

## 义县组主期中酸性岩墙与熔岩地球化学特征及其地质意义

李永飞, 李之彤, 杨芳林, 张立君, 陈树旺

(沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034)

**摘 要** 对义县组主期中酸性岩墙与熔岩的地球化学、成因岩石学对比分析显示:中酸性岩墙  $Mg^\#$  平均 36.68%,  $Na_2O/K_2O$  平均为 1.07, 微量元素标准化配分图表现出富集 Rb、Ba、K 大离子亲石元素, 亏损 Sr 及高场强元素 Nb、Ta、P、Ti, 稀土元素标准化配分图上表现出负 Eu 异常, HREE 强烈分异,  $Y/Yb$  平均 10.10,  $(Ho/Yb)_N$  平均 1.13, LREE 配分曲线与熔岩 LREE 配分曲线重合。中性、中基性熔岩  $Mg^\#$  平均大于 55%, 除无 Sr 负异常外, 微量元素标准化配分图与岩墙相似;中性、中基性熔岩稀土元素标准化配分曲线相互平行, 并且配分高低与  $SiO_2$  含量呈反相关关系, 说明二者是部分熔融的非同源岩浆发生混合作用的产物;中性、中基性熔岩  $Y/Yb$  分别平均为 11.27、11.98,  $(Ho/Yb)_N$  分别平均为 1.25、1.32, Sr 大于  $400 \times 10^{-6}$ , Sr/Y 均大于 40, 显示出了典型埃达克岩地球化学特征。地球化学特征表明中酸性岩墙与火山熔岩来自不同源区, 前者来源于斜长石稳定的加厚角闪石麻粒岩地壳部分熔融, 而后者来源于受幔源岩浆底侵并且混染过的加厚石榴石麻粒岩相下地壳部分熔融, 并且岩墙母岩浆、熔岩岩浆与幔源底侵岩浆在形成过程中可能发生过不同比例的混合作用。结合义县组最底部高  $Mg^\#$  幔源玄武岩岩浆成因机制, 主期中酸性岩墙与熔岩岩浆形成机制揭示了早白垩世期间华北板块壳-幔之间岩浆动力学过程。

**关键词** 义县组; 中酸性岩墙; 中性熔岩; 中基性熔岩; 地球化学; 岩浆混合; 岩浆成因

## GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GEOLOGICAL IMPLICATION OF THE ACIDIC-INTERMEDIATE DYKE AND LAVA OF THE MAJOR CYCLE OF YIXIAN FORMATION

LI Yong-fei, LI Zhi-tong, YANG Fang-lin, ZHANG Li-jun, CHEN Shu-wang

(Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, China)

**Abstract** : The geochemistry and petrogenesis of the acidic-intermediate dyke and lava of the second cycle of Yixian formation are studied. The result shows that, the dykes have an average  $Mg^\#$  value of 36.68, with average  $Na_2O/K_2O = 1.07$ . In trace element spider diagram, the dykes are characterized by enriched Rb, Ba and K and depleted Nb, Ta, P, Ti and Sr. In addition, the rocks present a pronounced negative Eu anomaly, overlapped LREE pattern with that of lava and a strong fractionation in HREE in chondrite-normalized REE pattern, with an average  $Y/Yb$  ratio of 10.1 and  $(Ho/Yb)_N = 1.13$ . For the intermediate and intermediate-basic lava, the average  $Mg^\#$  is more than 55. Except for absence of significant Sr and Eu anomalies, the rocks have a close affinity to the dykes with respect to trace element spider diagram. Especially for the following characteristics: parallel LREE patterns and apparently negative correlation with their  $SiO_2$  contents in the chondrite-normalized REE patterns, which can be explained by the mixing of two heterogeneous end-members. Moreover, the intermediate and intermediate-basic lava show a typical adakitic feature, with average  $Y/Yb$  ratios of 11.27 and 11.98, and  $(Ho/Yb)_N$  of 1.25 and 1.32, respectively, as well as  $Sr > 400 \times 10^{-6}$ ,  $Sr/Y > 40$ . On a whole, the geochemical features of the dykes and lava suggest that the former are most likely generated from the melting of thickened amphibole-granulite-facies continental crust; whereas the latter, derived from the melting of thickened garnet-granulite-facies lower continental crust and contaminated subsequently by the mantle-derived basic magmas. Combined with the genesis for the high  $Mg^\#$

收稿日期 2011-03-11, 修回日期 2011-03-31, 编辑 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“古亚洋洋构造体制与滨太平洋洋构造体制叠加转变综合调查和研究”(基[2010]矿评 01-19-01)资助。

作者简介: 李永飞(1980—), 男, 硕士, 主要从事岩石大地构造与岩石地球化学工作, 通信地址 沈阳市黄河北大街 1 号, E-mail/geology198086@163.com

basalt from the bottom of Yixian formation, the magmatic mechanism for the dykes and lava may signify a dynamic magmatic interaction process between the lower continental crust and mantle in North China Craton during Early Cretaceous.

**Key words** : Yixian formation; acidic-intermediate dyke; intermediate lava; intermediate-basic lava; geochemistry; magma mixing; petrogenesis

燕辽地区自燕山运动以来, 由于受到西伯利亚板块与欧亚板块碰撞及太平洋板块俯冲作用的影响<sup>[1-5]</sup>, 该区发生了大规模的构造变形和频繁的岩浆活动. 在早侏罗世—早白垩世期间, 岩浆喷发活动主要以兴隆沟、髫髻山、张家口、义县这4个火山旋回为代表. 就岩浆活动规模而言, 义县旋回代表了该地区中生代最强烈的一次岩浆活动, 从而引起不同学者对该组火山岩的深入研究<sup>[6-15]</sup>. 值得注意的是, 在对义县组火山岩进行的过程中, 很少涉及到该组以潜火山相产出的中酸性岩墙. 这些中酸性岩墙作为同岩浆事件侵位的产物, 代表了岩浆从地壳深处/地幔上升到地表的通道, 不仅提供了有关壳幔演化的重要信息, 而且有助于恢复岩浆侵位时的构造环境. 因此, 将其与火山熔岩联系起来系统分析, 对认识大地构造属性和岩浆动力学机制必将有所帮助.

本文选择辽西义县组主期中酸性岩墙与熔岩为研究对象, 通过详细的地球化学及成因岩石学的研究, 探讨火山岩的源区性质及构造背景, 并为燕辽地区中生代岩石圈壳幔相互作用提供基本约束.

## 1 义县组火山旋回划分

义县组火山岩主要分布在辽西义县盆地和金羊盆地内, 其中以义县马神庙—宋八户地区的义县组发育最完全, 各火山亚旋回的火山岩层次分明, 岩性差异明显, 厚度也较大, 并且被延伸较稳定的沉积层分开, 所以, 前人均选择此剖面为义县组标准剖面<sup>[6, 10-11]</sup>. 义县火山旋回是一个从基性—中基性—中性到酸性火山岩完整喷发旋回. 王五力等<sup>[10-11]</sup>将其划分为4个亚旋回: 第1亚旋回(初始期), 主要由玄武岩, 玄武安山岩及3个沉积夹层组成; 第2亚旋回(主期)为主要喷发期, 主要由玄武安山岩和安山岩为组成, 其中发育众多呈筒状的安山—玄武安山质集块角砾(熔)岩及安山质岩墙群; 第3亚旋回(晚期)主要为安山岩系, 有2个沉积夹层, 有侵入相的安山玢岩体; 第4亚旋回(末期), 主要由中酸性火山岩组成, 底部为沉积层, 顶部为黄花山火山角砾岩.

