

小兴安岭西北部红彦地区早石炭世火山岩 地球化学特征及其地质意义

刘 阁, 吕新彪, 张 磊, 曹晓峰, 陈 颖, 陈 超, 刘 洪, 陈 俊

(中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 小兴安岭红彦地区发育一套早石炭世火山岩。这套火山岩由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及凝灰岩组成。岩石地球化学特征研究表明, 该区早石炭世火山岩属于典型的钙碱系列岩石, 并具有富钾特点, 相对富集轻稀土元素($LREE/HREE = 4.19 \sim 13.83$)和大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, U), 相对亏损高场强元素(Nb, Ta, Ti), 具有活动大陆边缘型火山岩的特点。认为红彦地区早石炭世火山岩起源于富集的岩石圈地幔的部分熔融, 岩浆在演化过程中以结晶分异作用为主, 伴有少量的地壳混染作用, 即 AFC 过程。结合区域构造认为红彦地区早石炭世火山岩形成于碰撞前的俯冲环境, 可能与额尔古纳-兴安地块与松嫩地块的碰撞拼合密切相关。

关键词: 早石炭世, 钙碱性火山岩, 活动大陆边缘, AFC 过程, 小兴安岭

中图分类号: P588.14; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)05-0641-11

Geochemical characteristics of Early Carboniferous volcanic rocks in Hongyan area of northwestern Xiao Hinggan Mountains and their geological significance

LIU Ge, LÜ Xin-biao, ZHANG Lei, CAO Xiao-feng, CHEN Ying, CHEN Chao, LIU Hong and CHEN Jun
(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Early Carboniferous arc volcanic rocks lie in Hongyan area of northwestern Xiao Hinggan Mountains. The volcanic rocks consist of basalt, andesite, dacite and rhyolite. Petrological and geochemical studies indicate that the volcanic rocks are of typical calc-alkaline type and display relatively high-K features. They are enriched in LREE ($LREE/HREE = 4.19 \sim 13.83$) and LILE (Rb, Ba, Th and U) with obvious depletion of Nb, Ta and Ti, which suggests an active continental margin environment. The authors hold that the volcanic rocks of Hongyan area were derived from partial melting of enriched lithosphere mantle and experienced mainly crystallization differentiation with a small extent of lower crust assimilation (AFC-type processes). In combination with regional structures and geochemistry of volcanic rocks, it is concluded that the Early Carboniferous volcanic rocks of Hongyan area were probably formed in a pre-collision subduction environment and might have been related to the collision and collage between Erguna-Xingan and Songnen blocks.

Key words: Early Carboniferous; calc-alkaline volcanic rocks; active continental margin; AFC-type processes; Xiao Hinggan Mountains

兴蒙造山带东段的大兴安岭地区自北向南依次 (张兴洲等, 2006)。对于额尔古纳与兴安地块的拼划分为额尔古纳地块、兴安地块和松嫩地块(图 1a) 合时代, 葛文春等(2005)根据大兴安岭北部后造山

收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2012-07-15

基金项目: 内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔族自治旗拉抛等 8 幅 1:5 万区域矿产地质调查资助项目(NMKD2010-3)

作者简介: 刘 阁(1988-), 男, 在读硕士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: liugecug@qq.com; 通讯作者: 吕新彪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探研究, E-mail: luxb@cug.edu.cn.

花岗岩的时代认为额尔古纳和兴安地块沿塔源-喜桂图断裂于早古生代早期发生拼合(F-1)。对于兴安和松嫩地块拼合时代,目前争论较大:一种观点认为两个地块沿贺根山-嫩江-黑河缝合带碰撞拼合(F-2),但拼合时代有较大争议,有人认为该缝合带于晚古生代晚期发生闭合(孙德有等,2000;施光海等,2004;周长勇等,2005;赵芝等,2010a;Wu *et al.*, 2002, 2011),有人认为该缝合带于晚古生代早期闭合(Li *et al.*, 2006;赵芝等,2010a;Nokleberg, 2010)还有人认为拼合时代为早中生代(苗来成等,2003;Chen *et al.*, 2000);另一种观点认为两者很可能为统一的兴安-松嫩地块,其现今不同构造演化的差异主要是由于中生代以来构造演化造成的(Wu *et al.*, 2005;张兴洲等,2006;王成文等,2008)。

小兴安岭西北部位于大、小兴安岭接合部位,也是兴安地块和松嫩地块的结合部位,极有可能受到

板块俯冲、碰撞及造山作用的影响。前人主要通过花岗岩类的研究来约束兴安地块与松嫩地块的演化过程,对于该区出露的火山岩研究较少,本文通过对早石炭世不同岩性的火山岩的地球化学特征研究来探讨其地质意义。

1 区域地质概况

研究区位于红彦地区,其大地构造位置属于兴安地块的东南缘,靠近松嫩板块的碰撞缝合带(图 1a)。区域内古生代地层主要为二叠系白山组和核桃山组^①,中生代地层为白垩系光华组、甘河组以及嫩江组,区内广泛分布晚古生代及中生代花岗岩(图 1b)。

