

东天山白石泉镁铁-超镁铁杂岩体的 Nd-Sr-Os 同位素成分及其对岩浆演化的意义*

陈斌^{1,2} 贺敬博² 陈长健² 木合塔尔·扎日¹

CHEN Bin^{1,2}, HE JingBo², CHEN ChangJian² and MUHETAER Zari¹

1. 新疆大学地质与勘查工程学院, 乌鲁木齐 830046

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

1. School of Geology and Exploration, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

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

2012-09-08 收稿, 2012-11-30 改回.

Chen B, He JB, Chen CJ and Muhetaer Z. 2013. Nd-Sr-Os isotopic data of the Baishiquan mafic-ultramafic complex from East Tianshan, and implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1):294–302

Abstract We report trace elements and Nd-Sr-Os isotopic data for the Baishiquan mafic-ultramafic complex that occurs in the East Tianshan Mountains (in the northern part of the Mid-Tianshan Precambrian block) and is accompanied by Cu-Ni deposits, to understand its mantle source characteristics and processes of mantle-crustal interaction. Geochemically, the complex is characterized by enrichment of LILEs and depletion of HFSEs. The whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of the Baishiquan complex vary significantly, with $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7032 \sim 0.7066$ and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.6 \sim -0.9$, and the Nd-Sr isotopic ratios are negatively correlated. The complex shows very radiogenic Os isotopic compositions, with $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0.295 \sim 1.18$ and $\text{Os} = 80 \times 10^{-12} \sim 29 \times 10^{-12}$. Based on these data, we conclude that (1) the parent magma of the Baishiquan complex experienced significant crustal contamination during magma emplacement, as is revealed by the negatively correlated and significantly varied Nd and Sr isotopic compositions and the highly radiogenic Os isotopic compositions. This is different from a popular model that the Baishiquan complex received no crustal contamination during magma ascent; (2) the parent magma of the Baishiquan complex originated from a juvenile lithospheric mantle that was previously metasomatized by subduction zone fluids/melts in the Paleozoic. This requires reconsideration of the nature and distribution of the Mid-Tianshan Precambrian block.

Key words Nd-Sr-Os isotopes; Mafic-ultramafic rocks; Crustal contamination; East Tianshan

摘要 本文报道东天山有铜镍硫化物矿化的白石泉镁铁-超镁铁杂岩体(分布在中天山地块北部)的微量元素和 Nd-Sr-Os 同位素成分,以探讨其地幔源区性质和壳幔相互作用过程。白石泉杂岩体的地球化学特征是富集大离子亲石元素和轻稀土元素,但亏损高场强元素。全岩 Sr 和 Nd 同位素初始比值变化较大,分别是 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7032 \sim 0.7066$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.6 \sim -0.9$,两者呈反相关关系。全岩 Os 含量在 $80 \times 10^{-12} \sim 29 \times 10^{-12}$ 之间,富含放射性成因 Os ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.295 \sim 1.18$)。据此,得出结论:(1)白石泉杂岩体的母岩浆在上升侵位过程中,受到地壳物质的强烈混染,导致各岩石类型的 Nd-Sr 同位素成分变化很大和 Os 同位素成分富集放射性成因 Os 的特征,这与前人认为的白石泉岩体侵位过程中没有地壳混染作用的模式明显不同;(2)白石泉杂岩体的母岩浆来自被古生代俯冲带熔/流体交代过的年轻岩石圈地幔,这要求我们重新认识中天山前寒武地块的性质和规模。

关键词 Nd-Sr-Os 同位素; 镁铁-超镁铁质岩; 地壳混染; 东天山

中图法分类号 P588.124; P588.125

* 本文受国家科技支撑计划(305)项目(2011BAB06B04-2)和新疆大学天山学者“特聘教授”配套项目联合资助。

第一作者简介: 陈斌,男,1964年生,教授,岩石学专业, E-mail: binchen@pku.edu.cn

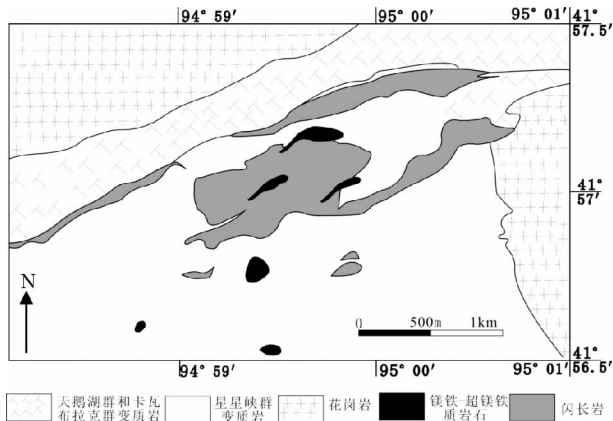


图2 白石泉镁铁-超镁铁质杂岩体(据柴凤梅等, 2007)

Fig. 2 Map showing the distribution of the Baishiquan mafic-ultramafic complex (modified after Chai *et al.*, 2007)