义县马神庙—宋八户标准剖面在砖城子村南山—三百垄附近, 为义县火山岩主期, 主要发育大量的火山熔岩、火山角砾岩及以潜火山岩相产出的中酸性岩墙. 其中在岭底下村南附近, 出露5条中酸性岩墙, 在其南部

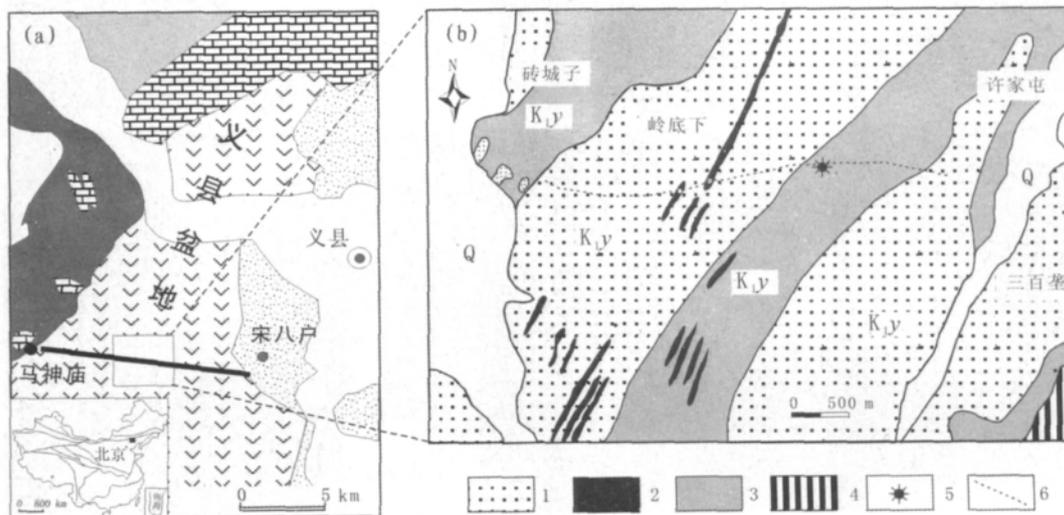


图1 义县组主期标准地层剖面地质略图

(a 据文献[12], b 据文献[11]修改)

Fig. 1 Geologic sketch map of the second cycle of Yixian volcanic formation

(a: modified from Reference [12]; b: modified from Reference [11])

1—火山熔岩(含集块角砾岩筒)(volcanic lava, including agglomeratic breccia lava pipe); 2—中酸性岩墙(volcanic dyke); 3—火山角砾岩(volcanic breccia); 4—安山质角砾熔岩(andesitic breccia lava); 5—火山口(volcanic crater); 6—剖面线(section line)

刘龙沟 - 大定堡一带, 出露有几十条. 岩墙呈北东向断续展布, 穿切第二旋回, 规模大小不等(图 1), 与其他旋回呈圆、弧形产出的火山玢岩形态明显不同.

## 2 中酸性岩墙与熔岩岩石学特征

中酸性岩墙呈灰绿色、灰黑色, 致密块状, 少斑结构. 斑晶占 3%~5%, 主要由自形一半自形板条状拉长石、单斜辉石、斜方辉石构成. 其中拉长石明显发育卡钠复合双晶, 并且部分被溶蚀(图 2b); 单斜辉石呈自形一半自形短柱状, 边部被溶蚀成港湾状(图 2a); 斜方辉石呈自形短柱状, 偶见包橄结构, 并且可见中心橄榄石的反应边结构(图 2c). 基质呈交织结构, 少量为玻晶交织结构. 火山熔岩多为玄武安山岩类和安山岩类, 其中玄武安山岩类呈灰黑、浅紫灰色, 块状、杏仁状构造, 斑晶占 5%~10%, 主要为斜长石、单斜辉石、微量橄榄石、钾长石. 斜长石呈板条状, 辉石以普通辉石为主. 基质以交织结构为主, 个别呈玻晶交织结构, 主要由拉—中长石微晶及单斜辉石微晶组成. 安山岩类

主要呈灰色、灰褐色, 局部气孔发育. 岩石呈少斑结构, 斑晶约占 3%, 主要由斜长石、单斜辉石及以微弱蛇纹石化橄榄石组成. 基质呈交织结构, 主要由板条状中长石及少量镁铁矿物微粒组成.

## 3 主量元素地球化学特征

中酸性岩墙与中性、中基性熔岩主量与微量元素分析结果见表 1. 中酸性岩墙  $\text{SiO}_2$  含量为 60.89%~61.49%, 平均为 61.20%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在 16.11%~17.10% 之间变化;  $\text{MgO}$  为 1.14%~1.58%;  $\text{Mg}^\#$  为 33.69~40.54, 平均为 36.68;  $\text{Na}_2\text{O}$  为 4.85%~5.23%;  $\text{K}_2\text{O}$  为 4.26%~5.18%;  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  平均为 1.07. 中性熔岩  $\text{SiO}_2$  为 54.60%~63.68%, 平均 58.67%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  平均为 15.57%;  $\text{MgO}$  变化范围较大, 在 0.98%~5.56% 之间; 除样品 P80-4 外,  $\text{Mg}^\#$  介于 45.05~63.43 之间, 平均为 55.32;  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  大部分介于 1.1~1.5 之间. 中基性熔岩  $\text{SiO}_2$  为 46.12%~53.52%, 平均为 50.32%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 11.02%~17.21%;  $\text{MgO}$  在 3.47%~9.08% 之间变化, 平均为 5.72%;  $\text{Mg}^\#$  介于