白山组为一套中酸性的火山岩,可划为两个岩性段,厚度大于1 635.43 m,与下伏地层多为断层接触。上段以酸性火山岩为主,由流纹岩、斜长流

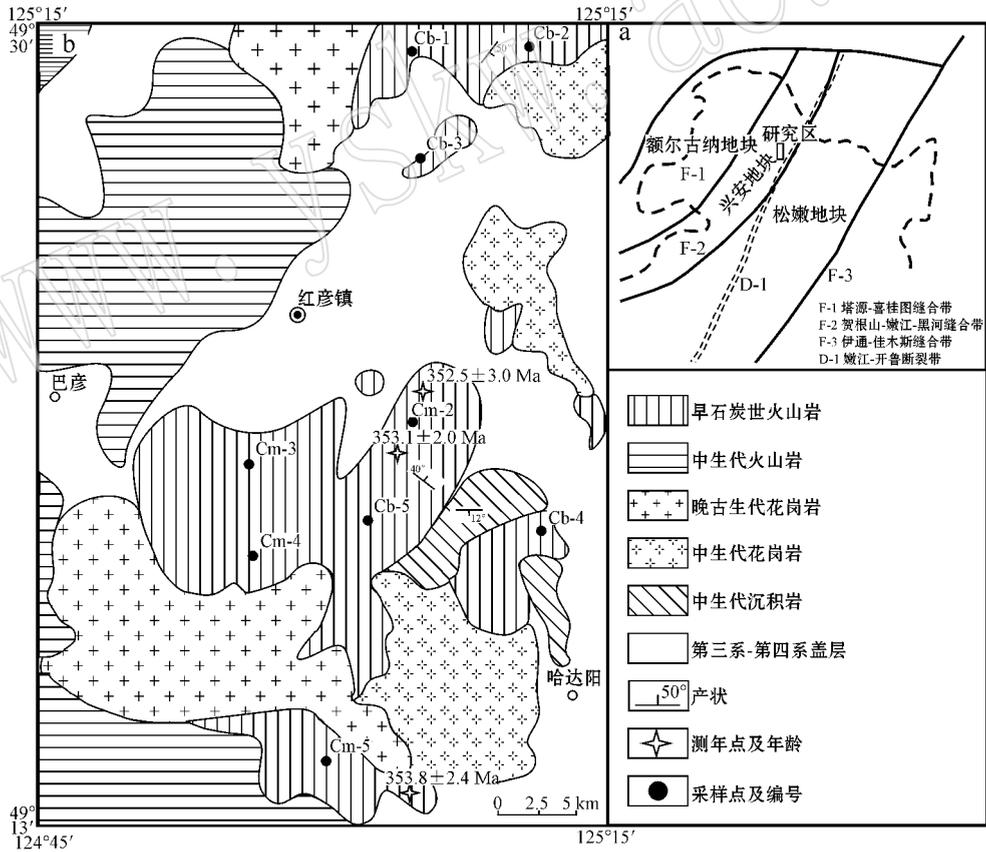


图 1 区域地质构造简图 [a, 据张兴洲等(2006)修改] 和红彦地区地质简图 [据黑龙江地质调查研究总院(2010)^②修编]
 Fig. 1 Tectonic setting map (a, modified after Zhang Xingzhou *et al.*, 2006) and simplified geological map of Hongyan area
 (b, after Heilongjiang General Institute of Geological Survey, 2010^②)

① 黑龙江省地质矿产局. 1977. 中华人民共和国 1:200 000 区域地质调查报告霍龙门幅 (M-51-X IV) .

② 黑龙江地质调查研究总院. 2010. 黑龙江 1:25 嫩江县 (M51C003004) 孙吴县 (M52C003001) 幅区调修测设计书.

纹岩、流纹质凝灰岩、凝灰熔岩和含角砾英安质凝灰岩夹安山岩组成;下段以中性熔岩为主,由蚀变安山岩、英安质凝灰岩等夹流纹质凝灰岩组成。核桃山组为一套片理化的酸性火山岩,可划分为两个岩性段,厚度大于 900.31 m,与上下地层关系暂不清楚。上段以酸性凝灰岩、含砾酸性凝灰岩为主,夹酸性熔岩及凝灰砂岩,底部有火山角砾岩。下段以酸性凝灰熔岩为主,其次为酸性熔岩和酸性凝灰岩。

由于区内火山岩成层性差,露头不连续,植被发育,覆盖较厚,缺少精确的同位素年代学资料,使得地层时代归属混乱。最新的年代数据显示,原核桃山组火山岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 353.8 ± 2.4 Ma,原白山组火山岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 352.5 ± 3.0 Ma(赵芝等,2010b),本文据此将该区域内古生代火山岩形成时代均划归为早石炭世。

2 样品描述与分析方法

2.1 样品描述

火山岩样品采自研究区早石炭世火山岩露头区,主要火山岩类型的岩石学特征如下。

玄武安山岩:呈灰、灰绿色,斑状结构,基质为交织结构,块状构造。斑晶由少量的斜长石和辉石构成,斜长石斑晶约占 10%,晶体形态多呈半自形板状,晶体粒径大小不等,一般在 0.2~1 mm,辉石斑晶约占 8%,晶体形态多呈柱状,晶体的粒径在 0.5~0.8 mm。岩石中的基质由细小的斜长石、绿泥石和铁质组成。岩石中有少量杏仁体,形状为椭圆形或不规则状,直径大小在 0.5~2 mm 之间,充填物为方解石晶体。

安山岩:呈灰绿色,交织结构。岩石矿物成分主要由中基性斜长石和角闪石及少量的辉石组成。斜长石在岩石中均以细小的板条状晶体彼此间呈平行状或杂乱状分布,形成交织状结构。岩石已经发生部分次生蚀变,斜长石晶体蚀变为绿泥石和绿帘石。角闪石呈不规则形状,为淡褐色的普通角闪石,此外还含有少量的黑云母。

流纹岩:灰白色,斑状结构,具流纹构造,以微细粒长英质为主,针状长条状长石和细粒石英定向排列,绕过少量长石、石英斑晶呈流动状,斑晶含量少于 15%,成分为透长石、少量斜长石和石英,基质为隐晶结构。

流纹质凝灰岩:岩石呈灰白色,斑状结构,斑晶

含量小于 10%,成分为透长石、少量斜长石和石英;含少量岩屑(<8%);基质为隐晶结构,岩石弱碳酸盐化。

2.2 分析方法

选取代表性样品进行主量、痕量元素测试,岩石样品送至澳实分析检测集团澳实矿物实验室(广州)测试分析。主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用荧光光谱仪(XRF)测试分析,痕量元素分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析方法,检测仪器为美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan 9000。主量元素分析精度和准确度优于 5%,痕量元素的分析精度和准确度优于 10%。

3 地球化学特征

火山岩样品的主量、稀土和微量元素分析结果列于表 1,除了个别样品烧失量较大外(LOI > 2.5%),多数样品烧失量较小,对烧失量大于 2.5% 的样品的主量元素扣除烧失量后重新进行了换算。由于 K、Na 和低场强元素(LFSE:Cs、Rb、Sr、Ba)在蚀变过程中可能发生迁移,因此本文将主要依据高场强元素(HFSE:Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf)、Th、稀土元素(REE)等不活泼元素对样品进行岩石学分类和构造环境、成因讨论。

3.1 主量元素特征

(1)根据 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分类图(图 2a),早石炭世火山岩可分为两大类(中基性岩类和中酸性岩类),岩石类型包括玄武岩、安山岩、英安岩及流纹岩。在 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图中,样品都落入亚碱性系列区(图 2b),从 AFM 图上可以看出早石炭世火山岩具有钙碱性系列的演化趋势(图 2c);在 SiO₂-K₂O 变异图中(图 2d),该组岩石多显示高钾钙碱性系列,样品从钙碱性系列过渡到高钾钙碱性系列,1 个样品落入钾玄岩系列,可能是由于含钾矿物的蚀变所致。

(2)中基性火山岩类(玄武岩和安山岩)的 SiO₂ 含量介于 49.39%~68.77% 之间。TF_{Fe2O3}(全铁)、MgO 含量分别为 2.73%~10.64%、1.45%~7.44%,Mg[#] = 40~67(平均为 52);Al₂O₃ 含量为 15.53%~18.67%,其中玄武岩类 Al₂O₃ 含量(>16%)在活动陆缘典型的高铝玄武岩范围内;具有相对富钠(Na₂O = 1.33%~5.52%)的特征,Na₂O/K₂O 比值介于 0.39~4.56。

表 1 红彦地区火山岩主量元素 ($w_B/\%$) 与微量元素、稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 1 Major elements ($w_B/\%$), and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) of volcanic rocks in Hongyan area

