虏晶未剔出的结果。因此,在计算原始岩浆组成时个别MgO含量极高的分析数据未考虑在内。

软流圈贡献:义县组火山岩是否具有软流圈物质的贡献是个值得深入探讨的问题。辽西地区晚中生代(白垩纪以后)一直处于伸展构造背景,岩石圈的伸展作用必然导致软流圈的相应上涌(邵济安等,2006b),从而诱发软流圈的减压熔融。因此,从理论上义县组火山岩可能有软流圈物质的贡献,特别是比义县组火山岩年轻不到20 Ma的碱玄武岩即全部为软流圈来源的,更使人们相信义县组火山岩很可能有软流圈物质的贡献。义县组火山岩的确有个别样品具有较高的Nd同位素组成,如新开岭地区的橄榄玄武岩($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.7 \sim -2.1$; 张宏等,2004; 邵济安等,2006b)。然而,这些橄榄玄武岩含有很多的橄榄石捕虏晶,这些橄榄石捕虏晶的存在是否会影响全岩同位素组成的测定还不得而知。同时,义县组顶部玻璃质辉石安山岩中斜方辉石捕虏晶和部分单斜辉石捕虏晶具有轻稀土元素亏损的配分型式(邵济安等,2006b,2007),这也被当做来自软流圈即存在软流圈物质贡献的证据。问题是由于斜方辉石本身的特性,岩石圈地幔来源的斜方辉石和有些单斜辉石也同样具有亏损轻稀土元素的配分型式。因此,这同样不能作为存在软流源物质贡献的绝对证据。因此,这个问题到现在为止仍然没有得到很好的解决。但可以肯定的是软流圈的贡献即使有,也非常有限,因为这些火山岩具有完全不同于MORB的Pb同位素组成(图5)。

5.3 岩浆混合: 古老下地壳

义县组火山岩剖面上部出现中基性与中酸性火山岩互层、其微量元素特征,特别是火山岩中具有韵律环带和反环带单斜辉石捕虏晶(邵济安等,2006a)的大量存在说明义县组火山岩的确存在明显的岩浆混合作用。那么参与混合作用的两种岩浆的来源如何呢?前已指出其基性端元来自岩石圈地幔。义县组火山岩低的U、Th含量和亏损的高场强元素特征(图4),特别是具有低放射成因的Pb同位素组成(图5)说明其酸性端元来自古老下地壳。具有反环带的单斜辉石捕虏晶的中心部分的组成与古老下地壳麻粒岩中单斜辉石的组成类似(邵济安等,2006a)进一步说明其酸性岩浆端元来自古老下地壳。古老下地壳石榴石麻粒岩和/或斜长角闪岩部分熔融形成的埃达克质岩浆与岩石圈地幔源基性岩浆的混合作用,即含橄榄石的基性岩浆和酸性岩浆不停

的向高位岩浆房的补给并混合,从而形成了义县组这套高 $Mg^{\#}$ 埃达克质火山岩。岩浆混合作用造成常量元素系统的变化(图2),同时造成微量元素如 La/Yb 比值(图3)、 Rb/Sr 和 U/Th 比值以及 Th 含量(图4)随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的减少即下地壳熔体比例的增加而增加,说明这些比值在下地壳熔体中比岩石圈地幔熔体中高。而有些元素如 Sr 、 Zr 、 Nb 和元素对如 Sr/Y 、 Zr/Hf 比值(图4)基本不随混合比例的变化而变化,说明岩石圈地幔源和下地壳源岩浆中这些元素含量及其比值相近,从而不能作为判断岩浆混合作用程度的指标。 Ti 和 Nb 的亏损程度(图4)明显随下地壳熔体比例的增加而增加即 Ti/Ti^* 和 Nb/Nb^* 比值以及 Nb/Ta 比值随 SiO_2 含量的增加而降低,这说明 Ti 和 Nb 的亏损主要来源于下地壳熔体。 Y 含量基本不随下地壳熔体比例的增加而变化(图4)的事实说明岩石圈地幔源熔体和下地壳来源的熔体具有相近的含量。这同时也暗示了岩石圈地幔源熔体来自石榴石相含水橄榄岩的部分熔融。如果真如此,那么随后的岩石圈伸展减薄作用就很明显,因为附近碱钙玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体皆为尖晶石二辉橄榄岩(Zhang *et al.*, 2003)。