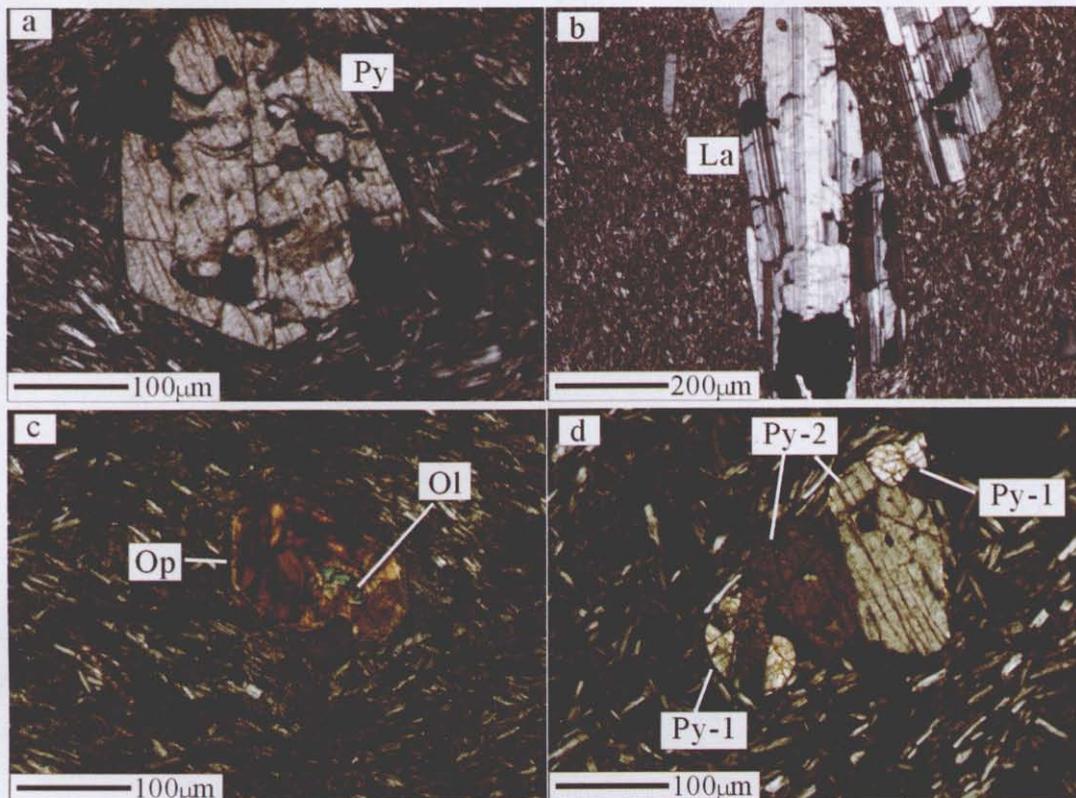


图 2 中酸性岩墙显微镜下结构与矿物组成

Fig. 2 Texture and mineral assemblage of the acidic-intermediate dyke under the microscope

a、b、c 来自样品 P63-2; d 来自样品 P64-1. a—自形单斜辉石边部被溶蚀成港湾状; b—拉长石卡钠复合双晶, 边部与中心被溶蚀; c—自形斜方辉石中心见橄榄石(包橄结构), 同时见橄榄石的反应边结构; d—早期形成的它形单斜辉石被后期形成的半自形单斜辉石(简单双晶)“继承”; Cpy—单斜辉石(clinopyroxene); Cpy1—早期单斜辉石(early-stage clinopyroxene); Cpy2—晚期单斜辉石(late-stage clinopyroxene); La—拉长石(labradorite); Opy—斜方辉石(orthopyroxene); Ol—橄榄石(olivine)

表 1 义县组主期中酸性岩墙与熔岩主量元素和微量元素分析结果  
Table 1 Analysis results of major and trace elements for the studied rocks

样品号	P63-2	P63-3	P63-4	P64-1	P60	P64	P73	P75	P78-3	P-43	P49-2	P56	P69	P77	P80-4	P50-7	P68	P71
类型	中酸性岩墙				中性熔岩										中基性熔岩			
岩性	粗面岩				粗安岩	安山岩	粗面岩	粗面岩	粗面岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	玄武粗安岩	玄武粗安岩
SiO <sub>2</sub>	60.89	61.49	61.34	61.08	57.20	56.75	63.68	63.55	62.11	54.60	57.94	58.00	55.59	56.76	59.14	53.52	52.21	53.38
TiO <sub>2</sub>	1.25	1.06	1.25	1.12	0.92	1.00	0.67	0.67	0.85	1.27	1.62	1.25	1.16	1.14	1.52	1.39	1.49	1.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.11	16.81	17.10	16.32	15.68	15.11	15.69	15.17	15.59	15.13	15.17	15.94	15.49	14.48	17.84	17.21	15.57	16.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	5.48	5.23	4.86	5.40	7.11	7.47	4.83	5.13	5.40	7.08	6.29	6.39	7.89	7.26	5.48	6.73	10.69	8.35
MnO	0.08	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.05	0.06	0.06	0.07	0.25	0.07	0.09	0.14	0.06	0.30	0.12	0.11
MgO	1.32	1.14	1.20	1.58	5.09	5.56	2.06	2.18	1.90	4.53	3.24	3.79	4.11	4.72	0.98	4.88	3.90	3.47
CaO	3.48	2.63	2.61	3.47	5.89	6.25	3.22	3.39	3.64	6.29	5.29	5.17	5.29	6.18	4.58	6.32	6.04	5.71
Na <sub>2</sub> O	5.02	5.23	4.89	4.85	3.98	3.56	4.41	4.29	4.18	4.23	3.96	3.58	4.18	3.89	4.53	4.20	3.99	4.04
K <sub>2</sub> O	4.48	4.78	5.18	4.26	2.56	1.92	3.55	3.55	3.51	2.84	3.56	3.04	3.18	2.61	3.38	3.10	2.66	3.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.51	0.29	0.51	0.37	0.32	0.25	0.46	0.46	0.44	0.73	1.13	0.76	0.86	0.60	0.63	0.57	0.88	0.87
LOI	1.04	1.33	1.06	1.44	1.44	2.09	1.41	1.23	1.76	2.20	0.85	1.81	2.02	1.69	1.35	1.76	2.31	3.16
Total	99.66	100.10	100.10	99.99	100.30	100.07	100.03	99.68	99.44	98.50	98.90	99.67	101.04	100.83	100.71	99.87	101.00	101.18
SiO <sub>2</sub> <sup>*</sup>	61.98	62.48	62.15	62.21	58.17	58.26	64.79	64.78	63.83	56.73	59.13	59.48	57.16	58.37	60.51	54.78	53.97	55.30
Na <sub>2</sub> O <sup>*</sup>	5.11	5.31	4.95	4.94	4.05	3.66	4.49	4.37	4.30	4.40	4.04	3.67	4.30	4.00	4.64	4.30	4.13	4.19
K <sub>2</sub> O <sup>*</sup>	4.56	4.86	5.25	4.34	2.60	1.97	3.61	3.62	3.61	2.95	3.63	3.12	3.27	2.68	3.46	3.17	2.75	3.29
Cr	5.90	5.30	4.20	37.10	200.20	224.80	74.90	71.10	3.90	219.90	186.90	231.90	95.60	261.10	1.80	205.10	125.10	103.20
Ni	4.70	3.70	5.70	22.70	109.40	128.90	45.10	40.50	7.80	136.40	169.30	123.40	56.20	140.58	6.60	95.40	56.50	56.60
Co	7.90	5.10	6.90	10.20	27.40	28.90	11.70	10.60	10.40	32.00	24.80	23.90	21.10	21.30	16.60	26.50	25.60	22.00
U	2.55	2.89	2.46	2.36	1.08	0.95	1.14	1.01	1.27	0.61	0.79	1.05	0.84	0.96	2.91	0.43	0.62	0.60
Th	13.84	15.44	13.53	12.65	6.29	5.17	5.45	5.06	6.59	3.41	3.67	4.86	4.85	4.29	9.78	3.71	3.98	5.27
Pb	20.80	23.50	20.20	20.70	15.30	13.90	16.70	15.60	14.30	21.02	10.40	13.20	10.90	6.60	14.80	11.10	11.10	14.00
Rb	145.90	107.60	164.90	134.90	78.10	37.30	96.50	91.90	97.80	40.60	58.10	75.60	75.70	79.30	99.80	73.50	32.20	48.70
Sr	509.20	445.10	440.00	470.50	783.20	642.50	787.40	756.70	788.20	961.60	694.60	829.10	988.90	855.80	808.30	1189.10	1003.60	1257.00
Ba	1465.70	1845.80	1211.50	396.80	1010.20	958.70	1343.00	1289.20	1247.40	964.30	897.80	1046.00	1071.80	944.90	1271.00	1385.70	953.40	1609.20
Nb	46.78	51.96	46.28	41.66	11.29	12.08	14.68	13.51	15.04	13.14	13.33	17.04	15.20	20.97	32.06	22.11	12.74	15.42
Ta	2.85	3.20	2.86	2.54	0.69	0.78	0.84	0.77	0.93	0.65	0.79	1.04	0.77	1.27	2.04	1.25	0.63	0.85
Zr	499.0	579.5	495.6	457.9	190.6	168.6	332.0	299.0	247.1	187.4	168.7	224.1	244.4	260.1	381.8	182.6	189.0	245.6
Hf	12.66	14.39	12.54	11.57	4.83	4.33	7.04	6.28	5.42	4.69	4.17	5.54	5.64	5.65	8.72	5.63	4.81	6.16
Y	34.29	35.39	32.02	30.81	16.25	15.65	12.94	12.40	14.26	18.39	16.89	17.84	18.22	16.84	29.23	22.51	20.63	20.99
La	84.17	79.53	83.08	73.23	41.10	31.77	56.12	53.51	52.32	43.59	35.52	39.09	66.26	51.18	64.41	69.26	55.58	74.83
Ce	160.25	165.79	157.81	139.65	76.62	59.97	102.92	97.22	101.78	89.14	65.90	80.72	124.03	100.62	126.05	144.61	110.68	140.62
Pr	18.96	17.18	18.60	16.27	9.33	6.97	11.78	11.18	11.48	10.91	8.55	9.92	14.62	12.16	15.68	17.88	13.35	16.34
Nd	71.85	65.36	70.73	60.50	36.62	27.66	41.49	39.39	41.54	44.78	34.01	40.16	55.79	44.90	59.76	70.77	53.63	62.94
Sm	11.35	10.50	11.20	9.54	5.81	4.60	6.00	5.64	6.25	7.17	5.62	6.62	8.17	6.88	10.02	10.07	8.28	9.06
Eu	2.83	2.34	2.82	2.34	1.57	1.32	1.43	1.35	1.53	2.03	1.60	1.89	2.21	1.84	2.59	2.64	2.29	2.44
Gd	8.73	8.26	8.49	7.57	4.56	4.08	3.97	3.74	4.25	5.47	4.62	5.25	5.71	4.83	8.03	7.06	6.11	6.56
Tb	1.30	1.26	1.28	1.13	0.65	0.58	0.55	0.52	0.59	0.73	0.65	0.73	0.77	0.70	1.18	0.94	0.88	0.88
Dy	6.96	6.91	6.80	6.17	3.37	3.17	2.71	2.57	2.90	3.79	3.33	3.78	3.82	3.53	6.27	4.68	4.20	4.32
Ho	1.30	1.28	1.24	1.10	0.61	0.59	0.47	0.44	0.51	0.68	0.60	0.68	0.67	0.63	1.11	0.80	0.74	0.75
Er	3.39	3.45	3.22	3.03	1.64	1.53	1.25	1.18	1.38	1.74	1.55	1.76	1.73	1.67	2.91	2.16	1.91	1.96
Tm	0.51	0.55	0.50	0.46	0.23	0.23	0.17	0.17	0.19	0.26	0.23	0.25	0.25	0.24	0.44	0.30	0.28	0.28
Yb	3.40	3.52	3.18	3.02	1.52	1.49	1.10	1.06	1.18	1.63	1.49	1.66	1.59	1.48	2.64	1.90	1.75	1.75
Lu	0.51	0.54	0.46	0.47	0.22	0.23	0.18	0.17	0.19	0.24	0.21	0.25	0.24	0.24	0.42	0.29	0.26	0.26
Eu/Eu <sup>*</sup>	0.87	0.77	0.88	0.84	0.93	0.93	0.90	0.90	0.91	0.99	0.96	0.98	0.99	0.98	0.88	0.96	0.98	0.97
Mg <sup>#</sup>	36.0	33.7	36.5	40.5	62.5	63.4	49.8	49.8	45.1	59.9	54.6	58.0	54.8	60.2	29.4	62.8	46.0	49.2
(La/Yb) <sub>n</sub>	17.8	16.2	18.7	17.4	19.4	15.3	36.6	36.2	31.8	19.2	17.1	16.9	29.9	24.8	17.5	26.1	22.8	30.7
REE	376	366	369	324	184	144	230	218	226	212	164	193	286	231	302	333	260	323
LREE	349.41	340.70	344.24	301.53	171.05	132.29	219.74	208.29	214.90	197.62	151.20	178.40	271.08	217.58	278.51	315.23	243.81	306.23
HREE	26.10	25.77	25.17	22.95	12.80	11.90	10.40	9.85	11.19	14.54	12.68	14.36	14.78	13.32	23.00	18.13	16.13	16.76
L/H	13.4	13.2	13.7	13.1	13.4	11.1	21.1	21.1	19.2	13.6	11.9	12.4	18.3	16.3	12.1	17.4	15.1	18.3
Y/Yb	10.1	10.1	10.1	10.2	10.7	10.5	11.8	11.7	12.1	11.3	11.3	10.7	11.5	11.4	11.1	11.8	11.8	12.0
(Ho/Yb) <sub>n</sub>	1.15	1.09	1.17	1.09	1.21	1.19	1.28	1.25	1.30	1.25	1.21	1.23	1.27	1.28	1.26	1.26	1.27	1.29