岩性	玄武岩			安山岩				英安岩			流纹岩				
	样品号	Cm-2	Cm-4	Cb-1	Cb-2	Cb-3	Cb-4	Cb-5	N-33	N-32	Cm-3	Cm-5	H-95	H-96	H-105
SiO ₂	52.98	49.39	53.06	63.60	68.77	59.44	62.59	66.90	69.15	70.05	75.61	70.64	71.72	72.92	73.78
TiO ₂	1.02	1.53	1.49	0.69	0.51	0.95	0.87	0.61	0.53	0.46	0.38	0.39	0.36	0.15	0.37
Al ₂ O ₃	15.84	17.88	17.19	16.40	15.53	18.00	18.67	14.99	14.33	15.29	11.22	13.81	13.26	14.26	12.92
TFe ₂ O ₃	7.35	9.67	10.64	4.82	2.73	5.60	6.89	5.07	4.17	2.86	3.49	3.56	3.45	2.83	2.71
MnO	0.15	0.30	0.16	0.07	0.04	0.08	0.15	0.13	0.11	0.10	0.13	0.11	0.11	0.10	0.09
MgO	7.44	3.26	4.98	3.50	1.45	3.35	3.01	0.95	0.82	0.53	0.23	0.51	0.47	0.09	0.45
CaO	7.21	8.33	7.17	3.14	1.93	3.02	1.33	1.18	1.61	1.44	0.25	1.77	1.73	0.54	0.64
Na ₂ O	3.96	1.33	3.23	4.31	3.94	5.52	3.64	3.74	4.24	5.07	3.34	4.72	4.51	5.42	4.01
K ₂ O	2.28	3.45	1.31	3.10	2.82	1.21	2.31	4.44	3.06	3.37	5.09	3.33	3.25	3.56	4.54
P ₂ O ₅	0.34	0.55	0.34	0.23	0.16	0.23	0.19	0.18	0.13	0.10	0.03	0.11	0.10	0.04	0.07
LOI	6.31	2.25	3.59	4.33	1.80	2.34	3.00	1.28	1.22	0.44	0.19	0.95	1.10	0.38	0.37
Total	99.88	98.09	99.84	99.82	99.82	99.82	99.74	99.47	99.36	99.88	99.95	99.90	100.06	100.29	99.95
Mg [#]	67	40	48	59	51	54	46	27	28	27	12	22	21	6	25
Na ₂ O/K ₂ O	1.74	0.39	2.48	1.39	1.40	4.56	1.58	0.84	1.39	1.50	0.66	1.42	1.39	1.52	0.88
Sc	16	17	23	9	4	11	16	14.9	12.9	11	8	10.39	9.71	8.76	10.48
V	166	270	231	103	48	98	169	32	26.4	21	15	20.8	18.26	2.6	17.2
Cr	350	10	600	120	20	40	70	10.3	10.2	10	30	4.37	3.48	3.08	4.44
Co	30	26	35	15	8	16	16	6.2	5.68	2	<1	2.67	2.44	0.76	1.99
Ni	200	1	132	64	7	21	28	5.86	7.39	<1	1	3.13	2.62	2.40	3.62
Ga	18.1	22.9	17.3	19	18.2	18	23.4	25.7	22	22.1	22.8	30.03	29.73	33.66	55.47
Rb	52.5	157	21.3	86.8	129.5	35.1	103	173	122	109.5	159.5	84.3	78.34	90.09	147.8
Sr	1355	811	579	514	649	390	482	146	200	277	19.3	168.4	172.4	110.3	130.7
Y	17.7	21.7	25.8	12.5	13.3	23.2	21.7	40	40.7	49.2	111.5	56.41	49.32	41.28	48.26
Zr	135	169	146	152	174	246	153	365	367	350	1070	434.7	412.2	487.5	488.4
Nb	4.8	8.6	6.3	5.5	7.9	15.8	7.7	15.1	15.6	17.3	50.9	17.93	16.79	18.17	20.26
Ba	6900	818	434	785	816	502	550	1071	937	1510	99.1	874	956	1323	1194
La	34.4	27.3	17.2	25	30.2	30.6	22.9	37.6	39.3	43.4	51.6	41.39	42.56	36.57	52.58
Ce	74	59.4	40.3	50.8	57.9	61.5	49.2	80.8	81.4	88.1	129.5	93.2	89.8	100.1	114.5
Pr	9.4	7.71	5.33	6.15	6.38	7	5.85	9.65	10.2	11.4	16.8	11.98	11.69	11.62	14.25
Nd	36.9	31.8	22.5	23.4	21.5	25	21.9	39.1	40.7	43.7	61.5	44.57	43.08	44.29	53.14
Sm	7.17	6.45	5.58	4.51	3.78	4.92	4.84	7.97	7.98	9.61	15.75	9.18	8.60	8.16	9.49
Eu	1.93	2.1	1.66	1.27	0.95	1.36	1.34	2.16	2.15	2.81	1.84	1.72	1.60	1.74	2.15
Gd	5.08	5.09	5.4	3.45	2.71	4.38	4.21	7.4	7.38	8.53	15	8.42	8.08	7.14	8.35
Tb	0.6	0.69	0.77	0.41	0.37	0.63	0.62	1.2	1.2	1.27	2.58	1.32	1.15	1.09	1.24
Dy	3.51	3.97	4.78	2.36	2.27	4.08	3.95	7.13	7.18	8.26	17.8	8.1	7.33	6.67	7.92
Ho	0.63	0.73	0.94	0.43	0.43	0.79	0.81	1.38	1.39	1.64	3.68	1.62	1.49	1.45	1.58
Er	1.72	2.04	2.73	1.16	1.27	2.36	2.46	4.02	3.99	4.8	11.6	4.37	4.22	4.12	4.53
Tm	0.23	0.28	0.37	0.16	0.17	0.31	0.34	0.61	0.61	0.68	1.7	0.68	0.67	0.66	0.732
Yb	1.5	1.64	2.48	1.04	1.31	2.2	2.41	4.15	3.85	4.69	12	4.55	4.66	4.62	5.23
Lu	0.24	0.26	0.36	0.16	0.2	0.33	0.39	0.63	0.61	0.72	1.82	0.73	0.73	0.78	0.87
Hf	3.4	4	3.6	3.8	4.5	5.9	4.4	8.67	8.53	8.6	24.5	8.17	8.38	10.85	12.14
Ta	0.3	0.4	0.4	0.4	0.7	1.1	0.5	0.94	0.97	1.1	3.1	0.77	0.78	1.06	1.19
Pb	29	16	6	15	11	32	31	22	22	23	30	14.11	15.32	20.55	17.65
Th	5.59	2.13	2.05	5.19	9.55	9.33	8.32	8.38	7.65	10.1	16.05	7.97	8.31	11.62	10.75
U	1.29	0.5	0.54	1.45	4.0	2.76	2.51	2.47	2.44	1.95	4.62	2.15	2.12	2.87	3.18
∑REE	177.31	149.46	110.4	120.3	129.44	145.46	121.2	203.8	207.94	229.61	343.2	231.78	225.64	229.02	276.56
δEu	0.93	1.08	0.91	0.95	0.87	0.88	0.89	0.86	0.86	0.93	0.36	0.59	0.58	0.68	0.72
δCe	0.97	0.97	1.01	0.96	0.96	0.98	1.00	1.00	0.96	0.93	1.05	1.00	0.95	1.16	0.99
LREE/HREE	12.12	9.17	5.19	12.12	13.83	8.65	6.98	6.68	6.93	6.51	4.19	6.78	6.97	7.63	8.08
(La/Yb) _N	15.46	11.22	4.68	16.21	15.54	9.38	6.41	6.11	6.88	6.24	2.90	6.13	6.16	5.33	6.77
(La/Sm) _N	3.02	2.66	1.94	3.49	5.03	3.91	2.98	2.97	3.10	2.84	2.06	2.84	3.11	2.82	3.48
(Gd/Yb) _N	2.73	2.50	1.76	2.68	1.67	1.61	1.41	1.44	1.55	1.47	1.01	1.49	1.40	1.25	1.29
数据来源	本文	本文	本文	本文	本文	本文	本文	赵芝(2011)	本文	本文	赵芝(2011)	赵芝(2011)	赵芝(2011)	赵芝(2011)	赵芝(2011)