5.4 底侵下地壳

义县组火山岩的形成除了上述两端元的混合作用,是否还有第三端元参与呢?义县组顶部玻璃质辉石安山岩中254 Ma 锆石(邵济安等,2007)的存在说明年轻的底侵下地壳熔融形成的岩浆可能参与了义县组火山岩的形成。其贡献程度尚无法估计。

5.5 岩浆演化过程

综上所述,形成义县组火山岩的整体岩浆演化过程可概括如下(图7):在早白垩纪华北东部地温梯度整体升高和岩石圈伸展的大背景下,曾遭受过古亚洲洋俯冲作用改造形成的含水橄榄岩优先发生部分熔融,形成玄武质岩浆。因此,初始岩浆应起源于岩石圈地幔,这些起源于岩石圈地幔的富含挥发份的原始岩浆直接喷出地表就形成了义县组火山岩底部含橄榄石捕虏晶的玄武岩,其中喷出后的岩浆分异作用导致每个旋迴底部为富含橄榄石捕虏晶的玄武岩,中上部为含大量气孔或近垂直层面的气管状玄武安山岩。岩浆的多次或持续的补给作用就形成了多个旋迴。若岩浆的补给作用不足以导致其直接喷出地表,此时的岩浆必将底侵于地壳底部或停留在地壳的高位岩浆房中。岩浆的底侵作用导致下地壳熔融形成酸性岩浆。而在此岩浆房中,来自岩石圈地幔的基性岩浆和来自地壳的酸性岩浆的不同程度的混合作用以及酸性岩浆的加入必将造成基性岩浆携带的橄榄石捕虏晶遭受熔蚀,从而形成一种高 $Mg^{\#}$ 安山质岩浆,这种岩浆随岩浆房内压力变化产生的脉动式喷发就形成了义县组的高 $Mg^{\#}$ 安山岩和英安岩。壳源岩浆既可能来自华北古老的

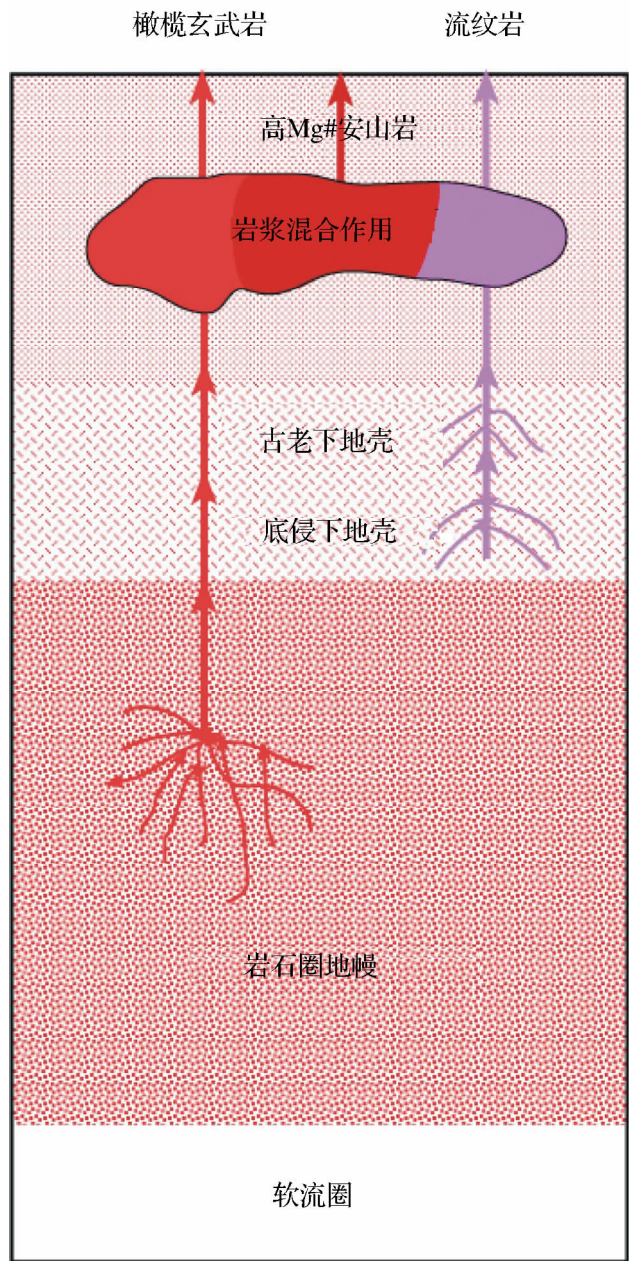


图7 辽西义县组火山岩的岩浆演化过程示意图

Fig.7 Schematic diagram showing the evolution processes of magmas in the crustal magma chamber that produced the volcanic lavas of the Yixian Formation.