注: 主量、微量元素数据分别由中国科学院广州地球化学研究所实验室 ICP-AES 方法与 ICP-MS 方法测定(2004), SiO<sub>2</sub><sup>\*</sup>、Na<sub>2</sub>O<sup>\*</sup>、K<sub>2</sub>O<sup>\*</sup> 由 SINCLAS 程序去水归一化后(据文献[20])计算生成, Mg<sup>#</sup> 由 Geoplot 程序计算(据文献[21]), Eu/Eu<sup>\*</sup> = Eu<sub>n</sub> / (Sm<sub>n</sub> · Dy<sub>n</sub>)<sup>0.5</sup>, L/H = LREE/HREE

45.95~63.99 之间,平均为 56.59,  $Na_2O/K_2O=1.5\sim 1.9$ , 平均 1.48. 火成岩在利用  $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$  分类命名时, 首先应该进行主量元素去水归一化 [16-19]. 运用 SINCLAS 程序 [20] 去水归一化处理后, 在  $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$  (图 3a) 与  $SiO_2-K_2O$  图解(图 3b)上, 中酸性岩墙与熔岩呈不同的岩浆系列. 中酸性岩墙为钾玄武岩系列粗面岩, 中性熔岩主要为高钾钙碱性系列粗安岩, 而中基性熔岩主要为玄武粗安岩.

4 稀土与微量元素地球化学特征

中酸性岩墙稀土含量较高,  $\Sigma REE=(324.5\sim 375.5)\times 10^{-6}$ , 平均为  $359\times 10^{-6}$ , 轻重稀土高度分异,

$(La/Yb)_N=16.20\sim 17.80$ , 平均为 17.50;  $Yb=(3.02\sim 3.52)\times 10^{-6}$ .  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$  值介于 13.14~13.68 之间, 平均为 13.36.  $\Sigma HREE$  值介于  $(23.0\sim 26.1)\times 10^{-6}$ , 平均值为  $25\times 10^{-6}$ .  $Y/Yb$  平均值 10.10.  $(Ho/Yb)_N$  平均值为 1.13.  $Eu/Eu^*=0.77\sim 0.88$ , 具有负 Eu 异常. 中性熔岩稀土含量中等,  $\Sigma REE$  在  $(144.19\sim 301.51)\times 10^{-6}$ , 平均为  $217.23\times 10^{-6}$ .  $\Sigma LREE$  值介于  $(132.29\sim 278.51)\times 10^{-6}$ .  $\Sigma HREE$  值介于  $(9.85\sim 23.00)\times 10^{-6}$ , 平均值为  $13.53\times 10^{-6}$ . 轻重稀土分异强烈(图 4a),  $(La/Yb)_N$  介于 15.29~36.60 之间, 平均值为 24.06,  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$  平均值为 15.52.  $(Ho/Yb)_N$  变化小, 平均值为 1.25.  $Eu/Eu^*$  平均为 0.94, 几乎无 Eu 异常.