注: TFe₂O₃ 是以 Fe₂O₃ 表示的总铁量 (La/Yb)_N 为球粒陨石标准化比值 Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)

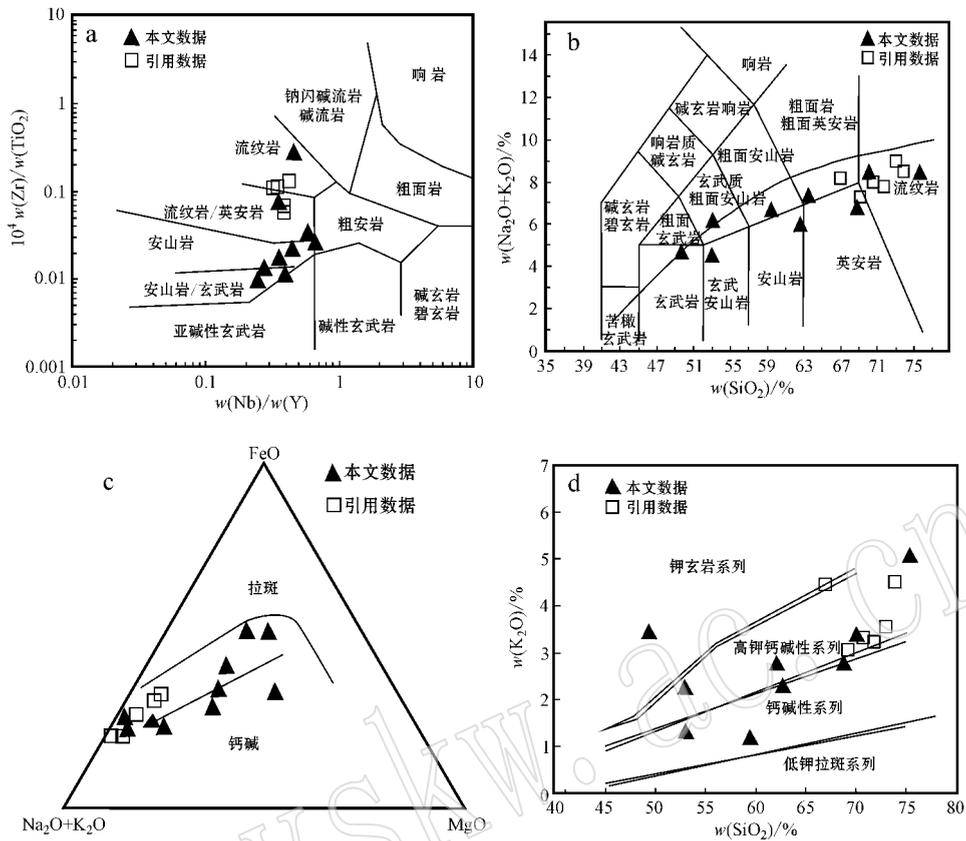


图 2 红彦火山岩 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解 (a, 据 Winchester and Floyd, 1977)、TAS 图解 (b, 据 Le Martre *et al.*, 1989)、AFM 图解 (c, 据 Irvine and Baragar, 1971) 和 $K_2O - SiO_2$ 图解 (d, 据 Rickwood, 1989) (部分数据引自赵芝, 2011)

Fig. 2 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ plot (a, after Winchester and Floyd, 1977), TAS diagram (b, after Le Martre *et al.*, 1989), AFM diagram (c, after Irvine *et al.*, 1971) and $K_2O - SiO_2$ diagram (d, after Rickwood, 1989) (some data from Zhao Zhi, 2011)

(3) 中酸性岩类(英安岩和流纹岩)的 SiO_2 含量介于 66.90% ~ 75.61% 之间, Al_2O_3 含量介于 11.22% ~ 15.29% 之间, TFe_2O_3 (全铁) MgO 含量分别为 2.71% ~ 5.07%、0.09% ~ 0.95%, $Mg^\# = 6 \sim 28$ (平均为 21), Na_2O/K_2O 比值介于 0.66 ~ 1.52 之间。

3.2 稀土元素特征

(1) 早石炭世中基性火山岩的稀土元素总量 (ΣREE) 介于 $110.4 \times 10^{-6} \sim 177.3 \times 10^{-6}$ 之间, LREE 介于 $92.6 \times 10^{-6} \sim 163.8 \times 10^{-6}$ 之间, HREE 介于 $8.73 \times 10^{-6} \sim 17.83 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 介于 5.19 ~ 13.83 之间 (La/Yb)_N 比值介于 4.68 ~ 16.21 之间, 稀土元素配分曲线呈明显的右倾型, 轻重稀土元素分馏明显, 富集轻稀土元素, 重稀土元素亏损 (图 3a) (La/Sm)_N 介于 1.94 ~ 5.03 之间, 轻稀土元素分馏明显 (Gd/Yb)_N 介于 1.41 ~ 2.73 之间, 重稀土元素也存在分馏, δEu 介

于 0.87 ~ 1.08 之间, 不具有或具有弱的负铕异常。

(2) 早石炭世中酸性火山岩的稀土元素总量 (ΣREE) 介于 $203.8 \times 10^{-6} \sim 343.2 \times 10^{-6}$ 之间, LREE 介于 $177.3 \times 10^{-6} \sim 277 \times 10^{-6}$, HREE 介于 $26.21 \times 10^{-6} \sim 66.18 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 介于 4.19 ~ 8.08 之间 (La/Yb)_N 比值介于 2.90 ~ 6.88 之间, 稀土元素配分模式为轻稀土元素富集的右倾斜型 (图 3b) (La/Sm)_N 介于 2.06 ~ 3.48 之间, 轻稀土元素分馏明显 (Gd/Yb)_N 介于 1.01 ~ 1.55 之间, 重稀土元素分馏不明显, 负铕异常变化较大, δEu 介于 0.36 ~ 0.93 之间, 说明它们经历了低程度到中等程度的斜长石分离结晶作用。

