

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.08.022

本溪地区 BIF 中玄武质围岩的高场强元素特征

韩创益^{1,2},王恩德¹,付建飞¹,罗衷热²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 金策工业综合大学 资源勘探工程学院,平壤 999093)

摘 要 : 辽宁本溪地区条带状铁矿(BIF)与其玄武质火山围岩之间的时空关联非常密切. 对于玄武质火山围岩高场强元素(HFSE)的研究表明 : w_{Nb}/w_{Ta} 比值(7.00 ~ 19.93)表现出明显的分异,而 w_{Zr}/w_{Hf} 比值(33.46 ~ 38.28)则变化不大 ;从弓长岭到南芬、歪头山样品的 w_{Nb}/w_{Ta} 比值变化具有明显的循序性. 这种高场强元素的迁移和分异特征反映出俯冲作用与盆地演化之间的关联. 研究区玄武质火山围岩(w_{Nb}/w_{Yb})_N 比值大于 1(1.21 ~ 18.45 ,平均 2.72) 这进一步表明 其形成的构造背景为陆内弧后盆地提供了有利于 BIF 形成的条件.

关 键 词 : 本溪地区 ;BIF ;玄武质火山围岩 ;高场强元素 ;陆内弧后盆地
中图分类号 : P 612 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1005-3026(2016)08-1172-05

HFSE Characteristics of Basaltic Volcanic Wall Rocks Around BIFs in Benxi Area

HAN Chang-ik^{1,2}, WANG En-de¹, FU Jian-fei¹, RA Chong-yol²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China ;2. College of Geoprospection Engineering, Kimchaek University of Technology, Pyongyang 999093, DPRK. Corresponding author : HAN Chang-ik, E-mail : han_6130@sina.com)

Abstract : BIFs have spatial and temporal association with their basaltic volcanic wall rocks in Benxi area of Liaoning Province. Through an analysis on the HFSE(high field-strength element) characteristics of basaltic volcanic wall rocks around BIFs , it was found that their w_{Nb}/w_{Ta} ratios (7.00 ~ 19.93) were remarkably fractionated , but the fractionation of w_{Zr}/w_{Hf} ratios (33.46 ~ 38.28) was not so obvious. In addition ,the fractionation of w_{Nb}/w_{Ta} ratios had regional tendency from Gongchangling to Nanfen and Waitoushan. These migration and fractionation characteristics of HFSE showed a connection between basin evolution and subduction process. Their(w_{Nb}/w_{Yb})_N ratios (1.21 ~ 18.45 , average 2.72) were greater than 1 , further suggesting that the tectonic setting for BIFs in the studied area was an intra-continental back arc basin.

Key words : Benxi area ;BIF ;basaltic volcanic wall rock ;HFSE (high field-strength element) ; intra-continental back arc basin

本溪地区弓长岭、南芬到歪头山的条带状铁矿(BIF)可归属于 Algoma 型. BIF 与其玄武质火山围岩之间密切的时空关联引起许多地质学者的广泛关注,对其进行过详细研究,反演为 BIF 形成的构造环境. 王恩德等^[1]的研究表明,弓长岭 BIF 的形成环境相当于弧后盆地. 代堰锴等^[2]根据歪头山斜长角闪岩的地球化学特征分析,认为其原岩为弧后盆地玄武岩(BABB),提出了 BIF 形成

的弧后盆地构造模式. 代堰锴等^[3]和张连昌等^[4]也确认南芬绿泥角闪片岩和歪头山斜长角闪岩均具有弧后盆地玄武岩的特征. 本文在这个前提下进一步对其玄武质火山围岩高场强元素(HFSE)的特征进行研究.