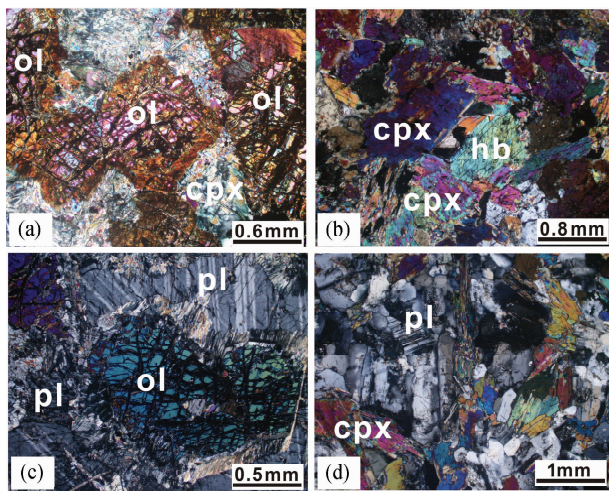


图3 白石泉杂岩体代表性岩石类型的显微照片

ol-橄榄石; cpx-单斜辉石; pl-斜长石; hb-角闪石

Fig. 3 Microphotographs of the representative rock types in the Baishiquan complex

Ol-olivine; cpx-clinopyroxene; pl-plagioclase; hb-hornblende

橄长岩(图3c):主要由橄榄石(25%~30%)和斜长石(55%~70%)组成,还有少量的辉石、角闪石等。

辉长岩:半自形粒状结构,主要由辉石(30%~40%)和斜长石(40%~50%)组成,还有少量角闪石(10%)。斜长石主要为半自形板柱状,有环带结构;辉石为短柱状或长柱状;角闪石呈粒间柱分布,形成较晚。

辉长闪长岩(图3d):主要由斜长石(50%~60%)、单斜辉石(25%~35%)组成,还有少量角闪石等。

角闪石岩:半自形细粒-中粒粒状结构,堆晶结构,主要含有角闪石(70%~80%)、斜长石(15%~20%)组成,还有少量辉石和金属矿物。

闪长岩:呈灰白色,半自形粒状结构。主要由角闪石

(20%~30%)、斜长石(45%~60%)和少量辉石、石英等组成。斜长石有明显环带结构。

详细的岩石学描述可参考李金祥等(2007)、柴凤梅等(2007)。

3 分析方法

全岩主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,样品粉末熔成玻璃饼后用X射线荧光光谱(XRF)方法测定,测试精度优于1%。微量元素分析在中国地质大学(北京)地学实验中心完成。采用两酸(HNO₃+HF)高压反应釜溶样方法对样品粉末进行溶解。采用等离子质谱仪(ICPMS; Agilent 7500a)来测定元素含量。含量高于10×10⁻⁶元素的误差小于5%,低于10×10⁻⁶元素误差小于10%。

元素Rb、Sr、Sm和Nd的分离和纯化是在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,通过传统的阳离子交换柱法实现的。质谱分析在天津地质矿产研究所完成,通过负热电离质谱法(N-TIMS)在TRITON上进行测定。Rb、Sr、Sm、Nd的含量是通过同位素稀释剂法获得的,元素Rb的误差是2%,Sr的误差是0.5%~1%,Sm和Nd误差小于0.5%。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的原始测量值分别对¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219和⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194进行校正。样品测试过程中,Indi Nd标样给出的测试值¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512111±4(2σ),NBS-987 Sr标样给出的测试值⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710231±12(2σ),以同样化学流程处理的BCR-2标样给出如下测试值:Sm=6.547×10⁻⁶,Nd=28.799×10⁻⁶,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1376,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512624±3(2σ),Rb=46.59×10⁻⁶,Sr=330.11×10⁻⁶,⁸⁷Rb/⁸⁶Sr=0.407610,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.705050±0.000005(2σ)。

Re-Os同位素分析在日本海洋-地球科学和技术研究所(JAMSTEC)完成,Re和Os含量以及Os同位素成分是利用Carius管(Shirey and Walker 1995)和微蒸馏方法(Roy-Barman, 1993)分析得出。溶样量为1~3g,并与¹⁸⁵Re和¹⁹⁰Os稀释剂一起放入Carius管中加热至少24h(240℃)。详细的Re和Os化学分离过程见Chen *et al.* (2009)。Os同位素质谱分析在Finnigan TRITON^R上完成(一个氧气阀、九个法拉第杯和一个计数器),详细分析方法见Suzuki *et al.* (2004)和Chen *et al.* (2009)。

4 分析结果

4.1 主量和微量元素

我们选择白石泉岩体中2个橄长岩(BSQ-6, BSQ-8)、1个辉石岩(BSQ-10)、2个辉长岩(BSQ-15, BSQ-17),将其全岩化学成分列于表1(更多分析见李金祥等,2007),SiO₂=55%~47%,MgO=23%~6%,FeO=14%~5%,CaO=17%

表 1 白石泉镁铁-超镁铁杂岩体的主量 (wt%) 和微量 ($\times 10^{-6}$) 元素Table 1 Major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Baishiquan mafic-ultramafic complex