地壳的物质来源和形成过程尚不清楚。因此,岩浆房内岩浆混合作用端元是多元的、过程是复杂的、持续时间是慢长的(约10 Ma, 125 ~ 115 Ma),同时地壳内还可能

存在多个岩浆房,故不能用简单的二元混合作用来进行元素模拟。岩浆房内早期以基性岩浆为主,随着时间的推移酸性岩浆的补给增多,晚期以酸性岩浆的补给为主。其酸性岩浆亦可能直接喷出地表形成流纹岩。因此,我们认为义县组火山岩可以通过多个端元岩浆混合作用来解释。

6 结论

通过上述系统分析可以得出以下结论:

(1) 阜新-义县盆地内义县组火山岩以中基性为主, 其上部层位中酸性组分增多。这与由加厚地壳熔出的以中酸性熔体为主的特征明显不同;

(2) 义县组火山岩的高 $Mg^{\#}$ 值和埃达克质特征皆不是原始岩浆本身的性质。因此, 不能作为下地壳拆沉作用的直接证据;

(3) 义县组火山岩的主体部分来源于受俯冲洋壳改造过的岩石圈地幔, 并存在与古老下地壳来源的熔体不同程度的混合作用, 因此, 是岩浆混合作用的产物;

(4) 底侵的下地壳也参与了义县组火山岩的形成, 而软流圈组分的贡献有限。

致谢 感谢李曙光院士和高山教授组织的对辽西兴隆沟组火山岩的野外地质考察, 同时感谢杨蔚博士和作者一块赴新开岭等地对辽西义县组火山岩的野外考察, 本文的初步设想正是在此次考察中获得的。感谢评审人对论文的详细评审, 他们的建设性意见对论文质量的提高很有帮助。

References

Barry TL and Kent RW. 1998. Cenozoic magmatism in Mongolia and the origin of central and east Asian basalts. In: *Mantle dynamics and plate interactions in east Asia* (Flower MFJ, Chung SL, Lo CH, Lee TY) (eds). American Geophysical Union, *Geodynamics Series* 27: 347–364

Chen SW, Zhang LD, Guo SZ, Zhang CJ, Peng YD, Jia B, Xing DH, Ding QH and Zheng YJ. 2001. Discovery of sedimentary tuff beds in basic and intermeate-basic volcanic rocks of Yixian Formation in western Liaoning Province and its significance. *Liaoning Geology*, 18 (1): 52–57 (in Chinese with English abstract)

Chen SW, Jin CZ, Zhang YP, Zhang LD and Guo SZ. 2005. Discussion on the structural-volcanic activities and biological events during the Early Cretaceous in the Sihetun area, Liaoning province, China. *Acta Geoscientica Sinica*, 26 (3): 241–248 (in Chinese with English abstract)

Crawford AJ, Falloon TJ and Green DH. 1989. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites. In *Boninites* (ed. Crawford A J), pp. 1–49. Unwin Hyman, London

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

Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (2): 129–142 (in Chinese with English abstract)

Fan WM, Zhang HF, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? *Journal of Petrology*, 41: 933–950

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897

Huang F, Li SG and Yang W. 2007. Contributions of the lower crust to Mesozoic mantle-derived mafic rocks from the North China Craton;

Implications for lithospheric thinning. *Geological Society of London, Special Publications*, 280: 55–75

Li TM, Shen ZK, Xu J and Wan YG. 2007. Analysis on the parameters of seismogenic fault of the earthquake more than 6. 5 in North China. *Progress in Geophysics*, 22 (1): 95–103 (in Chinese with English abstract)