对研究区玄武质火山围岩的研究不少,但对其高场强元素的关注不多. 高场强元素是跟踪太古宙玄武质火山变质岩的最有效的工具. Nb - Ta

和 Zr – Hf 属于典型的高场强元素,鉴于具有相同的电价(+5 和 +4)和离子半径($R_{Nb}/R_{Ta} = 1.000$ 和 $R_{Zr}/R_{Hf} = 1.006 \sim 1.026$),在壳 – 幔演化过程中具有相似的地球化学行为,因此一般情况下不容易发生分异.然而研究发现,不同来源的玄武岩产生不同 HFSE 的分异,比如 $Niu^{[5]}$ 的研究显示了洋中脊玄武岩(MORB)中 w_{Zr}/w_{Hf} (约25 ~ 50)和 w_{Nb}/w_{Ta} (约 9 ~ 19)的分异,而且它们之间具有相关性, $Pf\ddot{a}nder$ 等^[6] 的研究显示洋岛玄武岩(OIB)的 w_{Zr}/w_{Hf} 为 35.5 ~ 45.5 ,而 w_{Nb}/w_{Ta} 为 14.6 ~ 17.6 .

本文对于南芬 BIF 中绿泥角闪片岩进行高精度微量元素分析,而且结合已有的弓长岭和歪头山斜长角闪岩的分析数据首次探讨导致研究区玄武质火山围岩 HFSE 分异的可能机制,并进一步揭示 BIF 形成的构造环境.

1 分析方法和数据描述

岩石常量和微量元素在澳实分析检测(广州)有限公司测定.常量元素的测定采用 ME-XRF06 化验分析(偏硼酸锂溶解, X 射线荧光光谱分析,各氧化物的检测范围为 0.01% ~ 100%), $RSD = 0.1\% \sim 1\%$;稀土元素的测定采用 ME-MS81 化验分析($LiBO_2$ 熔融,质谱仪定量分析);微量元素采用 ME-ICP61 化验分析(四酸溶解,等离子体发射光谱分析).稀土和微量元素分析的 $RSD < 10\%$.

南芬绿泥角闪片岩的地球化学分析结果列于表 1.弓长岭、歪头山斜长角闪岩和南芬绿泥角闪片岩的 HFSE 分析数据列于表 2.弓长岭斜长角闪岩的数据引自文献 [1],歪头山斜长角闪岩的数据引自文献 [2] .

2 讨 论

2.1 弧后盆地玄武岩的确认

跟以往研究一样,本次研究 V – Ti/1000 图解结果也显示,研究区玄武质火山围岩的原岩为弧后盆地玄武岩(图 1).

弧后盆地包括洋内弧后盆地和陆内弧后盆地^[7-8].已有的研究认为,洋内弧后盆地玄武岩组分类似于一种洋内岛弧岩浆来源的 N-MORB,而陆内弧后盆地玄武岩组分类似于一种陆内岛弧岩浆来源的 E-MORB^[8].研究区玄武质火山围岩的稀土元素配分型式图(球粒陨石标准化)为轻稀

表 1 南芬绿泥角闪片岩的常量和微量元素组成						
Table 1 Major element and trace element compositions of chlorite amphibolites in Nanfen						
组分	NF1	NF2	NF3	NF4	NF5	NF6
	常量元素(质量分数/%)					
SiO ₂	49.85	48.64	49.35	48.04	47.04	47.19
TiO ₂	0.85	0.77	0.80	0.79	0.86	0.90
Al ₂ O ₃	14.73	14.29	14.37	15.02	15.44	15.97
FeOt	11.69	11.78	11.66	11.69	12.24	11.78
MnO	0.19	0.20	0.20	0.18	0.20	0.19
MgO	7.86	8.61	8.40	7.92	8.79	7.70
CaO	10.69	9.57	10.20	9.38	9.93	11.37
Na ₂ O	0.62	1.18	1.03	1.37	1.10	0.64
K ₂ O	0.14	0.13	0.15	0.73	0.17	0.15
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
LOI	3.62	3.85	3.49	3.90	4.29	4.22
总计	100.22	99.08	99.62	99.06	100.13	100.19
微量元素(质量分数 × 10 ⁶)						
Cr	100	138	139	155	159	157
V	282	310	305	306	326	330
Rb	4.00	4.40	4.20	34.40	5.80	4.90
Ba	21.00	71.00	31.00	239.00	72.00	59.00
Th	0.56	0.50	0.50	0.52	0.52	0.46
U	0.19	0.17	0.18	0.36	0.20	0.15
Nb	2.60	2.30	2.30	2.30	2.30	2.00
Ta	0.17	0.13	0.15	0.13	0.14	0.14
Pb	5.40	13.00	7.00	9.30	5.60	8.60
Sr	109.00	88.20	95.70	77.80	95.70	134.00
Zr	57.00	48.00	49.00	45.00	54.00	49.00
Hf	1.50	1.40	1.40	1.20	1.50	1.40
La	3.70	2.80	3.00	2.80	2.90	2.90
Ce	9.52	7.61	8.39	7.71	7.95	7.91
Pr	1.39	1.28	1.36	1.24	1.42	1.20
Nd	7.10	6.50	6.60	6.00	6.80	5.80
Sm	2.39	2.19	2.21	2.01	2.43	2.00
Eu	0.78	0.72	0.68	0.84	0.73	0.78
Gd	2.88	2.87	2.77	2.65	3.16	2.40
Tb	0.53	0.50	0.50	0.46	0.54	0.50
Dy	3.58	3.31	3.41	3.25	3.46	3.32
Ho	0.73	0.75	0.71	0.71	0.76	0.72
Er	2.45	2.12	2.10	2.11	2.19	2.24
Tm	0.35	0.34	0.32	0.28	0.31	0.35
Yb	2.11	2.00	2.06	1.91	2.12	2.12
Lu	0.33	0.31	0.33	0.26	0.30	0.29
Y	19.40	16.30	16.80	16.00	16.40	17.90