样品号	BSQ-6	BSQ-8	BSQ-10	BSQ-15	BSQ-17	样品号	BSQ-6	BSQ-8	BSQ-10	BSQ-15	BSQ-17
岩性	辉石橄榄岩			辉长闪长岩		岩性	辉石橄榄岩			辉长闪长岩	
SiO ₂	47.88	47.73	54.88	53.25	53.56	Zr	86.86	71.60	82.92	43.36	75.02
TiO ₂	0.66	0.63	0.59	0.28	0.65	Nb	3.41	2.86	4.10	1.99	3.27
Al ₂ O ₃	6.12	7.37	6.75	19.70	5.14	Cs	15.64	4.92	1.99	6.13	0.27
FeO ^T	13.97	13.88	9.89	4.92	7.91	Ba	51.6	99.6	122	124	32
MnO	0.16	0.16	0.17	0.09	0.15	La	7.37	5.85	7.33	6.59	8.73
MgO	22.45	22.81	14.10	6.32	13.09	Ce	18.64	14.65	19.15	12.85	25.07
CaO	3.24	3.36	9.81	10.09	16.21	Pr	2.67	2.07	2.88	1.57	3.89
Na ₂ O	0.91	0.51	0.64	0.53	0.19	Nd	12.22	9.37	13.80	6.48	18.46
K ₂ O	0.20	0.15	0.13	0.04	0.03	Sm	2.42	1.85	3.34	1.24	3.84
P ₂ O ₅	0.76	1.19	0.91	2.68	0.45	Eu	0.68	0.59	0.69	0.48	0.87
LOI	4.06	2.58	1.21	1.04	1.59	Gd	2.28	1.74	3.43	1.18	3.52
Total	100.42	100.36	99.06	98.94	98.96	Tb	0.34	0.28	0.53	0.18	0.51
Na ₂ O/K ₂ O	0.8	2.3	1.4	5.0	2.3	Dy	2.00	1.54	3.19	1.04	3.06
Mg [#]	78.0	78.3	73.9	71.8	76.6	Ho	0.39	0.30	0.63	0.21	0.60
Li	49.92	15.72	15.68	7.61	5.47	Er	0.99	0.77	1.62	0.53	1.54
Sc	12.13	9.68	38.01	15.59	19.73	Tm	0.14	0.11	0.23	0.08	0.21
Ti	4670	4188	3582	1827	4182	Yb	0.89	0.71	1.49	0.50	1.38
V	34.44	33.86	165.2	82.56	88.06	Lu	0.13	0.10	0.21	0.07	0.19
Cr	1615	1482	931	95	1534	Hf	2.20	1.70	2.17	1.07	2.46
Co	112.4	103.5	50.82	38.86	43.76	Ta	0.30	0.25	0.30	0.61	0.24
Ni	696.4	627.2	336.4	306.4	400.4	Pb	3.62	4.37	3.26	8.89	3.27
Cu	90.16	93.19	143.7	155.2	52.29	Th	0.53	0.47	2.39	1.13	0.59
Zn	100.4	99.00	96.56	36.54	76.16	U	0.23	0.16	0.79	0.23	0.61
Ga	7.53	7.81	9.98	16.54	8.99	ΣREE	51.15	39.93	58.52	32.99	71.89
Rb	46.0	13.7	24.0	18.7	3.4	(La/Yb) _N	5.97	5.90	3.52	9.52	4.52
Sr	232	317	109	660	135	δEu	0.87	1.00	0.62	1.19	0.71
Y	9.42	7.38	16.90	5.74	15.13						

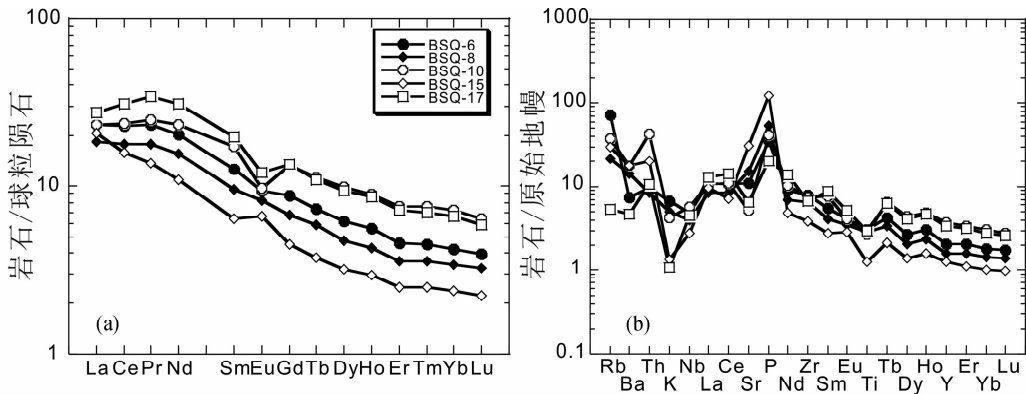


图 4 白石泉镁铁-超镁铁岩的球粒陨石标准化稀土模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) for the Baishiquan complex (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

