

顾玉超, 贾斌, 余昌涛, 等. 内蒙古大座子山铜多金属矿火山岩地球化学、Sr-Nd 同位素特征及地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 432-445.
Gu Yuchao, Jia Bin, Yu Changtao, et al. Geochemistry and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks in the Dazuo-zishanin copper polymetallic deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 432-445(in Chinese with English abstract).

内蒙古大座子山铜多金属矿火山岩地球化学、 Sr-Nd 同位素特征及地质意义

顾玉超^{1,2} 贾斌² 余昌涛² 张春晖² 时溢² 李玉鹏³ 丛龙江⁴

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
3. 吉林省地质调查院, 吉林 长春 130061; 4. 内蒙古恒久矿业有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 文章系首次报道大座子山铜多金属矿火山岩特征。矿区位于华北地台北缘, 西拉木伦河深大断裂和少郎河深大断裂之间, 矿区流纹岩、粗面岩与成矿密切相关。流纹岩 SiO₂ 含量 74.93%~76.36%, Al₂O₃ 含量 11.22%~11.70%, 较为富碱, K₂O/Na₂O 为 1.29~1.54; 粗面岩 SiO₂ 含量 65.52%~68.04%, Al₂O₃ 含量 15.05%~16.38%, 富碱, K₂O/Na₂O 为 0.85~1.64。两种岩石均属于准铝-弱过铝系列。流纹岩属高钾钙碱性系列; 粗面岩属高钾钙碱性-钾玄岩系列。两种火山岩稀土配分整体呈右倾趋势, 流纹岩强烈 Eu 负异常, 粗面岩 Eu 呈弱正异常特征。除 Ba、Sr、Ti 等明显低于粗面岩外, 流纹岩其他微量元素含量均与粗面岩相当, 呈富集大离子亲石元素(LILE), 亏损高场强元素(HFSE)特征。两种岩石具有类似的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)和(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)初始比值, 分别介于 0.7046~0.7063 和 0.5119~0.5122 (*t*=155 Ma), $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -4.24 ~ -10.37, 同为存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类经重熔作用而形成。大座子山流纹岩、粗面岩形成的构造环境是造山期后伸展条件的板内环境, 即在晚侏罗世(150~160 Ma)受到了蒙古-鄂霍次克海“剪刀式”闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响, 由存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类熔融而形成的一套高钾钙碱性-钾玄岩系列的火山岩。

关键词: 地球化学; 下地壳重熔; 造山期后伸展; 大座子山铜多金属矿

中图分类号: P611; P597; P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)02-0432-14

Geochemistry and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks in the Dazuo-zishanin copper polymetallic deposit, Inner Mongolia, and their geological implications

GU Yu-chao^{1,2}, JIA Bin², YU Chang-tao², ZHANG Chun-hui²,
SHI Yi², LI Yu-peng³, CONG Long-Jiang⁴

(1. *China University of Geosciences (Beijing), School of Earth Sciences and Resources, Beijing 100083, China*; 2. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, China*; 3. *Jilin Institute of Geological Survey, Changchun*