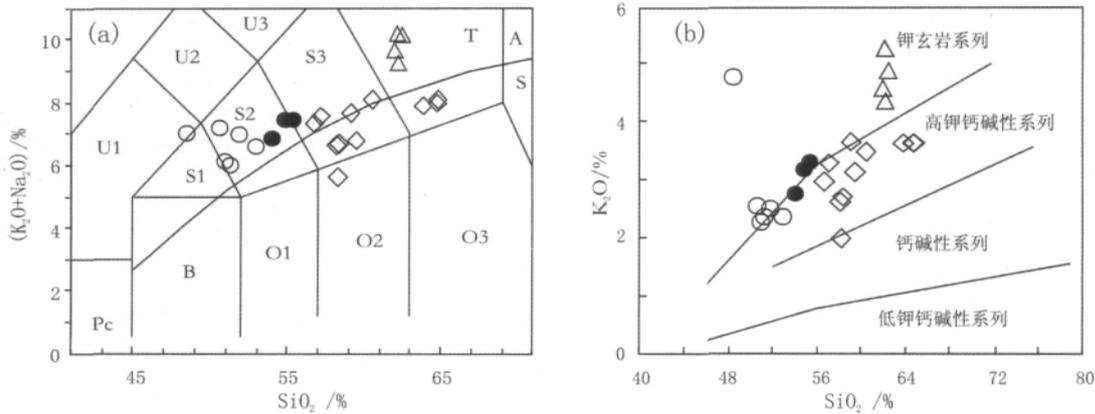


图 3 火山岩 TAS 分类命名图解(a)与  $SiO_2-K_2O$  图解(b)  
Fig. 3 Diagrams of  $SiO_2$  vs.  $K_2O+Na_2O$  (a) and  $SiO_2$  vs.  $K_2O$  (b)

1—中酸性岩墙(acidic-intermediate dyke); 2—中性熔岩(intermediate lava); 3, 4—中基性熔岩(其中 3 引自文献[12])(intermediate-basic lava); A—碱性系列(alkaline series); S—亚碱性系列(sub-alkaline series); U1—碱玄武岩( $Ol<10\%$ )(tephrite), 碧玄武岩( $Ol>10\%$ )(basanite); U2—响岩质碱玄武岩(phonolitic tephrite); U3—碱玄质响岩(tephritic phonolite); S1—粗面玄武岩(trachybasalt); S2—玄武粗安岩(basaltic trachyandesite); S3—安粗岩(latite); T—粗面岩( $q<20\%$ ), 粗面英安岩( $q>20\%$ )(trachyte/trachydacite); Pc—苦橄玄武岩(picritic basalt); B—玄武岩(basalt); O1—玄武安山岩(basaltic andesite); O2—安山岩(andesite); O3—英安岩(dacite)

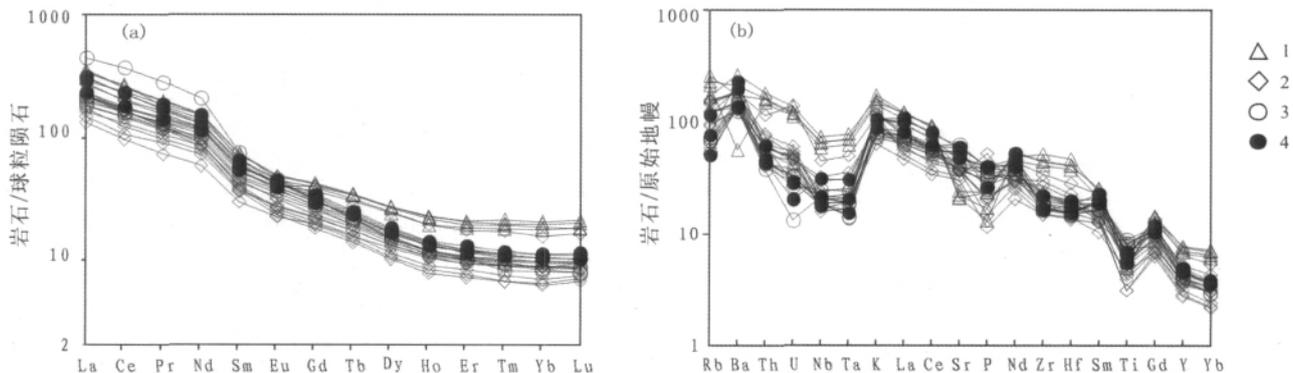


图 4 中酸性岩墙与中性、中基性熔岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)与不相容元素原始地幔标准化配分图(b)

Fig. 4 REE chondrite-normalized distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b)

1—中酸性岩墙(acidic-intermediate dyke); 2—中性熔岩(intermediate lava); 3, 4—中基性熔岩(intermediate-basic lava)(其中 3 引自文献[12]; 球粒陨石与原始地幔标准化值引自文献[22])

Y/Yb 平均值 11.27. 中基性熔岩稀土含量偏高,  $\Sigma \text{REE} = (219.17 \sim 487.01) \times 10^{-6}$ .  $\Sigma \text{LREE}$  值介于  $(203.41 \sim 471.87) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $273.70 \times 10^{-6}$ .  $\Sigma \text{HREE}$  平均值为  $16.27 \times 10^{-6}$ . 轻重稀土分异强烈(图 4a),  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  介于 17.86~55.48 之间, 平均值为 26.94.  $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$  平均值为 16.93.  $(\text{Ho}/\text{Yb})_N$  平均值为 1.32.  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  介于 0.95~1.03 之间, 平均为 0.99, 无 Eu 异常. Y/Yb 平均值 11.98.

综上所述, 中酸性岩墙与中性、中基性熔岩稀土配分图均表现为右倾型, 岩墙稀土配分图 LREE 与中性、中基性熔岩的 LREE 重合, 具有负 Eu 异常并具有平坦的 HREE 分配模式; 中性、中基性熔岩基本无 Eu 异常, 具有较倾斜的 HREE 分配模式; 在微量元素配分图上(图 4b), 除岩墙样品表现出明显的负 Sr 和正 Zr、Hf 异常外, 中酸性岩墙与中性、中基性熔岩配分模式相似, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti.