~3%。可见成分变化很大,反映堆晶过程中形成从超镁铁岩(橄榄岩)到中性岩(闪长岩)的复杂岩石序列。

在全岩球粒陨石标准化稀土元素模式图(图 4a)上,不同的岩石类型具有类似的稀土模式,都表现出轻稀土富集,

但辉石橄榄岩 Eu 异常不明显,而其它岩石类型 Eu 或为正常,或为负异常,可能与其中斜长石的含量有关。一致的稀土特征和密切的时空关系,表明这些岩石类型是同源岩浆分离结晶和堆晶的结果(柴凤梅等,2007)。

表2 白石泉杂岩体的 Nd-Sr 同位素成分

Table 2 Nd-Sr isotopic data of the Baishiquan complex

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	2σ	I_{Sr} (280Ma)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (280Ma)
BSQ-6	46.00	232.40	0.5591	0.705414	4	0.70319	2.42	12.22	0.1258	0.512787	9	2.9	-0.36	5.4
BSQ-8	13.72	317.40	0.1221	0.705111	3	0.70463	1.85	9.37	0.1251	0.512793	9	3.0	-0.36	5.6
BSQ-10	24.12	109.54	0.6219	0.709082	2	0.70660	3.34	13.80	0.1538	0.512516	16	-2.4	-0.22	-0.9
BSQ-15	18.67	659.80	0.0799	0.706506	3	0.70619	1.24	6.48	0.1215	0.512541	9	-1.9	-0.38	0.8
BSQ-17	3.41	135.80	0.0708	0.706733	4	0.70645	3.84	18.46	0.1321	0.512549	10	-1.7	-0.33	0.6

表3 白石泉杂岩体全岩 Re-Os 同位素

Table 3 Whole-rock Re-Os isotopic data of the Baishiquan complex

样品号	Re ($\times 10^{-12}$)	2σ	Os ($\times 10^{-12}$)	2σ	$\frac{187\text{Re}}{188\text{Os}}$	2σ	$\frac{187\text{Os}}{188\text{Os}}$	2σ	$\frac{187\text{Os}}{188\text{Os}}(t)$
BSQ-8	393.7	12	60.5	0.20	32.5	1.0	0.3965	0.003	0.245
BSQ-10	2619.1	137	28.8	0.11	681.2	35.8	4.3679	0.039	1.183
BSQ-15	67.5	8	66.6	1.09	5.0	0.6	0.3188	0.008	0.295
BSQ-17	49.2	5	80.0	0.20	3.1	0.3	0.5284	0.002	0.514

在全岩原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图4b),这些岩石类型具有类似的微量元素特征,比如,大离子亲石元素(Rb、Ba、Th)富集,但K亏损;高场强元素(Nb、Ti)亏损,而P有正异常。

4.2 Nd-Sr 同位素

白石泉杂岩体全岩 Nd-Sr 同位素成分列于表2。可见两个辉石橄榄岩的初始 Sr 和 Nd 同位素成分(以 280Ma 计算)分别是 0.7032~0.7046 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.4 \sim 5.6$,其它岩石类型(辉石岩、辉长岩等)则具有比较高的 Sr 同位素比值(0.7062~0.7066)和比较低的 Nd 同位素成分($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.8 \sim -0.9$)。这些岩石的 Nd-Sr 同位素成分呈反相关关系(图5)。

4.3 Re-Os 同位素

白石泉杂岩体的 Os 同位素成分列于表3。橄榄岩(BSQ-8)的 Os 含量为 60.5×10^{-12} ,远低于地幔橄榄岩的 Os 含量(3200×10^{-12} ; Walker *et al.*, 1989),表明其为堆晶成因,与前面所述的堆晶结构一致;其 Os 同位素比值为 0.245,也明显高于地幔橄榄岩(<0.13 ; Walker *et al.*, 1989)。其它岩石类型的 Os 含量也比较低,在 $29 \times 10^{-12} \sim 80 \times 10^{-12}$ 之间,并且非常富含放射性成因 Os ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.295 \sim 1.18$)。

5 讨论

5.1 地壳混染

白石泉杂岩体主要由镁铁-超镁铁质岩石组成,前人的研究多数认为其在侵位过程中没有地壳混染(李金祥等, 2007; 柴凤梅等, 2007)。然而,我们的数据却表明,白石泉杂

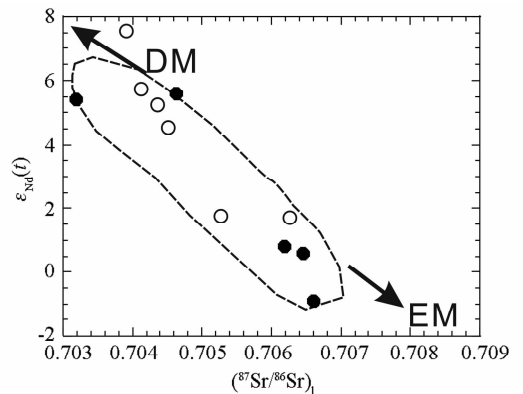


图5 白石泉镁铁-超镁铁岩体的全岩 Nd-Sr 同位素成分 DM-亏损地幔; EM-富集地幔。空心圈数据来自 Chai *et al.* (2008)