3.3 微量元素特征

从原始地幔标准化的微量元素蛛网图解可以看出, 早石炭世中基性火山岩以相对富集 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE) 为特征 (图 4a)。中酸性火山岩相对富

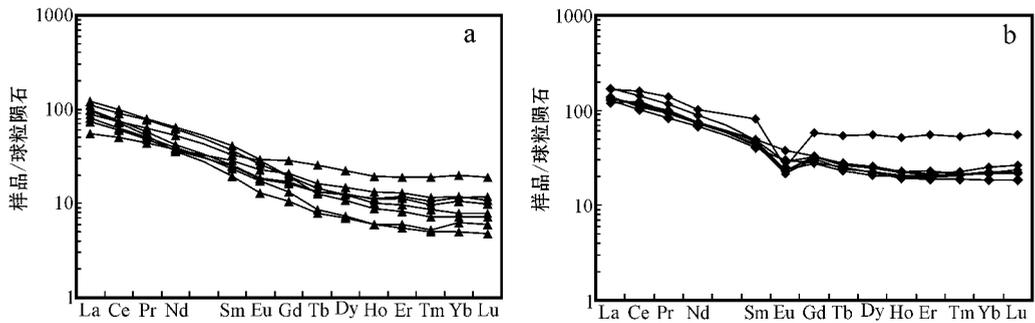


图 3 红彦地区中基性火山岩 (a) 和中酸性火山岩 (b) 稀土元素配分型式 (标准化值据 Boynton, 1984)
Fig. 3 REE patterns of intermediate-basic (a) and intermediate-acidic volcanic rocks (b) in Hongyan area (chondrite data after Boynton, 1984)

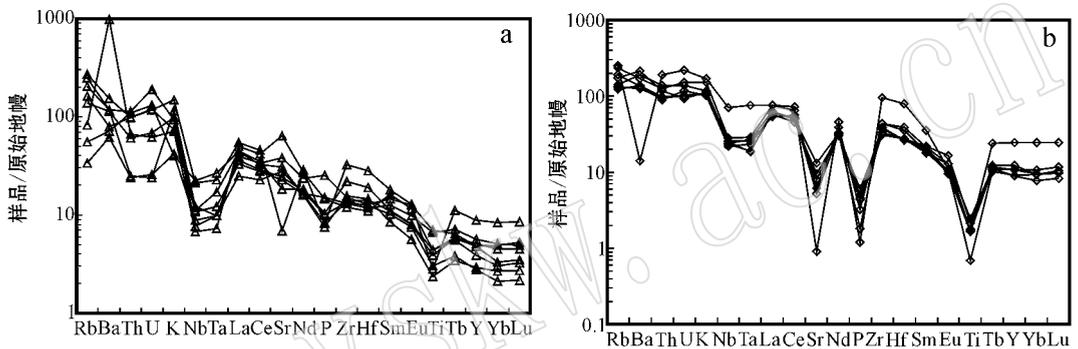


图 4 红彦地区中基性火山岩 (a) 和中酸性火山岩 (b) 微量元素蛛网图 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 4 Element spidergrams of intermediate-basic (a) and intermediate-acidic volcanic rocks (b) in Hongyan area (primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

集 K、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti、Sr、P 等高场强元素 (图 4b)。

4 早石炭世火山岩构造环境

本区早石炭世火山岩岩石组合相当于消减带之上的玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合, 在岩相组合上更接近于安第斯火山岩带的组合 (邓晋福等, 2007)。其岩石化学组成和特征指示这套火山岩为典型的钙碱性岩系, 而且具有带陆壳色彩的富钾特点。地层资料表明, 与早石炭世火山岩同时沉积的洪湖吐河组为一套海相沉积, 说明早石炭世火山岩不可能形成于大陆碰撞后阶段 (赵芝等, 2010b), 岩系的主要氧化物与 SiO_2 之间呈良好的线性演化关系 (图 5)。这些岩石化学特点均指示火山岩的形成与 B 型消减事件具有成因联系 (Hess, 1989), 其大地构造环境应当类似于安第斯的活动大陆边缘。火山岩均表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对

平坦的特征 (图 3), 很多和俯冲带相关的岩浆作用都具有此类特征 (Gill, 1987)。

安山岩类 Ni 的含量为 $7 \times 10^{-6} \sim 64 \times 10^{-6}$, 平均 37×10^{-6} ; Cr 的含量为 $20 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$, 平均 30×10^{-6} , 与安第斯型安山岩 (Ni 38.6×10^{-6} , Cr 48.4×10^{-6}) 接近 (Wilson, 1989)。从原始地幔标准化微量元素蛛网图解 (图 4) 上可以看出, 研究区早石炭世火山岩明显富集 Ba、Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 这与岛弧或活动大陆边缘火山岩的特征类似 (Kelemen *et al.*, 2003)。

Th-Hf/3-Ta 图解对判别火山弧玄武岩最为有效, 而且对酸性岩浆系列也有判别作用。从图 6a 中可以看出, 本文火山岩全部落入 D 区的钙碱性火山岩系列区域, 并且不同于岛弧拉斑玄武岩系列。本区中基性火山岩的 Zr/Y 介于 5~13, 具有大陆岛弧火山岩的特征 (Pearce, 1983), 而 Zr 含量相对较高 ($135 \times 10^{-6} \sim 246 \times 10^{-6}$), 可能与混染了地

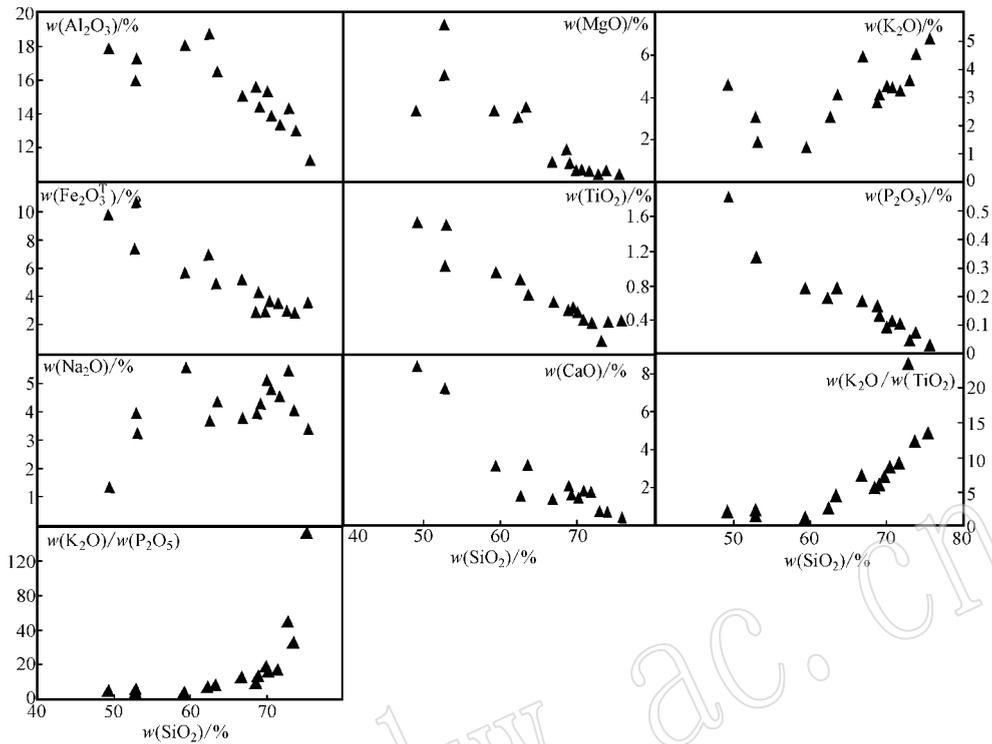
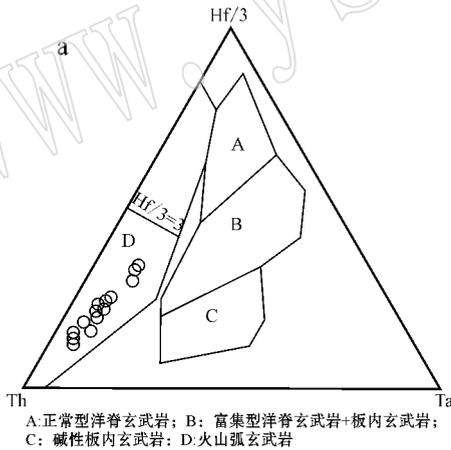