Li WP, Lu FX, Li XH, Zhou YQ and Zhang DG. 2001. The origin of early Cretaceous volcanic rocks of Yixian Formation and crust-mantle interaction in west Liaoning Province, eastern China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21 (4): 1–6 (in Chinese with English abstract)

Li WP, Li XH, Lu FX, Zhou YQ and Zhang DG. 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of early Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (2): 193–204 (in Chinese with English abstract)

Menzies M, Xu YG, Zhang HF and Fan WM. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 96: 1–21

Peng YD, Zhang LD, Zhang CJ, Guo SZ, Xing DH, Jia B, Chen SW and Ding QH. 2003. Rare earth element characteristics of volcanic rocks from Yixian Formation of Western Liaoning. *Northwestern Geology*, 36 (2): 35–42 (in Chinese with English abstract)

Peng YD, Zhang LD, Zhang CJ, Guo SZ, Xing DH, Jia B, Chen SW and Ding QH. 2004. Petrochemistry of volcanic rocks of the Yixian volcanic cycle in Beipiao-Yixian area, western Liaoning. *Geology in China*, 31 (4): 356–364 (in Chinese with English abstract)

Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335–356

Rapp RP, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (3): 293–302 (in Chinese with English abstract)

Shi BQ, Wu ZP and Zhou YQ, Zhang DG, Xu XC. 1998. Study on volcanic activities of Mesozoic Yixian cycle, western Liaoning. *Geological Journal of China Universities*, 4 (4): 413–422 (in Chinese with English abstract)

Shao JA, Lu FX, Zhang LQ and Yang JH. 2006a. Discovery of xenocrysts in basalts of Yixian Formation in west Liaoning Province and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (6): 1547–1558 (in Chinese with English abstract)

Shao J, Chen FK, Lu FX and Zhou XH. 2006b. Mesozoic pulsative upwelling diapirs of asthenosphere in west Liaoning Province. *Earth Science*, 31 (6): 807–816

Shao JA, Zhang HF, Liu XM and Li ZT. 2007. Geochronological record of early Mesozoic magma underplating in the northern margin of the North China craton: Evidence from the U-Pb dating of zircons from the late Mesozoic andesites in western Liaoning Province. *Progress in Natural Science*, in press

Tatsumi Y and Maruyama S. 1989. Boninites and high-Mg andesites: tectonics and petrogenesis. In *Boninites* (ed. Crawford AJ), pp. 50–71. Unwin Hyman, London

Wang KL, Chung SL, Chen CH and Chen CH. 2002. Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the Northern Taiwan Volcanic Zone. *Chemical Geology*, 182: 513–528

Wang XR, Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hu ZC, Zhang H, Wang XC. 2006. Geochemistry of high-Mg andesites from the early Cretaceous Yixian Formation, western Liaoning: Implications for lower crustal delamination and Sr/Y variations. *Science in China(D)*, 49: 904–914

Xing DH, Sun CL, Sun YW, Zhang LD, Peng YD and Chen SW. 2005. New knowledge on Yixian Formation. *Acta Geoscientica Sinica*, 26 (1): 25–30 (in Chinese with English abstract)

Yang W and Li SG. 2007. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China craton. *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos.09.018