Fig. 5 Whole-rock Nd-Sr isotopic data of the Baishiquan complex DM-depleted mantle; EM-enriched mantle. Open circles data after Chai *et al.* (2008)

岩体在侵位过程中有显著的地壳混染。主要证据如下:

(1) 白石泉杂岩体的 Nd 和 Sr 同位素成分变化很大(表2),这暗示岩浆体系在演化过程中可能是开放的。其中相对早期的堆晶体辉石橄榄岩的 Nd-Sr 同位素成分($I_{\text{Sr}} = 0.7032 \sim 0.7046$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.4 \sim 5.6$)比较接近亏损地幔,但其它形成较晚的岩石类型(如辉石岩和辉长岩)则具有比较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(0.8 ~ -0.9)和较高的 Sr 同位素比值($I_{\text{Sr}} = 0.7062 \sim 0.7066$)。重要的是,白石泉杂岩体的 Nd-Sr 同位素成分呈线性反相关关系(图5),这表明地壳(具有较高的 Sr 同位素比值和较低的 Nd 同位素比值)的混染是很明显的,该杂岩体的 Sr-Nd 同位素成分的变化应该是不同程度地壳混染的

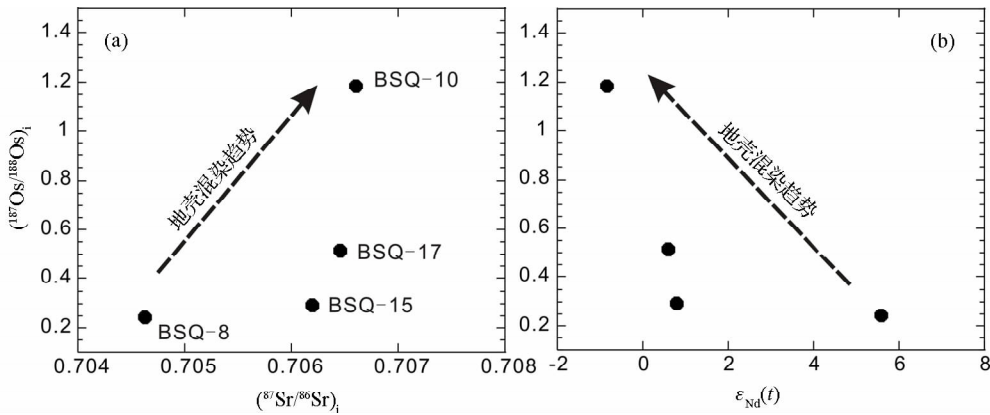


图6 白石泉杂岩体的全岩 Nd-Sr 同位素成分与 Os 同位素成分相关性

Fig.6 Plots showing the relationships between the whole-rock Nd-Sr isotopic and Os isotopic compositions

结果。

(2) 白石泉杂岩体具有比较高的 Os 同位素比值(0.245 ~ 1.18), 远高于地幔橄榄岩 (<0.13; Walker *et al.*, 1989), 即使是最早堆晶形成的辉石橄榄岩的 Os 同位素比值(0.245)也明显高于地幔橄榄岩。这么富含放射性成因 Os 的特征只能是母岩浆在侵位到地壳之后被地壳物质混染所致。理由如下: Os 是强相容元素, 而 Re 是中等程度不相容元素, 这种地球化学性质的巨大差别使得 Os 在地幔熔融过程中主要残留在地幔岩中, 而 Re 则主要进入玄武质熔体, 导致地幔岩具有很低的 Re/Os 比值, 而地壳具有很高的 Re/Os 比值。随着时间演化, 地幔岩具有很低的 Os 同位素比值 (<0.13; 比球粒陨石还要低), 而地壳岩石(尤其老地壳)具有很高的 Os 同位素比值(太古代基性麻粒岩可达 80 以上, TTG 也达 5 ~ 10; Burton *et al.*, 2000; Chesley *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2009)。重要的是, 地幔岩由于具有很高的 Os 含量(平均 3200×10^{-12} ; Walker *et al.*, 1989), 远高于任何交代介质的 Os 含量($1 \times 10^{-12} \sim 100 \times 10^{-12}$; Chesley *et al.*, 2004), 使得地幔橄榄岩的 Os 同位素体系不会受到任何后期地幔交代作用的影响而保持很低的 Os 同位素比值, 这已经被大量地幔橄榄岩 Os 同位素数据所证实(Walker *et al.*, 1989; Reisberg and Lorand, 1995)。所以, 白石泉镁铁-超镁铁岩的高放射性 Os 同位素比值反映了其母岩浆在侵位过程中(而不是在地幔源区)被地壳物质强烈混染。

(3) 从 Os 同位素与 Sr-Nd 同位素相关性(图 6)可以看出, 白石泉杂岩体的 Os 同位素比值与 Sr 同位素比值成正相关, 而与 Nd 同位素比值呈反相关。这与其母岩浆侵位过程中被地壳物质混染的结论是一致的, 因为地壳物质具有较高的 Sr 同位素比值和较低的 Nd 同位素比值。