图 5 红彦地区火山岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of volcanic rocks from Hongyan area



A. 正常型洋脊玄武岩; B. 富集型洋脊玄武岩+板内玄武岩;
 C. 碱性板内玄武岩; D. 火山弧玄武岩

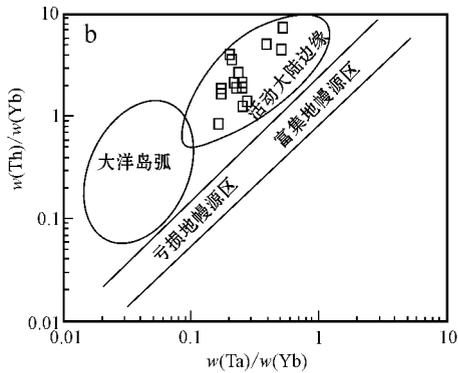


图 6 Th - Hf/3 - Ta (a) 和 Th/Yb - Ta/Yb (b) 图 (据 Pearce 等, 1979)

Fig. 6 Plots of Th - Hf/3 - Ta (a) and Th/Yb - Ta/Yb (b) after Pearce *et al.*, 1979

壳物质有关。此外 Th/Yb - Ta/Yb 图解上进行判别 (图 6b), 所有样品基本落入了活动大陆边缘火山弧区域。

从早石炭世火山岩的岩石组合及岩石地球化学特征的研究来看, 本区早石炭世火山岩应为活动大陆边缘的火山岩弧的环境, 靠近大陆边缘内带的大地构造位置造成了本区早石炭世火山岩富钾的特

征。

5 岩浆源区性质及岩石成因

在岛弧环境中, 岩浆源区物质最可能包括地幔楔中的橄榄岩、俯冲带流体、俯冲板片部分熔融形成的熔体及大陆地壳物质 (包括洋底沉积物) 的同化混

染 (Macdonald *et al.*, 2000)。

研究区早石炭世中酸性火山岩具有低 Sr/Y (0.2~6) 比值和高 Y ($>40 \times 10^{-6}$) 含量, 这种地球化学特征表明它们不可能是埃达克岩。研究区早石炭世火山岩具有比较大的 Zr/Nb 比值变化范围 (15.6~28.1), 表明其岩浆源区为组成比较复杂的岛弧火山岩的源区 (岛弧火山岩的 Zr/Nb 比值一般在 10~60 范围内变化, Davidson, 1996)。

用 Yb 标准化的 HFSE 比值可以消除或减少部分熔融和高压分离结晶作用对元素含量产生的影响, 从而得到岩浆源区的地球化学性质 (Macdonald *et al.*, 2000)。在 Zr/Yb-Nb/Yb 图解上, 研究区玄武岩类火山岩均分布在富集地幔内 (图 7a), 这与该区火山岩具有高 LILE/HFSE 和 LREE/HREE 比值的地球化学性质一致, 反映岩浆源区是经过俯冲带流体 (或者熔体) 改造后的富集地幔楔特征。但与 Antilles 岛弧链 (Macdonald *et al.*, 2000) 不同的是俯冲带流体对研究区早石炭世火山岩岩浆影响相对较弱 (主要体现在 Ba/Th 比值上)。Ba 在消减沉积物和蚀变玄武岩脱水产生的流体相中是非常活动的元素 (Brenane *et al.*, 1995; You *et al.*, 1996) 因此高 Ba/Th (比值 >300) 指示俯冲带流体对岩浆源区的贡献比较显著 (Devine, 1995)。早石炭世中性

火山岩的 Ba/Th (介于 54~384, 平均 154, 除去 1 个异常点), 说明俯冲带流体对岩浆源区的影响不很显著。Th/Ce 比值可以识别俯冲带沉积物的熔体对岩浆组分的贡献 (Hawkesworth, 1997), 早石炭世火山岩的 Th/Ce 比值在 0.04~0.16 之间变化, 从 Th/Ce-Sr/Th 图解 (图 7b) 中可以看出, 早石炭世火山岩的 Th/Ce 比值明显高于 MORB 和 OIB, 而与平均大陆地壳接近, 暗示它们可能与中上地壳的同化混染有关; 并无火山岩样品高于大陆地壳的平均值, 说明洋底沉积物对岩浆成分的影响不显著, 因为洋底沉积物中高度富集 Th (Plank and Langmuir, 1989; Ben Othman, 1989); 这些火山岩不具备明显 Ce 负异常 (δCe 为 0.96~1.01 也支持这一认识, 因为岛弧火山岩的 Ce 负异常与其岩浆源区存在消减沉积物组分有关 (Elliott *et al.*, 1997)。

在 Harker 图解上, 研究区基性与酸性火山岩之间显示出连续的演化趋势, 反映二者之间可能存在成因联系, 随 SiO₂ 含量的增加, 主量元素中 Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、TiO₂ 等元素含量的降低以及 Na₂O、K₂O 等元素含量的升高表明矿物分离结晶作用为控制岩浆演化的主要机制之一。此外, 从基性到中酸性岩, 普遍亏损 Nb、Ta、Ti 和 P, 富集 K、Rb、Th、U。从玄武安山岩 Sr 略富集、P 略亏损, 安山岩