- Zhang H, Liu XM, Li ZT, Yang FL and Wang XR. 2005. Early Cretaceous large-scale crustal thinning in the Fuxin-Yixian basin and adjacent area in western Liaoning. *Geological Review*, 51(7): 360 - 372 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, Wang WL, Li ZT and Yang FL. 2004. Comprehensive correlation of the Yixian Formation in the Beipiao and Yixian areas, western Liaoning. *Geological Bulletin of China*, 23(8): 766 - 777 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H and Zhang Q. 2005. Rare earth, trace element characteristics of high-Mg volcanic rocks of Yixian Formation in Sihetun west Liaoning Province and its apocalypse. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 23(6): 736 - 741 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 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 HF, Sun M, Zhou MF and Fan WM. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geological Magazine*, 141: 55 - 62
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH and Zhou MF, Fan WM, Zheng JP. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 4373 - 4387
- Zhang M, Zhou XH, Zhang JB. 1998. Nature of the lithospheric mantle beneath NE China: evidence from potassic volcanic rocks and mantle xenoliths. In *Mantle dynamics and plate interactions in east Asia* (eds. Flower MFJ, Chung SL, Lo CH, Lee TY.), pp. 197 - 219. American Geophysical Union, *Geodynamics Series* 27
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. 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 ZC, Li ZN, Wang FB and Zhang ZM. 1994. Essential characteristics of volcanic rocks and discussion on their genesis in Yixian basain, western Liaoning. *Geoscience*, 8(4): 441 - 451 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZH. 2004. Jehol Biota (A world-class fossil treasure house for exploring the Mesozoic life evolution. *Science Technology and engineering*, 4(2): 143 - 151 (in Chinese with English abstract)
- Zhu RX, Pan YX, Shi RP, Liu QS and Li DM. 2007. Paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraints on the age of the Jehol Biota and the duration of deposition of the Sihetun fossil-bearing lake sediments, northeastern China. *Cretaceous Research*, 28: 171 - 176
- Zou HB, Zindler A, Xu XS and Qi Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171: 33 - 47
- 陈树旺, 金成洙, 张允平, 张立东, 郭胜哲. 2005. 论辽西四合屯地区早白垩世构造-火山活动及生物事件. *地球学报*, 26(3): 241 - 248
- 李铁明, 沈正康, 徐杰, 万永革. 2007. 华北地区 $\text{MS} \geq 6.5$ 级地震震源断层参数的研究. *地球物理学进展*, 22(1): 95 - 103
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 章大港. 2001. 辽西早白垩世义县组火山岩的起源及壳幔相互作用. *矿物岩石*, 21(4): 1 - 6
- 李伍平, 李献华, 路凤香, 周瑶琪, 章大港. 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*, 28(2): 193 - 2004
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 彭艳东, 张立东, 张长捷, 郭胜哲, 邢德和, 贾斌, 陈树旺, 丁秋红. 2003. 辽西义县旋回火山岩的稀土元素特征. *西北地质*, 36(2): 35 - 42
- 彭艳东, 张立东, 张长捷, 郭胜哲, 邢德和, 贾斌, 陈树旺, 丁秋红. 2004. 辽西北票-义县地区义县旋回火山岩的岩石地球化学特征. *中国地质*, 31(4): 356 - 364
- 史卜庆, 吴智平, 周瑶琪, 章大港, 许秀才. 1998. 辽西地区中生代义县旋回火山活动特征分析. *高校地质学报*, 4(4): 413 - 422
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 杨进辉. 2006a. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义. *岩石学报*, 21(6): 1547 - 1558
- 邵济安, 陈福坤, 路凤香, 周新华. 2006b. 辽西中生代软流圈底辟体的脉动式上涌. *地球科学*, 31(6): 807 - 816
- 邵济安, 张宏福, 柳小明, 李之彤. 2007. 华北北缘早中生代岩浆底侵作用的年代学记录: 来自辽西晚中生代安山岩锆石 U-Pb 定年结果. *自然科学进展*, 17(5): 609 - 613
- 邢德和, 孙春林, 孙跃武, 张立东, 彭艳东, 陈树旺. 2005. 义县组研究的新认识. *地球学报*, 26(1): 25 - 30
- 张宏, 柳小明, 李之彤, 杨芳林, 王晓蕊. 2005. 辽西阜新-义县盆地及附近地区早白垩世地壳大规模减薄及成因探讨. *地质论评*, 51(7): 360 - 372
- 张宏, 王五力, 李之彤, 杨芳林. 2004. 辽西北票和义县地区义县组综合对比研究. *地质通报*, 23(8): 766 - 777
- 张宏, 张旗. 2005. 辽西北票四合屯地区义县组高镁火山岩的稀土、微量元素特征及启示. *中国稀土学报*, 23(6): 736 - 741
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 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
- 张招崇, 李兆鼎, 王富宝, 张仲明. 1994. 辽西义县盆地火山岩的基本特征及其成因探讨. *现代地质*, 8(4): 441 - 451
- 周中和. 2004. 热河生物群(探索中生代生命演化的世界级化石宝库). *科学技术与工程*, 4(2): 143 - 151

附中文参考文献

- 陈树旺, 张立东, 郭胜哲, 张长捷, 彭艳东, 贾斌, 邢德和, 丁秋红, 郑月娟. 2001. 辽西义县组基性、中基性火山岩内沉凝灰岩层的发现及其意义. *辽宁地质*, 18(1): 52 - 57