综上所述, 白石泉杂岩体的母岩浆在侵位过程中受到地壳物质的显著混染, 这与 Tang *et al.* (2012) 的研究一致, 而与以往多数研究认为的没有地壳混染的结论(柴凤梅等, 2007; 李金祥等, 2007)截然不同。

5.2 地幔源区特征

柴凤梅等(2007)和李金祥等(2007)对白石泉杂岩体的不同岩石类型做了许多岩石化学分析, 一致认为其原始岩浆应该是来自地幔的高镁玄武质岩浆, 这对其 Cu-Ni 矿化是有利的(Keays, 1995)。

如前所述, 白石泉杂岩体的特征是富集 LREE(图 4a)和大离子亲石元素(Rb、Th、Ba、Sr 等; 图 4b), 但亏损高场强元素(Nb、Ti 等; 图 4b)。其中 Sr 在 $100 \times 10^{-6} \sim 660 \times 10^{-6}$ 之间。这些特征表明该杂岩体的母岩浆来自一个曾被交代富集的地幔源区。

虽然我们的 Nd-Sr-Os 同位素数据一致表明白石泉杂岩体母岩浆在侵位过程中受到了显著的地壳混染, 但两个早期堆晶成因的辉石橄榄岩具有较低 Os 同位素比值, 其 Nd-Sr 同位素成分($I_{\text{Sr}} = 0.7032 \sim 0.7046$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.4 \sim 5.6$)应该最接近其地幔源区的 Nd-Sr 同位素成分。然而, 这两个橄榄岩的 Nd-Sr 同位素成分与亏损地幔类似, 这与白石泉杂岩体富集 LREE 和大离子亲石元素的不一致特征说明其母岩浆应该来自一个年轻的被交代富集的岩石圈地幔, 而这种交代富集事件显然与中亚造山带在古生代期间大规模的板片俯冲有关。由于俯冲带熔/流体对地幔交代富集事件的时间与该富集地幔发生熔融的时间(280Ma; 毛启贵等, 2006; 吴华等, 2005)相隔较近, 致使白石泉杂岩体虽然具有富集的微量元素特征, 但却基本保持了亏损地幔的同位素性质。这种现象在中亚造山带的碰撞后岩浆中非常普遍(Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005)。

从图 1 中可以看出, 白石泉杂岩体发育在中天山地块上(北部边缘)。中天山地壳一直被认为是具有前寒武的结晶基底(如元古宙的星星峡群和卡瓦布拉克群), 这显然与白石泉杂岩体所来自的年轻岩石圈地幔(具有类似亏损地幔的 Nd-Sr 同位素性质)相抵触, 因为古老岩石圈地幔起源的岩浆一般都富集放射性成因 Sr 而亏损放射性成因 Nd(负的 ϵ_{Nd}

值和较高的 I_{Sr} 值; Chen *et al.*, 2003; Chen and Zhai, 2003)。其原因可能有两种: 其一, 白石泉杂岩体可能不是发育在中天山地块上, 而是发育在其北部的古生代增生弧体系上; 其二, 中天山地块可能并非前寒武老地壳, 或者规模至少没有图 1 所示那么大。该问题显然是重要的, 有待于进一步同位素数据的积累来解决。

5.3 地球动力学背景

Xiao *et al.* (2004) 和毛启贵等 (2006) 认为包括白石泉岩体在内的东天山镁铁-超镁铁质岩体属于阿拉斯加型岩体, 其形成与晚石炭-早二叠期间古亚洲样板片俯冲形成的岛弧环境有关。然而, 典型的阿拉斯加型超镁铁岩体的母岩浆以富含流体 (H_2O 、 CO_2)、CaO 和高 CaO/Al_2O_3 比值为特征 (ankaramatic; Green *et al.*, 2004; Tian *et al.*, 2011), 主要造岩矿物是橄榄石、单斜辉石和角闪石, 而斜长石和斜方辉石稀少, 岩石类型以纯橄岩、单辉橄岩、单斜辉石岩和角闪石岩为主 (Himmelberg and Loney, 1995; Chen *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2011)。这似乎与白石泉杂岩体不太吻合, 后者主要造岩矿物是橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、斜长石和角闪石等, 岩石类型以二辉石橄岩、橄长岩、橄辉石岩 (二辉石岩)、角闪石岩、辉长岩和闪长岩为主 (柴凤梅等, 2007; 李金祥等, 2007)。我们认为白石泉杂岩体实际上是介于阿拉斯加型和布什维尔型镁铁-超镁铁岩之间的一种过渡类型, 因为布什维尔型杂岩体的母岩浆是相对“干”的, 形成于低压环境下的分离结晶作用, 主要矿物是橄榄石、斜方辉石和斜长石, 而单斜辉石和角闪石稀少, 主要岩石类型是纯橄岩、方辉橄岩和橄长岩等。