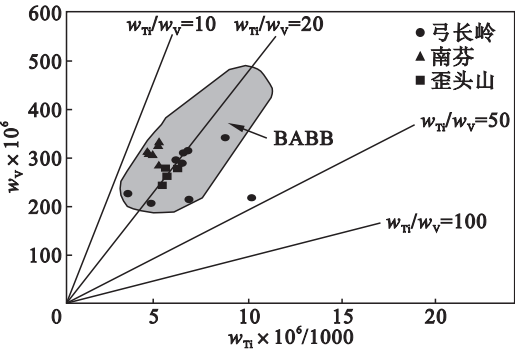
注 :NF1 ~ NF6 为样品号.

表 2 本溪 BIF 中玄武质火山围岩高场强元素质量分数组成

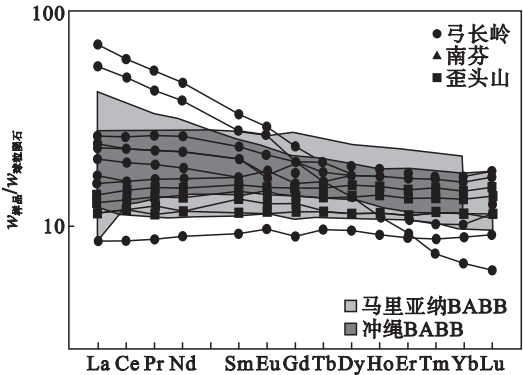
Table 2 HFSE compositions(mass fraction)of basaltic volcanic wall rocks around BIFs in Benxi Area 10 ⁶								
样品	样品号	Nb	Ta	Zr	Hf	w_{Nb}/w_{Ta}	w_{Zr}/w_{Hf}	$(w_{Nb}/w_{Yb})_N$
弓长岭 斜长角闪岩	GCL1	2.60	0.20	53.00	1.50	13.00	35.33	2.01
	GCL2	4.00	0.30	76.00	2.10	13.33	36.19	2.05
	GCL3	27.90	1.40	111.00	2.90	19.93	38.28	18.45
	GCL4	6.50	0.40	85.00	2.30	16.25	36.96	4.86
	GCL5	3.80	0.50	62.00	1.70	7.60	36.47	2.08
	GCL6	3.00	0.30	55.00	1.50	10.00	37.67	1.34
	GCL7	5.10	0.40	84.00	2.20	12.75	38.18	2.38
	GCL8	4.30	0.40	70.00	1.90	10.75	36.84	2.11
	GCL9	1.40	0.20	31.00	0.90	7.00	34.44	1.21
歪头山 斜长角闪岩	WTS-5	2.82	0.15	52.52	1.55	18.80	33.88	1.56
	WTS-6	2.56	0.13	41.64	1.23	19.69	33.85	1.72
	WTS-11	2.88	0.15	51.16	1.51	19.20	33.88	1.61
	WTS-12	3.01	0.16	51.87	1.55	18.81	33.46	1.58
南芬 绿泥角闪片岩	NF1	2.60	0.17	57.00	1.50	15.29	38.00	1.61
	NF2	2.30	0.13	48.00	1.40	17.69	34.29	1.51
	NF3	2.30	0.15	49.00	1.40	15.33	35.00	1.46
	NF4	2.30	0.13	45.00	1.20	17.69	37.50	1.58
	NF5	2.30	0.14	54.00	1.50	16.43	36.00	1.42
	NF6	2.0	0.14	49.00	1.40	14.29	35.00	1.23