## 5 岩浆成因讨论

在 Harker 图解上(略), 中酸性岩墙与中性、中基性熔岩具有明显的成分连续和相同演化趋势, 且二者具有不同的  $\text{Mg}^\#$ 、Cr、Co、Ni 含量(表 1), 但岩墙是否为熔岩分离结晶的产物, 还需微量元素指标判定. 由于岩浆在分离结晶作用中, 随着超亲岩浆元素的富集, 亲岩浆元素的丰度几乎同步增长, 因此 Zr/Sm 基本保持为一常数; 相反, 在平衡部分熔融过程中, 随着 Zr 快速进入熔体, Sm 也会在熔体中富集, 但其增长速度要慢, 这是因为 Zr 的不相容性更强<sup>[23-24]</sup>. 因此, 可以根据 Zr-

(Zr/Sm) 图解来判断岩浆岩的成因. 图 5a 说明岩石是部分熔融形成而未经过明显的结晶分异作用. 微量元素标准化配分图(图 4b)上, 相对于熔岩的 Zr、Hf 无(负)异常, 岩墙表现出不同程度 Zr、Hf 正异常. 另外, 岩墙和熔岩  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值与  $\text{SiO}_2$  含量并无线性相关关系(图 5b). 值得注意的是, 在稀土元素标准化配分图上, 中性、中基性熔岩配分曲线相互平行, 并且曲线配分高低与  $\text{SiO}_2$  含量具有明显的反相关关系(图 4a), 说明中性与中基性岩浆是部分熔融的非同源岩浆, 并且二者相互发生过混合作用<sup>[25]</sup>. 因此, 对于中酸性岩墙 LREE 配分曲线与熔岩 LREE 重合这一特征, 则可能是非同源岩浆小程度混合作用所致. 实际上, 中酸性岩墙在显微镜下, 斜方辉石具有包橄结构, 并且中心橄榄石具有反应边结构(图 2c), 早期单斜辉石被后期单斜辉石简单双晶所“继承”(图 2d)这些特征, 也是非同源岩浆混合作用的微观佐证. 以上地球化学特征说明, 中酸性岩墙可能是部分熔融形成而并未经过明显的结晶分异作用. 因此, 岩石的地球化学特征可以反演其源区特征.

中性、中基性熔岩在化学成分上具有与埃达克岩相似的地球化学性质, 主要表现为: 大部分样品  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ , 富集 LILE 和 LREE, 无负 Eu 异常, 亏损 HREE 和 Y, REE 强烈分异,  $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sr}/\text{Y} > 40$ (图 6a). 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$  图解(图 6b)中, 中酸性岩墙位于角闪岩-榴辉岩熔体与安第斯火山岩带(AVZ)埃达克岩范围之间; 中性熔岩位于世界典型埃达克岩范围; 中基性熔岩位于幔源岩浆遭受地壳同化混染/结晶分异的演化趋势线附近, 暗示火山熔岩可能与埃达克质岩浆成因有关. 通常, 石榴石强烈富集

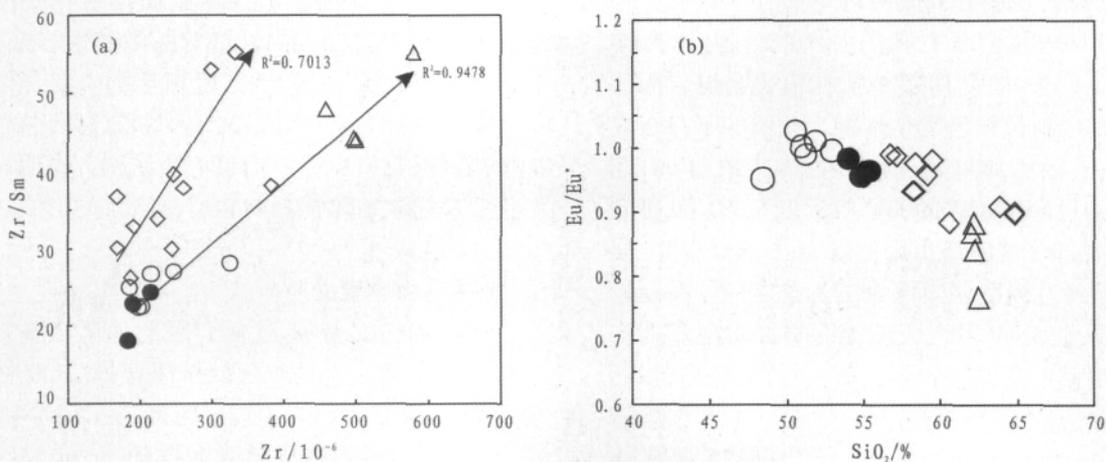
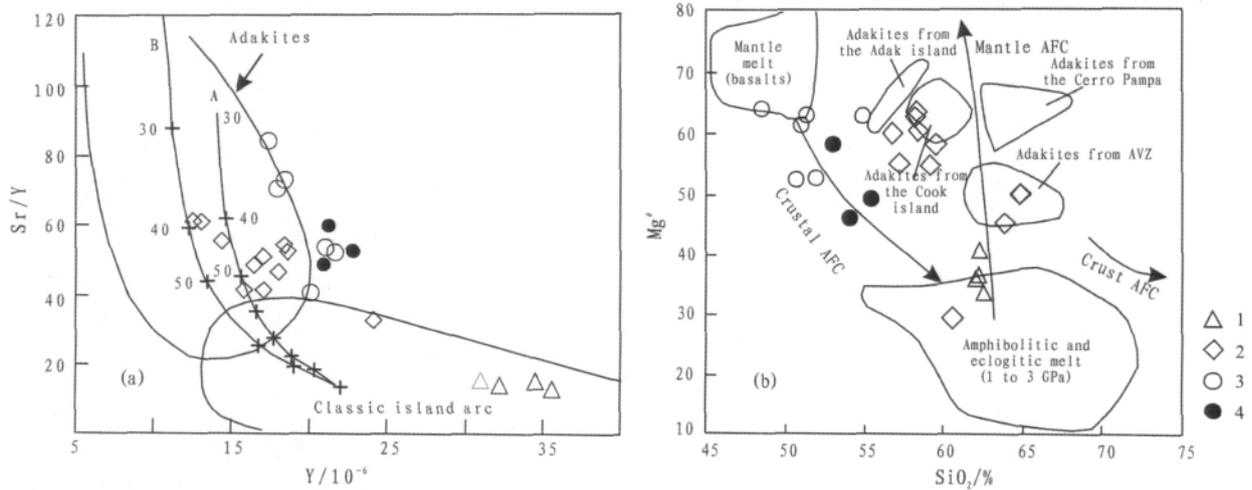


图 5 Zr-Zr/Sm 图解(a)与  $\text{SiO}_2$ - $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  图解(b)

Fig. 5 Diagram of Zr vs. Zr/Sm (a) and  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  (b)

1—中酸性岩墙(acidic-intermediate dyke); 2—中性熔岩(intermediate lava); 3、4—中基性熔岩(intermediate-basic lava)

图6 Y-Sr/Y图解(a)与SiO<sub>2</sub>-Mg<sup>#</sup>图解(b)Fig. 6 Diagram of Y vs. Sr/Y (a) and SiO<sub>2</sub> vs. Mg<sup>#</sup> (b)

1—中酸性岩墙 (acidic-intermediate dyke); 2—中性熔岩 (intermediate lava); 3, 4—中基性熔岩 (intermediate-basic lava) (a 据文献[29], 其中 A 线与 B 线据文献[30], 分别代表局部熔融达到 50% 单斜辉石+50% 石榴石和 20% 单斜辉石+80% 石榴石残留相的平衡熔体; b 据文献[31])

HREE, 而角闪石相对更富集 MREE<sup>[26]</sup>. 因此当石榴石为主要残留相时, 熔体表现为 HREE 的强烈亏损, 这时  $Y/Yb > 10$  ( $(Ho/Yb)_N > 1.2$ ), 当角闪石为主要残留相时, 熔体表现为 HREE 相对平坦 ( $Y/Yb \approx 10$  ( $(Ho/Yb)_N \approx 1$ ))<sup>[27-28]</sup>. 研究区中性、中基性熔岩  $Y/Yb$  值分别平均为 11.3、11.0 ( $> 10$ ) ( $(Ho/Yb)_N$  分别平均为 1.25、1.32 ( $> 1.2$ )), 说明其源区以石榴子石为主; 中酸性岩墙  $Y/Yb$  平均 10.1 ( $\approx 10$ ) ( $(Ho/Yb)_N$  平均 1.13 ( $\approx 1$ )), 说明其源区残留相以角闪石为主.