前人的岩石学研究 (柴凤梅等, 2007; 李金祥等, 2007) 和本文的同位素地球化学研究已经表明, 白石泉杂岩体的地幔源区是古生代期间才被俯冲带熔/流体交代富集的岩石圈地幔, 但该富集地幔并不是在被俯冲交代期间发生部分熔融, 而是在碰撞造山后的岩石圈伸展环境下形成了白石泉杂岩体 (以及东天山其它镁铁-超镁铁岩体; Qin *et al.*, 2003), 主要证据如下: (1) 东天山地区镁铁-超镁铁岩体通常是块状构造, 没有明显的变形; (2) 年代学研究表明, 这些幔源岩体主要形成于 280 ~ 290Ma, 与区域大规模玄武质岩浆作用 (包括塔里木和柳园地区) 几乎同时 (夏林圻等, 2004; 毛景文等, 2006), 也与该区大规模花岗质岩浆作用 (包括 A 型花岗岩和中酸性钙碱性花岗岩) 同时形成, 后者被多数人共识为碰撞后岩浆作用的产物 (Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000; Han *et al.*, 1997; Chen and Jahn, 2004; Chen *et al.*, 2005); (3) 区域地质和沉积碎屑 (相) 研究表明, 在晚石炭-早二叠期间, 包括北疆在内的大部分中亚地区已经没有了俯冲消减 (Feng *et al.*, 1989; Coleman 1989)。

6 结论

(1) 全岩 Nd-Sr 同位素和 Os 同位素成分一致表明, 与硫

化物矿床有关的白石泉镁铁-超镁铁杂岩体的母岩浆在侵位到地壳过程中被地壳物质显著混染;

(2) 白石泉杂岩体虽然分布在前寒武“中天山地块”之上 (北部), 但其地幔源区却是年轻的 (古生代)、被俯冲带熔流体交代的岩石圈地幔, 表明其源区可能是年轻的造山带之下的岩石圈地幔, “中天山地块”分布范围可能没有之前认为的那么大;

(3) 白石泉杂岩体属于阿拉斯加型和布什维尔型之间的过渡类型超镁铁杂岩体, 形成于碰撞后造山之后的岩石圈伸展阶段。

References

- Burton KW, Capmas F, Bireck JL, Allègre CJ and Cohen AS. 2000. Resolving crystallization ages of Archean mafic-ultramafic rocks using the Re-Os isotope system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179 (3 - 4): 453 - 467
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Zhang ZH, Ye HS, Wu H and Mo XH. 2006. Petrography and mineralogy of the Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (1): 1 - 12 (in Chinese with English abstract)
- Chai FM, Zhang ZC, Dong LH, Zhang ZH, Wu H and Li J. 2007. Geochemistry and petrogenesis of the Baishiquan Cu-Ni-sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the central Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2366 - 2378 (in Chinese with English abstract)
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Mao JW, Dong LH, Zhang ZH and Wu H. 2008. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China: Implications for tectonics and genesis of ores. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32 (2 - 4): 218 - 235
- Chen B and Zhai MG. 2003. Geochemistry of Late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, North China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140 (1): 87 - 93
- Chen B, Jahn BM and Zhai MG. 2003. Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, north China craton, and implications for Archean lithosphere thinning. *J. Geol. Soc., London*, 160 (6): 963 - 970
- Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *J. Asian Earth Sciences*, 23 (5): 691 - 703
- Chen B and Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69 (5): 1307 - 1320
- Chen B, Suzuki K, Tian W, Jahn BM and Ireland T. 2009. Geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of the Gaositai Alaskan-type ultramafic complex from northern North China Craton: Implications for mantle-crust interaction. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 158: 683 - 702
- Chesley J, Righter K and Ruiz J. 2004. Large-scale mantle metasomatism: A Re-Os perspective. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219 (1 - 2): 49 - 60
- Coleman RG. 1989. Continental growth of northwestern China. *Tectonics*, 8 (3): 621 - 635
- Feng Y, Coleman RG, Tilton G and Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8 (4): 729 - 752
- Green DH, Schmidt MW and Hibberson WO. 2004. Island-arc ankaramites: Primitive melts from fluxed refractory lherzolitic