注 :弓长岭斜长角闪岩数据引自文献 [1] ;歪头山斜长角闪岩数据引自文献 [2] .

土元素(LREE)富集型到平坦型 ,该特征更类似于陆内弧后盆地玄武岩(即冲绳 BABB)(图 2). 为了更深入地确认该弧后盆地的本质 ,本文采用高场强元素质量分数的比值来进行判别. Pearce 等^[9]认为比值 $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ 为最有效的幔源追踪指标 ,而且提出 ,富集幔源弧后盆地玄武岩的 N-MORB 标准化后 $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ 大于 1 ,亏损幔源弧后盆地玄武岩的 N-MORB 标准化后 $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ 小于 1(图 3). 弓长岭斜长角闪岩的 $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ 为 1.21 ~ 18.45 ;南芬绿泥角闪片岩为 1.23 ~ 1.61 ;歪头山斜长角闪岩为 1.56 ~ 1.72 ,都大于 1. 据上述分析可知 ,研究区玄武质火山围岩很可能形成于陆内弧后盆地之中.



BABB 数据引自文献 [10]
图 1 玄武质火山围岩 w_v-w_{Ti} 图解



BABB 数据引自文献 [7]
图 2 样品稀土元素球粒陨石标准化配分图解
Fig. 2 Chondrite-normalized REE diagram of samples

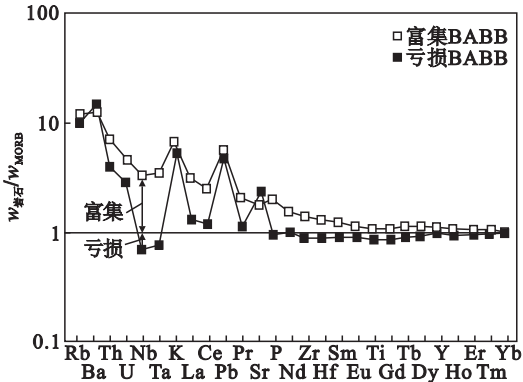


图 3 采用 $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ 比值的 BAB 区分
Fig. 3 Division of BAB using $(w_{Nb}/w_{Yb})_N$ ratios

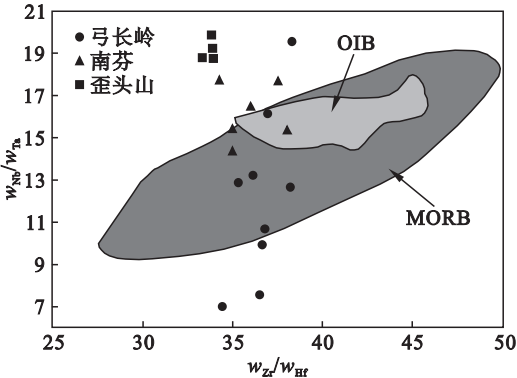
Fig. 1 w_v-w_{Ti} diagram of basaltic volcanic rocks

2.2 高场强元素特征及其构造意义

在微量元素 N-MORB 标准化蛛网图中,研究区玄武质火山围岩都显示出大离子亲石元素 (LILE) 富集, HFSE 亏损特征包括 Nb-Ta, Zr-Hf 和 Ti 负异常, 这是与俯冲有关的玄武质岩浆的普遍特征, 能反映出俯冲板块和地幔楔之间的物质移动关系. 由于其移动性的差距, 因此 LILE 被认为是俯冲移动元素, 而 HFSE 被认为是俯冲固定元素^[6-9].