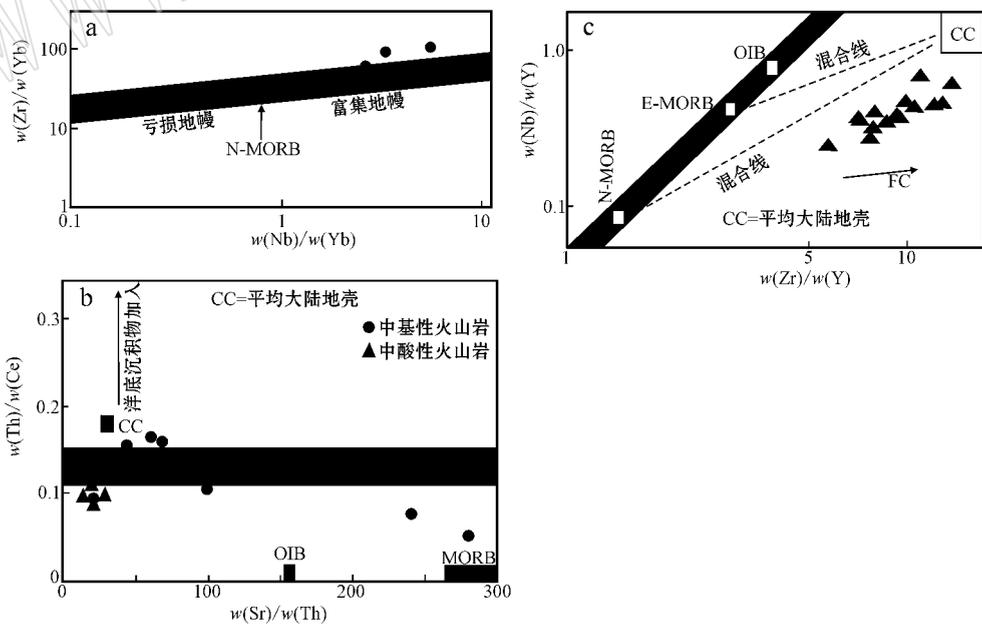


图 7 红彦地区玄武岩 Zr/Yb-Nb/Yb 图解 (a), 火山岩 Th/Ce-Sr/Th 图解 (b), 火山岩 Nb/Y-Zr/Y 图解 (c) (据 Kerr 等, 1997)

Fig. 7 Zr/Yb-Nb/Yb discrimination diagram for basalt (a), Th/Ce-Sr/Th discrimination diagram for volcanic rock (b), Nb/Y-Zr/Y discrimination diagram for volcanic rock (c) from Hongyan area (after Kerr *et al.*, 1997)

Sr、P 略亏损,到流纹岩 Sr 和 P 的强烈亏损,反映了同源岩浆相似的微量元素地球化学特征和部分活泼性元素演化的特点。

大陆中、上地壳具有高的 K_2O ,当岩浆演化的过程中有地壳物质的贡献时, K_2O/P_2O_5 、 K_2O/TiO_2 的比值会增加。在 Harker 图解(图 5)中,随着 SiO_2 含量的增加,研究区火山岩的 K_2O/P_2O_5 、 K_2O/TiO_2 略有升高,暗示在岩浆演化过程中可能有地壳物质的贡献(李超文等,2010)。

火山岩演化中 Zr 在晚期岩浆中具有显著的相容性,而 Nb 和 Y 由于不进入独立矿物相中而继续表现出强不相容性。因此,岩浆结晶分异作用会导致在 Nb/Y 比值不变的情况下,Zr/Y 比值迅速增加。在 Nb/Y - Zr/Y 图解中(图 7c),所有样品落在地幔演化区域下方,演化趋势位于壳幔混合与结晶分异作用之间,这种分布特征无法用壳幔简单混合过程解释。幔源岩浆的结晶分异-同化混染作用(AFC 过程)能够解释早石炭世火山岩的这种地球化学演化特征。

6 地质意义

红彦地区早石炭世火山岩岩石学和地球化学特征显示其形成于活动大陆边缘环境的特征,由于额尔古纳地块与兴安地块的拼合已于 480 Ma 前完成(葛文春等,2005),因此该地区早石炭世的弧火山岩应与额尔古纳-兴安地块和松嫩地块的碰撞拼合有关,俯冲作用至少在 350 Ma 就已开始。赵芝等(2010a)根据牙克石地区发育 370 Ma 的火山岩,认为牙克石地区两个地块之间的俯冲作用至少从晚泥盆世就已开始。位于大兴安岭北部的塔河辉长岩(333 Ma)具有活动大陆边缘的构造属性(周长勇等,2005),龙镇地区的正达山花岗岩体(320~315 Ma)被认为与洋壳的俯冲有关(张彦龙,2010),海拉尔地区发现可能由古亚洲洋的俯冲削减过程所引发的地幔玄武质岩浆强烈的底侵作用形成的埃达克型岩浆(310 Ma),说明俯冲阶段至少持续到 310 Ma(章凤奇等,2010)。大兴安岭十二站后造山花岗岩体(298 Ma)是兴安地块与松嫩地块拼合后后造山构造阶段的产物,说明两地块的拼合时间发生在至少 298 Ma 以前(隋振民等,2009)。早中二叠世造山后 A 型花岗岩(292~260 Ma)沿黑河—嫩江一带广泛出露(孙德有等,2000;Wu *et al.*,2002;郭奎城等,2011),

张玉清等(2009)在东乌旗地区发现了 284 Ma 的造山后的 A 型花岗岩,这些 A 型花岗岩形成于贺根山-嫩江-黑河缝合带拼合后的伸展构造背景,说明额尔古纳-兴安地块和松嫩地块沿贺根山-嫩江-黑河缝合带在晚古生代晚期发生闭合。

由此可知,额尔古纳-兴安地块和松嫩地块间的大洋俯冲至少在 370 Ma 就已开始,350 Ma 由于俯冲作用形成了红彦地区的火山岩,俯冲持续到 310 Ma,292~260 Ma 进入到碰撞及碰撞后伸展阶段,于早二叠世进入造山后伸展阶段。

7 结论

(1) 红彦地区早石炭世火山岩是由玄武岩-安山岩-流纹岩及凝灰岩组成,具有钙碱性系列的演化趋势,该组岩石多属高钾钙碱性系列,岩石经历了较为明显的结晶分异和陆壳混染作用(AFC)。

(2) 研究区火山岩相对富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U)和轻稀土元素(LREE/HREE = 4.19~13.83)相对亏损高场强元素和重稀土元素,具有 Nb、Ta 负异常,形成于活动大陆边缘的火山岩弧环境。

(3) 贺根山-嫩江-黑河缝合带自 370 Ma 至 260 Ma,分别发生了俯冲阶段、后造山阶段和造山后伸展阶段的岩浆作用,其中红彦地区早石炭世火山岩形成于俯冲阶段。

References

- Ben Othman D, White W M and Patchett J. 1989. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 94: 1~21.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier: 63~114.
- Brenan J M, Shaw H F, Ryerson F J, *et al.* 1995. Mineral aqueous fluid partitioning of trace elements at 900 °C and 2.0 GPa: constraints on the trace element chemistry of mantle and deeper crustal fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3331~3350.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implication[J]. *Tectonophysics*, 328: 157~182.
- Davidson J P. 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism[A]. *Subduction Top to Bottom. Geophys. Monogr.* 96. American Geophysical Union, Washington D [C].