在微量元素标准化配分图(图 4b)与稀土元素标准化配分图(图 4a)上, 中酸性岩墙表现出明显负 Sr 异常, 负 Eu 异常, 说明其岩浆源区可能处于斜长石相对稳定区, 且母岩浆中具有高的  $Eu^{3+}/Eu^{2+}$  比值<sup>[32]</sup>. 熔岩并无 Sr、Eu 异常, 加之其高 Sr/Y 比值表明熔岩源区岩浆形成过程中斜长石已发生熔融, 残留相不存在或很少有斜长石. 由于典型的 MORB 的  $Mg^{\#}$  约为 60, 因此由其部分熔融产生熔体的  $Mg^{\#}$  应远低于 60<sup>[33]</sup>. 研究表明<sup>[34]</sup>玄武岩部分熔融产生熔体的  $Mg^{\#} < 45$ , 因此, 高  $Mg^{\#}$  可认为是经过幔源岩浆混染的标志<sup>[35-36]</sup>. 实验岩石学研究结果也表明<sup>[37-38]</sup>, 大陆地壳局部熔融不能产生比安山岩更基性的原生岩浆, 陆壳局部熔融产物的 SiO<sub>2</sub> 含量通常应大于 56%. 另外, 中性、中基性熔岩 Sr-Nd 同位素值<sup>[12]</sup>与汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体 Sr-Nd 值( $t=125$  Ma)<sup>[39-40]</sup>, 以及华北地块中间造山带下部辉长岩 Sr-Nd 值相近<sup>[41]</sup>. 图 6a 暗示中性岩浆可能是局部熔融达到 50% 单斜辉石 + 50% 石榴石残留相的熔

体, 而中基性岩浆可能是大于 50% 单斜辉石 + 小于 50% 石榴石残留相的熔体.

由以上论述可以推断, 中酸性岩墙 (SiO<sub>2</sub> 平均为 61.20%,  $Mg^{\#}$  平均为 36.68) 母岩浆可能是由加厚下地壳局部熔融达到角闪石麻粒岩相产生的平衡熔体; 中性熔岩 (SiO<sub>2</sub> 平均为 58.62%,  $Mg^{\#}$  平均为 55.81) 与中基性熔岩 (SiO<sub>2</sub> 平均为 50.32% (未去水归一化),  $Mg^{\#}$  平均为 56.59) 可能是加厚基性下地壳受幔源岩浆底侵作用后部分熔融达到石榴石麻粒岩相产生的平衡熔体. 对于中性、中基性熔岩高  $Mg^{\#}$  且二者  $Mg^{\#}$  近乎一致的特征, 归因于软流圈底辟上涌岩浆与岩石圈地幔相互作用<sup>[14-15]</sup>, 造成高  $Mg^{\#}$  幔源玄武质熔浆在底侵加厚下地壳的过程中, 同时混染了中性、中基性岩浆 (或先混染了中基性岩浆), 随后二者相互发生混合作用的结果. 值得一提的是, 中酸性岩墙中斜方辉石包含橄榄石捕虏晶并且见有橄榄石的反应边结构, 说明高  $Mg^{\#}$  幔源玄武质熔浆也可能参与岩墙母岩浆的形成过程.

## 6 地球动力学意义

已有的研究表明, 辽西-冀北地区从晚三叠世—中侏罗世末期一直处于区域挤压背景. 从晚侏罗世到早白垩辽西地区地壳/岩石圈经历了由厚减薄的过程, 区域引力场由挤压转变为拉张<sup>[42]</sup>. 研究区砖城子火山岩年龄为 133~120 Ma<sup>[43]</sup>, 说明辽西地区正好处于岩石圈相对平静的伸展构造环境中. 综上所述, 义县组主期中酸性岩墙与火山熔岩的形成机理如下: 晚三

叠世—中侏罗世末期区域挤压而产生地壳不均匀缩短加厚至麻粒岩相,促使岩石圈地幔增厚;由于软流圈地幔的底辟上涌为岩石圈地幔熔融提供了部分需要的足够热量,二者相互作用造成高  $Mg^\#$  幔源岩浆的底侵作用,从而诱发加厚石榴石麻粒岩相下地壳(30~45 km)不同程度的局部熔融,熔融岩浆与玄武质底侵岩浆在底侵/上升过程中发生混染/混合作用,最终产生义县组主期高  $Mg^\#$  中性、中基性熔岩,高  $Mg^\#$  玄武岩岩浆与中性、中基岩浆上升至约 30 km 时,底侵加厚角闪石麻粒岩相地壳,使其发生部分熔融,并与之发生混合作用,由于岩石圈伸展拉张不均匀,熔融体在上升过程中发生冷却,最终呈北北东向岩墙形式产出;而玄武质底侵岩浆上升至地表,形成义县火山岩最底部高  $Mg^\#$  玄武岩<sup>[14]</sup>(图 7)。值得一提的是,在位于义县组之上的阜新组碱锅玄武岩中发现了少量下地壳麻粒岩捕虏体<sup>[15]</sup>,其与义县主期源自加厚麻粒岩相的中酸性岩墙/熔岩有何关系,有待进一步研究。

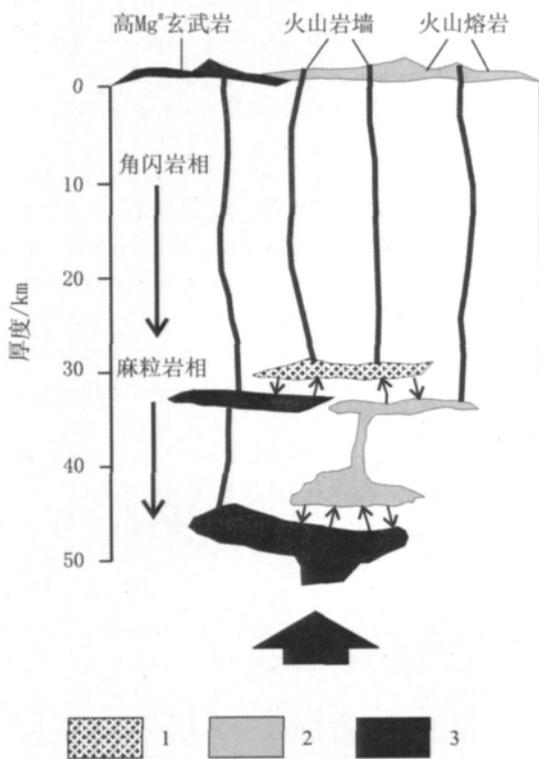


图 7 义县组主期火山岩形成模式  
(据文献[24]修改)

Fig. 7 Model for the forming of the volcanic rock of Yixian Formation  
(modified from Reference [24])