尽管 HFSE 在俯冲过程中具有保守性质, 但本次研究发现了 w_{Nb}/w_{Ta} 的明显分异现象. 从表 2 可知, 弓长岭样品 w_{Nb}/w_{Ta} 为 7.00 ~ 19.93, 平均 12.29; 南芬样品 w_{Nb}/w_{Ta} 为 14.29 ~ 17.69, 平均 16.12; 歪头山样品 w_{Nb}/w_{Ta} 为 18.80 ~ 19.69, 平均 19.13. 弓长岭样品 w_{Nb}/w_{Ta} 的分异特征最明显, 虽然南芬和歪头山样品各自的 w_{Nb}/w_{Ta} 变化不大, 但是从整体上来看, 研究区玄武质火山围岩的 w_{Nb}/w_{Ta} 比值从弓长岭到南芬和歪头山具有逐渐上升的变化规律, 这说明研究区玄武质火山围岩 w_{Nb}/w_{Ta} 发生了明显的分异作用. 与此相反, w_{Zr}/w_{Hf} (33.46 ~ 38.28) 变化范围不大, 所有样品的 w_{Zr}/w_{Hf} 均集中在 35.87 ± 2.41 范围内, 这个数值接近于球粒陨石比值 (36.30), 表明研究区玄武质火山围岩 w_{Zr}/w_{Hf} 分异特征不明显.

最近, 中国学者均发现 HFSE 在俯冲过程中能发生明显迁移和分异, 从而支持俯冲过程中 HFSE 元素分异的观点^[11]. 但是与其他来源的玄武岩相比, 研究区高场强元素分异特征完全不同 (见表 2、图 4). 如在 MORB 和 OIB (洋岛玄武岩) 中, w_{Nb}/w_{Ta} 和 w_{Zr}/w_{Hf} 虽然显示出一些分异现象, 但是它们之间具有正相关关系.



MORB 数据引自文献 [5], OIB 数据引自文献 [6]

图 4 玄武质火山围岩 $w_{Nb}/w_{Ta} - w_{Zr}/w_{Hf}$ 图解
Fig. 4 $w_{Nb}/w_{Ta} - w_{Zr}/w_{Hf}$ diagram of basaltic volcanic rocks

为了说明在研究区高场强元素中所显示的 w_{Nb}/w_{Ta} 和 w_{Zr}/w_{Hf} 的分异特征, 可以采取金红石

等富 Ti 矿物来解释^[5-6, 11-12]. 弓长岭斜长角闪岩 w_{Nb}/w_{Ta} 与 w_{TiO_2} 正相关 (相关系数 $R = 0.73$), 而歪头山斜长角闪岩和南芬绿泥角闪片岩均显示负相关关系 (相关系数 $R = -0.65, -0.79$) (图 5), 反映其分异作用可能受到富 Ti 矿物 (如金红石) 控制.

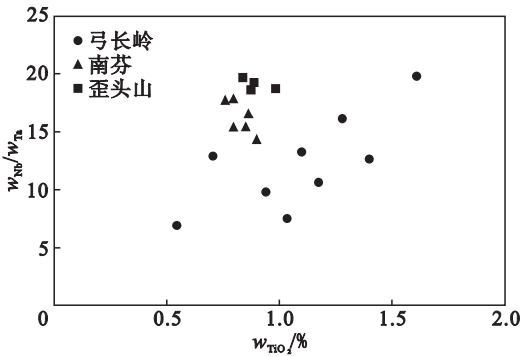


图 5 玄武质火山围岩 $w_{Nb}/w_{Ta} - w_{TiO_2}$ 图解
Fig. 5 $w_{Nb}/w_{Ta} - w_{TiO_2}$ diagram of basaltic volcanic rocks

在金红石等富 Ti 矿物中 HFSE 都是相容的 (分配系数 $D_{Nb/Ta}$ 和 $D_{Zr/Hf}$ 都小于 1), 但其主要控制 w_{Nb}/w_{Ta} 的分异作用, 而对 w_{Zr}/w_{Hf} 的影响不明显^[6]. 研究区玄武质火山围岩 w_{Nb}/w_{Ta} 有较大的变化幅度, 而 w_{Zr}/w_{Hf} 并没有明显变化, 恰好反映出金红石是控制研究区 HFSE 分异作用的主导因素.