- 251~262.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Sangguo, *et al.* 2007. Igneous petroec-tonic assemblages and tectonic settings: A discussior[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 392~402(in Chinese with English abstract).
- Devine J D. 1995. Petrogenesis of the basalt-andesite-dacite association of Grenada, Lesser Antilles island arc[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 69: 1~33.
- Elliott T, Plank T, Zindler A, *et al.* 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc[J]. Journal of Geophysical Research, 102: 14 991~15 019.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, *et al.* 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Rang[J]. Chinese Science Bulletin, 12: 1 239~1 247(in Chinese).
- Gill J B. 1987. Early geochemical evolution of an oceanic island arc and back arc: Fiji and the south Fiji basin[J]. The Journal of Geology, 95: 589~615.
- Guo Kuicheng, Zhang Wenlong, Yang Xiaoping, *et al.* 2011. Origin of Early Permian A-Type Granite in the Wudaogou Area, Heihe City [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 41(4): 1 077~1 083(in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth C J, Turner S, Mc Dermott F, *et al.* 1997. U-Th isotopes in arc magmas: implications for element transfer from the subducted crust[J]. Science, 276: 551~555.
- Hess P C. 1989. Origin of Igneous Rocks[M]. Cambridge, Massachusetts, London, England: Harvard University Press.
- Irvine T H and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 8: 523~548.
- Kelemen P B, Hangh j K and Greene A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[J]. Treat Geochem., 3: 593~659.
- Kerr A C, Marriner G F, Tarney J, *et al.* 1997. Cretaceous basaltic terranes in western Colombia: elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis[J]. J. Petrol., 38: 677~702.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms[A]. Recommendation of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rock[C]. Oxford: Blackwell.
- Li Chaowen, Guo Feng, Zhao Liang, *et al.* 2010. Geochemical constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from the southeastern Jilin Province, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1 074~1 083(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 26(3~4): 207~224.
- Macdonald R, Hawkesworth C J and Heath E. 2000. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism[J]. Earth Science Reviews, 49: 1~76.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Zhang Fuqin, *et al.* 2003. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing-Kele complex in the northwestern Lesser Xing 'an Range, and its geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 49(2): 201~209.
- Nokleberg W J. 2010. Metallogensis and Tectonics of Northeast Asia [M]. US Geological Survey Professional Paper 1 765.
- Pearce J A. 1983. The role of subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins[A]. Hawkesworth C J and Norry M J. Continental Basalts and Mantle Xenoliths[C]. Nantwich: Shiva, 49~230.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rock[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69: 33~47.
- Plank T and Langmuir C H. 1989. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chem. Geol., 145: 325~394.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22: 247~263.
- Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, *et al.* 2004. The age and its district tectonic implications on the Xilinhote A-type granites, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 49(7): 723~729(in Chinese).
- Sui Zhengmin, Ge Wenchun, Xu Xuechun, *et al.* 2009. Characteristics and geological implications of the Late Paleozoic Post-orogenic Shierzhan granite in the Great Xing 'an Rang[J]. Acta Petrologica sinica, 25(10): 2 679~2 686(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li Huimin, *et al.* 2001. Emplacement age of the post-orogenic A-type granites in Northwestern Lesser Xing 'an Range and its relationship to the eastward extension of Suolushan-Hegenshan-Zhalaite collisional suture zone[J]. Chinese Science Bulletin, 46(5): 427~433(in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematicsof oceanic basalt: implication for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geol. Soc. London Spec. Pub., 42: 313~345.
- Wang Chengwen, Jin Wei, Zhang Xingzhou, *et al.* 2008. New conception of the Late Paleozoic tectonics in Northeastern China and adjacent areas[J]. Journal of Stratigraphy, 32(2): 119~136(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(1): 1~30.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petro-

- genesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1~2): 143~173.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Simon Wilde, *et al.* 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221(1/2): 127~156.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrology: A Global Tectonic Approach*[M]. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- You C F, Castillo P R, Gieskes J M, *et al.* 1996. Trace element behavior in hydothermal experiments; Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 140: 41~52.
- Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Cao Ruicheng, *et al.* 2010. Discovery of Late Paleozoic adakite from the basement of the Hailaer Basin in NE China and its geological implication[J]. *Acta Petrologica sinica*, 26(2): 633~641(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingzhou, Yang Baojun, Wu Fuyuan, *et al.* 2006. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihe (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China[J]. *Geology in China*, 33(4): 816~823(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanlong, Ge Wenchun, Gao Yan, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of granites in Longzhen area and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1059~1073(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Xu Liqun, Kang Xiaolong, *et al.* 2009. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its significance[J]. *Geology in China*, 26(2): 987~995(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi. 2011. Late Paleozoic Magmatism and Its Tectonic Significance in the Northern Great Xing'an Range, Northeastern China[Ph. D. Dissertation][D]. Changchun: Jilin University(in Chinese).
- Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, *et al.* 2010b. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: Chronological and geochemical evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3245~3258(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Pan Shiyu, *et al.* 2010a. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of Carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern Lesser Xing'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2452~2464(in Chinese with English abstract).
- Zhou Changyong, Wu Fuyuan, Ge Wenchun, *et al.* 2005. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe northern Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 763~775(in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 13(3): 392~402.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. *科学通报*, 12: 1239~1247.
- 郭奎城, 张文龙, 杨晓平, 等. 2011. 黑河市五道沟地区早二叠世 A 型花岗岩成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(2): 1077~1083.
- 李超文, 郭 锋, 赵 亮, 等. 2010. 吉林东南部晚中生代中酸性火山作用成因的地球化学制约[J]. *岩石学报*, 26(4): 1074~1088.
- 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. *科学通报*, 48(22): 2315~2323.
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. *科学通报*, 49(4): 384~389.
- 隋振民, 葛文春, 徐学纯, 等. 2009. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(10): 2679~2686.
- 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 2000. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. *科学通报*, 45(20): 2217~2222.
- 王成文, 金 巍, 张兴洲, 等. 2008. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. *地层学杂志*, 32(2): 119~136.
- 章凤奇, 陈汉林, 曹瑞成, 等. 2010. 海拉尔盆地基底晚古生代 adakite 的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(2): 633~641.
- 张兴洲, 杨宝骏, 吴福元, 等. 2006. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. *中国地质*, 33(4): 816~823.
- 张彦龙, 葛文春, 高 妍, 等. 2010. 龙镇地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义[J]. *岩石学报*, 26(4): 1059~1073.
- 张玉清, 许立权, 康小龙, 等. 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义[J]. *中国地质*, 36(5): 988~995.
- 赵 芝. 2011. 大兴安岭北部晚古生代岩浆作用及其构造意义[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文.
- 赵 芝, 迟效国, 刘建峰, 等. 2010a. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩岩浆: 年代学及地球化学证据[J]. *岩石学报*, 26(11): 3245~3258.
- 赵 芝, 迟效国, 潘世语, 等. 2010b. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(8): 2452~2464.
- 周长勇, 吴福元, 葛文春, 等. 2005. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因[J]. *岩石学报*, 21(3): 763~775.