1—加厚角闪石麻粒岩相地壳部分熔融(melting of thickened amphibole-granulite-facies crust); 2—加厚石榴石麻粒岩相地壳部分熔融(melting of thickened garnet-granulite-facies crust); 3—高  $Mg^\#$  幔源底侵岩浆(high- $Mg^\#$  mantle-derived underplating magma)

因此,义县组主期中酸性岩墙与熔岩不仅可以示踪早白垩世辽西地区下地壳物质组成,而且对华北板块中生代软流圈、岩石圈和下地壳之间的壳幔岩浆相互作用过程及地球动力学过程提供基本信息。

## 7 结论

义县组主期中酸性岩墙与中性、中基性熔岩岩石学与岩石地球化学特征显示,中酸性岩墙并非中性、中基性熔岩简单结晶分异的产物,而是部分熔融的幔源岩浆、壳源岩浆不同比例相互混合的产物。

中酸性岩墙微量元素与稀土元素标准化配分图分别表现出 Sr、Eu 不同程度负异常,并且 HREE 强烈分异,指示其可能来源于斜长石稳定的加厚角闪石麻粒岩地壳部分熔融。火山熔岩  $Mg^\#$  平均大于 50, HREE 强烈分异,表现出了典型埃达克岩的地球化学特征,表明其来源于受幔源岩浆底侵并且混染过的加厚石榴石麻粒岩相下地壳的部分熔融。中性、中基性熔岩稀土元素标准化配分曲线相互平行,并且配分高低与  $SiO_2$  含量呈反相关关系,说明二者是部分熔融的非同源岩浆发生混合作用的产物。

在华北板块早白垩世期间岩石圈相对平静的伸展构造背景下,义县组主期中酸性岩墙与中性、中基性熔岩以及义县组最底部的高  $Mg^\#$  玄武岩的岩浆成因,为进一步揭示该时期华北板块壳幔岩浆相互作用过程提供了基本信息。

## 参考文献:

- [1] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105—119.
- [2] Maruya S. Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed [J]. The Island Arc, 1997(6): 91—120.
- [3] 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 燕山地区燕山期火成岩与造山模型[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 137—148.
- [4] 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 41—48.
- [5] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 等. 论东亚大陆的构造演变——燕山运动的全球意义[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 8—13.
- [6] 郭洪中, 张招崇. 辽宁西部中生代火山岩的基本特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1992, 11(3): 193—204.
- [7] 张招崇, 李兆霖, 王富宝, 等. 辽西义县盆地火山岩的基本特征及其成因探讨[J]. 现代地质, 1994, 8(4): 441—445.
- [8] 李伍平, 李献华, 路凤香, 等. 辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 193—204.
- [9] 彭艳东, 张立东, 张长捷, 等. 辽西义县组火山岩的 K-Ar、<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法同位素年龄测定[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 427—435.
- [10] 王五力, 张宏, 张立君, 等. 辽西义县—北票地区义县组地层层

- 序——义县阶标准地层剖面建立和研究之一 [J]. 地层学杂志, 2003, 27(3): 227—232.
- [11] 王五力, 张宏, 张立君, 等. 土城子阶—义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造—火山作用[M]. 地质出版社, 2004: 92.
- [12] 张宏, 柳小明, 李之彤, 等. 辽西北票和义县地区义县组的综合对比研究[J]. 地质通报, 2004, 23(8): 766—777.
- [13] 张宏, 柳小明, 李之彤, 等. 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[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 360—372.
- [14] 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1547—1558.
- [15] 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等. 华北早白垩世末岩石圈局部被扰动的时空证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 277—284.
- [16] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745—750.
- [17] Le Bas M J. Nephelinitic and basanitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1989, 30(5): 1299—1312.
- [18] Le Bas M J. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks [J]. Journal of Petrology, 2000, 41(10): 1467—1470.
- [19] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms [M]. Oxford: Blackwell, 1989: 193.
- [20] Verma S P, Torres-Alvarado I S, Sotelo-Rodríguez Z T. SINCLAS: Standard igneous norm and volcanic rock classification system [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 711—715.
- [21] ZHOU Ji-bin and LI Xian-hua. GeoPlot: An Excel VBA program for geochemical data plotting [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(4): 554—560.
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A] // Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in Ocean Basins. London: Geol Soc Spec Publ, 1989: 313—345.
- [23] Allegre C J, Minster J F. Quantitative method of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38: 1—25.
- [24] LAI Shao-cong, LIU Chi-yang, YI Hai-sheng. Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic andesite-dacite associations from the Hoh Xil Region, Tibetan Plateau [J]. International Geology Review, 2003, 45(11): 998—1019.
- [25] Verma S P. Geochemistry of evolved magmas and their relationship to subduction-unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 93: 151—171.
- [26] Green T H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis Sedona 16 years later [J]. Chemical Geology, 1994, 117: 1—36.
- [27] 吴福元, 葛文春, 孙德有. 埃达克质岩的概念、识别标志及其地质意义[A]// 肖庆辉, 邓晋福, 马大钲, 等编. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 2002: 172—191.
- [28] GE Xiao-yue, LI Xian-hua, CHEN Zhi-gang, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian medium-felsic high Sr and low Y igneous rocks in the eastern China: Constraints on the thickness of continental crust in the east China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(11): 962—968.
- [29] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662—665.
- [30] WANG Xuan-ce, LIU Yong-sheng, LIU Xiao-ming. Mesozoic adakites in the Lingqiu Basin of the central North China Craton: Partial melting of underplated basaltic lower crust [J]. Geochemical Journal, 2006, 40: 447—461.
- [31] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone [J]. Contrib Mineral Petrol, 1996, 123: 263—281.
- [32] Frey F A, Garcia M O, Wise W S, et al. The evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: Petrogenesis of tholeiitic and alkali basalts [J]. J Geophys Res, 1993, 96: 14347—14375.
- [33] 肖龙, Rapp R P, 许继锋. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 219—228.
- [34] Rapp R P. Heterogeneous source regions for Archean granitoids[A]// Wit M J, Ashwal L D, eds. Greenstone Belts. Oxford: Oxford University Press, 1997: 35—37.
- [35] Yagodziniski C M, Kay R W, Bolynets O N. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implication for the slab melting and processes in the mantle wedge [J]. Geol Soc Am Bull, 1995, 107: 505—519.
- [36] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melt and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 Gpa [J]. Chemical Geology, 1999, 160: 335—356.
- [37] Yardley B W D, Valley J W. The petrologic case for a dry lower crust [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 12173—12185.
- [38] Patino Douce A E, McCarthy T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998: 27—55.
- [39] LIU Yong-sheng, GAO Shan, YUAN Hong-lin, et al. U-Pb zircon dates and Nd, Sr and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights on evolution of lower continental crust [J]. Chem Geol, 2004, 211(1-2): 87—109.
- [40] ZHOU Xin-hua, SUN Min, Zhang G H, et al. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. Lithos, 2002, 62: 111—124.
- [41] ZHANG Hong-fu, SUN Min, Zhou Meifu, et al. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks [J]. Geol Mag, 2004, 141: 55—62.
- [42] 李思田. 断陷盆地分析与煤聚积规律[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1—321.
- [43] ZHU Ri-xiang, SHAO Ji-an, PAN Yong-xin, et al. Paleomagnetic data from early Cretaceous volcanic rocks of West Liaoning: Evidence for intracontinental rotation [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(21): 1832—1837.