Münker^[12] 认为在弧后盆地演化过程中, 因为高场强元素 Nb 主要富集在金红石等富 Ti 矿物中, 所以金红石与俯冲流体 (熔体) 之间的相互作用导致 Nb, Ta 的亏损和分异, 并且提出, w_{Nb}/w_{Ta} 大于 17.6 是指俯冲熔体的交代作用, w_{Nb}/w_{Ta} 小于 17.6 的是指俯冲流体的交代作用. 统计数据显示, 金红石与熔体之间金红石的分配系数 $D_{Nb/Ta}$ 为 0.59 ~ 0.68, 小于 1, 而金红石与流体之间金红石的分配系数 $D_{Nb/Ta}$ 为 1.09 ~ 1.57, 大于 1. 这是区分俯冲熔体和流体交代作用的主要依据. 与流体维持平衡的金红石具有 $D_{Nb/Ta} > 1$ 和 Ti 高度分异, 导致 w_{Nb}/w_{Ta} 和 Ti 之间的正相关性. 与此相反, 与熔体维持平衡的金红石具有 $D_{Nb/Ta} < 1$, 可能导致 w_{Nb}/w_{Ta} 和 Ti 之间的负相关性^[12]. 弓长岭斜长角闪岩 w_{Nb}/w_{Ta} 为 7.00 ~ 19.93, 南芬绿泥角闪片岩 w_{Nb}/w_{Ta} 为 14.29 ~ 17.69, 歪头山斜长角闪岩 w_{Nb}/w_{Ta} 为 18.80 ~ 19.69. 在 $w_{Nb}/w_{Ta} - w_{TiO_2}$ 图解中弓长岭样品显示正相关性, 而南芬和歪头山样品均为负相关性. 这都说明弓长岭和歪头山 w_{Nb}/w_{Ta} 的分异分别跟俯冲流体和熔体有关, 而南芬样品可能在其形成过程中受到俯冲流体和熔体的混合交代作用.

从弓长岭到南芬和歪头山 ,其高场强元素渐进的变化特征和继承关系很可能反映出弧后盆地演化过程 ,包括最初的俯冲板块流体流入、后来的熔体输入 ,以及部分熔融等俯冲板块和地幔源区之间的物质移动 ,这些过渡的特征可能反映了陆内弧后盆地的发展过程.

关于弧后盆地演化 ,以往研究^[7-8]认为弧后盆地玄武岩从岛弧型开始渐渐发展到 MORB 型. 在裂谷作用的早期 ,该特征更类似于岛弧玄武岩 ,但随着弧后盆地的发展(开始扩张 ,岛弧与海盆之间的距离增加) ,该特征更类似于大洋中脊玄武岩.

张连昌等^[4]研究提出 ,鞍山地区 BIF 形成于靠近岛弧一侧 ,本溪地区 BIF 产于靠近弧后盆地一侧. 这一结论与本文的分析一致.

本次研究表明 ,该区斜长角闪岩原岩为陆内弧后盆地玄武岩 ,俯冲作用的影响较大 ,随着弧后盆地的发展 ,其特征从岛弧型演化为大洋中脊型.

3 结 论

1) 研究区玄武质火山围岩(w_{Nb}/w_{Yb})_N 大于 1 ,很可能形成于陆内弧后盆地之中 ,提供了有利于 BIF 形成的条件.

2) 研究区玄武质火山围岩 w_{Nb}/w_{Ta} 显示出分异特征 ,而且具有明显的继承关系. 弓长岭样品主要跟俯冲流体有关 ,歪头山样品具有与俯冲熔体的关联 ,而南芬样品受到俯冲流体和熔体的混合交代作用.