- mantle. *Journal of Petrology*, 45 (2): 391 – 403
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ and Tang JH. 2007. Permian geology, mineralization, and thermal activities in the Huangshan-Jingerquan, East Tianshan: Intrusion of mantle-derived magma and its effect on crust. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (11): 2869 – 2880 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chem. Geol.*, 138 (3): 135 – 159
- Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Ao SJ, Zhang J, Qu WJ and Du AD. 2010. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the timing and genesis of the mineralization. *Lithos*, 120(3–4): 547 – 562
- Himmelberg GR and Loney RA. 1995. Characteristics and petrogenesis of Alaskan-type ultramafic intrusions, southern Alaska. *US Geological Survey*, 1564: 1 – 47
- Jahn BM, Wu F and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Trans. Royal Soc., Edinburgh: Earth Sci.*, 91: 181 – 193
- Keays RR. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. *Lithos*, 34: 1 – 18
- Li JX, Qin KZ, Xu XW, Sun H, Cheng SL, Wu H and Mo XH. 2007. The Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan, Xinjiang: Geochemistry and implications for mineralization and tectonic setting. *Mineral Deposits*, 26(1): 43 – 57 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006. Studies on the mechanism of continental growth in the northern Xinjiang and adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 80 (1): 148 – 168. (in Chinese with English abstract)
- Li YC, Zhao GC, Qu WJ, Pan CZ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotopes of the Xiangshan Cu-Ni deposits in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 245 – 251 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Yang JM, Han CM and Wang ZL. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang. *Earth Sciences*, 27 (4): 413 – 442 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Pirajno FP, Zhang ZH, Chai FM, Yang JM, Wu H, Chen SP, Cheng SL and Zhang CQ. 2006. Late Variscan post-collisional Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan and Altay in China: Principal characteristics and possible relationship with mantle plume. *Acta Geologica Sinica*, 80 (7): 925 – 942 (in Chinese with English abstract)
- Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li JL, Yong H and Zhang JN. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang Province: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 153 – 162 (in Chinese with English abstract)
- Naldrett AJ. 1999. World-class Cu-Ni-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227 – 240
- Qin KZ, Zhang LC, Xiao WJ, Xu XW, Yan Z and Mao JW. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, northwestern China. In: Mao JW, Goldfarb RJ, Seltman R, Wang D, Xiao W and Hart C (eds.). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. London: Geological Society London Special Publication, 227 – 249
- Qin KZ, Peng XM, San JZ, Xu XW, Fang TH, Wang SL and Yu HF. 2003. Main deposit types, division of ore-formation belts and targeting of possible deposits. *Xinjiang Geology*, 21(2): 143 – 150 (in Chinese with English abstract)
- Reisberg L and Lorand JP. 1995. Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature*, 376(6536): 159 – 162
- Roy-Barman M. 1993. Mesure du rapport $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ dans les basaltes et les peridotites: Contribution a la systematique ^{187}Re - ^{187}Os dans le manteau. Ph. D. Dissertation. Paris: Université de Paris VII
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299 – 307
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67 (13): 2136 – 2141
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42(1): 313 – 345
- Suzuki K, Miyata Y and Kanazawa N. 2004. Precise Re isotope ratio measurements by negative thermal ionization mass spectrometry (NTI-MS) using total evaporation technique. *International Journal of Mass Spectrometry*, 235 (1): 97 – 101
- Tang DM, Qin KZ, Sun H, Su BX and Xiao QH. 2012. The role of crustal contamination in the formation of Ni-Cu sulfide deposits in Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwest China: Evidence from trace element geochemistry, Re-Os, Sr-Nd, zircon Hf-O, and sulfur isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 145 – 160
- Tian W, Chen B, Ireland TR, Green DH, Suzuki K and Chu Z. 2011. Petrology and geochemistry of dunites, chromitites and mineral inclusions from the Gaositai Alaskan-type complex, North China Craton: Implications for mantle source characteristics. *Lithos*, 127 (1–2): 165 – 175
- Walker RJ, Carlson RW, Shirey SB and Boyd FR. 1989. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1583 – 1595
- Wang JB, Wang YW and He ZJ. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China. *Chinese Geology*, 33 (3): 461 – 469 (in Chinese with English abstract)
- Wu H, Li HQ, Mo XH, Chen FW, Lu YF, Mei YP and Deng G. 2005. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79 (4): 498 – 502 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 2004. The Carboniferous large igneous province in the Tianshan Mountains and mantle plum. *Acta Geologica Sinica*, 23 (9): 903 – 910 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370 – 395
- Xiong XL, Cai ZY, Niu HC, Chen YB, Wang Q, Zhao ZH and Wu JH. 2005. Petrogenesis of the Late Paleozoic adakitic rocks from East Tianshan and implications for Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 967 – 976 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Qin KZ and Ying JF. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rocks in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259 – 268 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡, 叶会寿, 吴华, 莫新华. 2006. 中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 1 – 12
- 柴凤梅, 张招崇, 董连慧, 张作衡, 吴华, 李军. 2007. 新疆中天山白石泉含铜镍矿镁铁-超镁铁质岩体地球化学特征与岩石成因. *岩石学报*, 23(10): 2366 – 2378

- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 唐俊华. 2007. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应. 岩石学报, 23(11): 2869-2880
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 孙赫, 程松林, 吴华, 莫新华. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约. 矿床地质, 26(1): 43-57
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148-168
- 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 潘成泽, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定. 岩石学报, 22(1): 245-251
- 毛景文, 杨健民, 韩春明, 王志良. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型. 地球科学, 27(4): 413-442
- 毛景文, Pirajno FP, 张作衡, 柴凤梅, 杨建民, 吴华, 陈世平, 程松林, 张长青. 2006. 天山-阿勒泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系. 地质学报, 80(7): 925-942
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. 岩石学报, 22(1): 153-162
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 徐兴旺, 方同辉, 王书来, 于海峰. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选. 新疆地质, 21(2): 143-150
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪. 中国地质, 33(3): 461-469
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓刚. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义. 地质学报, 79(4): 498-502
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质学报, 23(9): 903-910
- 熊小林, 蔡志勇, 牛贺才, 陈义兵, 王强, 赵振华, 吴金花. 2005. 东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义. 岩石学报, 21(3): 967-976
- 张连昌, 秦克章, 英基丰. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 259-268