参考文献 :

[1] 王恩德 ,夏建明 ,赵纯福 ,等. 弓长岭铁矿床物质来源及沉积古地理环境研究 [J]. 矿床地质 ,2013 ,32(2) :380 – 396. (Wang En-de ,Xia Jian-ming ,Zhao Chun-fu ,et al. Material sources and sedimentary environment of Gongchangling iron deposit [J]. *Mineral Deposits* 2013 ,32(2) :380 – 396.)

[2] 代堰铭 ,张连昌 ,王长乐 ,等. 辽宁本溪歪头山条带状铁矿的成因类型、形成时代及构造背景 [J]. 岩石学报 ,2012 ,28 (11) :3574 – 3594. (Dai Yan-pei ,Zhang Lian-chang ,Wang Chang-le ,et al. Genetic type ,formation age and tectonic setting of the Waitoushan banded iron formation ,Benxi ,Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2012 ,28(11) :3574 – 3594.)

[3] 代堰铭 ,张连昌 ,朱明天 ,等. 鞍本地区太古代 BIF 成矿作

用、地壳增生及富矿成因 [J]. 矿物学报 ,2013 ,33(sup) :386 – 387. (Dai Yan-pei ,Zhang Lian-chang ,Zhu Ming-tian ,et al. Metallogenesis ,crust growth and origin of high-grade ore for Archean BIFs in Anshan-Benxi area [J]. *Acta Mineralogica Sinica* 2013 ,33(sup) :386 – 387.)

[4] 张连昌 ,代堰铭 ,王长乐 ,等. 鞍山 – 本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代、物质来源与形成环境 [J]. 地球科学与环境学报 ,2014 ,36(4) :1 – 15. (Zhang Lian-chang ,Dai Yan-pei ,Wang Chang-le ,et al. Age ,material sources and formation setting of precambrian BIFs iron deposits in Anshan-Benxi area [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* 2014 ,36(4) :1 – 15.)

[5] Niu Y L. Earth processes cause Zr-Hf and Nb-Ta fractionations but why and how ? [J]. *RSC Advances* 2012 ,2(9) :3587 – 3591.

[6] Pfänder J ,Münker C ,Stracke A ,et al. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—implications for crust-mantle differentiation and the fate of niobium [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2007 ,254(1/2) :158 – 172.

[7] Xu J F ,Castillo P R ,Chen F R ,et al. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area ,Xinjiang ,northwest China :implications for back arc mantle evolution [J]. *Chemical Geology* 2003 ,193(1/2) :137 – 154.

[8] Ghazi J M ,Moazzen M ,Rahgoshay M ,et al. Geochemical characteristics of basaltic rocks from the Nain ophiolite (Center Iran) ; constraints on mantle wedge source evolution in an oceanic back arc basin and a geodynamical model [J]. *Tectonophysics* 2012 ,574/575 :92 – 104.

[9] Pearce J A ,Stern R J. Origin of back-arc basin magmas :trace element and isotope perspectives [M] // Back-Arc Spreading Systems : Geological , Biological , Chemical , and Physical Interactions. [S. l.] :The American Geophysical Union , 2006 :63 – 86.

[10] Metzger E P ,Harper G D ,Miller R B. Geochemistry and tectonic setting of the ophiolitic Ingalls Complex ,North Cascade ,Washington :implications for correlations of Jurassic cordilleran ophiolites [J]. *Journal of Geology* ,2002 ,110 (5) :543 – 560.

[11] 丁兴 ,孙卫东. 俯冲碰撞带低 Nb/Ta 角闪岩 对大陆地壳成因的启示 [J]. 地质学报 ,2013 ,87(sup) :68 – 70. (Ding Xing ,Sun Wei-dong. Amphibolites with low Nb/Ta ratios in subduction collision belt :implication for origin of continental crust [J]. *Acta Geologica Sinica* ,2013 ,87 (sup) :68 – 70.)

[12] Münker C. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back arc system ,New Zealand :source constraints and application of refined ICPMS techniques [J]. *Chemical Geology* ,1998 ,144 (1/2) :23 – 45.