收稿日期: 2015-01-19; 改回日期: 2015-05-19

基金项目: 国土资源公益性行业科研专项经费(201311018)资助。

作者简介: 顾玉超, 男, 1986年生, 博士生, 助理工程师, 从事矿床学和岩石学研究; Email: guyi1224@126.com。

通讯作者: 贾斌, 男, 1957年生, 博士, 研究员, 从事火山岩和矿床方面科研工作; Email: syjbin2728@163.com。

130061 China; 4. Heng-Jiu Mines Co., Ltd., of Inner Mongolia, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper first reports the characteristics of volcanic rocks in the Dazuoizishan copper polymetallic deposit of Inner Mongolia. The deposit is located on the northern margin of the North China Platform, between Sila Mulun River great fault and Shaolang River great fault. The rhyolites and trachytes in the deposit are closely related to the mineralization. The rhyolites contain 74.93%–76.36% of SiO₂ and 11.22%–11.70% of Al₂O₃. The rhyolites exhibit slightly alkali-rich form and the ratio between K₂O and Na₂O is approximately between 1.29 and 1.54. Meanwhile, the trachytes contain 65.52%–68.04% of SiO₂ and 15.05%–16.38% of Al₂O₃. They are of the alkali-rich type and the ratio between K₂O and Na₂O is approximately between 0.85 and 1.64. Both of the two rocks belong to the metaluminous-weak peraluminous series. Meanwhile, the rhyolites belong to the high potassium calc alkali series. The trachytes, on the other hand, belong to the high potassium calc alkali ~ shoshonite series. The rare earth element (REE) patterns of these two volcanic rocks are generally rightly-inclined. The rhyolites show strong Eu negative anomaly, while the trachytes show weak Eu positive anomaly. Except the elements of Ba, Sr and Ti whose values are notably lower in rhyolites than in trachytes, the trace elements in these two rocks are comparable in composition. In addition, they are both enriched in LILE and are depleted in HFSE. These two rocks have similar initial ratios of (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr), and (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd). The ratio of (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) is approximately between 0.7046 and 0.7063, while the ratio of (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd) is between 0.5119 and 0.5122 (*t*=155 Ma), and ε_{Nd}(*t*) is in the range of -4.24 to -10.37. These two rocks are the products of the anatexis of plagioclase amphibolite in the middle Proterozoic lower crust. The environment for the formation of the rhyolites and the trachytes in the Dazuoizishan ore district is the intraplate environment of post-orogenic extension. In other words, under the condition of the post-orogenic extension of Mongolia-Okhotsk scissor-type closed orogeny and lithospheric thinning in late Jurassic (150–160 Ma), the anatexis of plagioclase amphibolite in the middle Proterozoic lower crust formed the volcanic rocks of metaluminous-weakly peraluminous series.

Key words: geochemistry, anatexis of lower crust; post-orogenic extension; Dazuoizishan copper polymetallic deposit

About the first author: GU Yu-chao, male, born in 1986, assistant engineer, master, doctor candidate, engages in the study of mineral deposits and regional metallogeny; E-mail: guyi1224@126.com.

About the corresponding author: JIA Bin, male, born in 1957, senior researcher, doctor, engages in the study of volcanic rocks and mineral deposits; E-mail: syjbin2728@163.com.

Fund support: Supported by Land And Resources for Public Sector Research and Special Funds (No. 201311018).

大座子山铜多金属矿位于内蒙古翁牛特旗毛山东乡油房村东,地理坐标为东经 118°22′~118°24′,北纬 42°54′~42°57′。1980—1982 年原冶金一公司物探队在本区开展 1:5 万分散流测量时陆续发现大座子山、油房西、二把伙等诸多异常。华北地质勘查局综合普查大队对大座子山铜多金属矿进行了较为详细的勘查工作^①。大座子山铜多金属矿与二把伙和油房西银多金属矿处于同一构造单元,尤其是与油房西银多金属矿仅有苇塘河一河之隔,矿床特征和成矿条件存在相似之处。诸多学者认为该区域矿床与火山-次火山热液作用有关,发育在燕山晚期层状火山岩的岩浆穹窿构造之中,成矿受北西向断裂构造和火山机构双重控制,并在深部发现斑岩型矿床的蚀变特征^[1-4]。

本文以与大座子山成矿密切相关的火山岩为

研究对象,通过野外地质和岩相学,岩石地球化学、Sr-Nd 同位素等实验方法,对火山岩的岩浆源区及矿床成因、大地构造背景等问题进行探讨。

1 区域地质概况和岩相学特征

研究区处于华北地台北缘温都尔庙—翁牛特旗加里东地槽褶皱带,东西向西拉木伦河深大断裂和少郎河深大断裂之间,敖包梁岩体西侧之西毛卜罗—二把伙背斜的核部。与成矿有关地层为晚侏罗世满克头鄂博组(J₃mk)。满克头鄂博组火山岩主要由流纹岩、英安岩、粗安岩、粗面岩及玄武安山岩等组成,通过锆石 U-Pb 年代学测定流纹岩的年龄为 (156±2) Ma (*n*=24)^[5],学者普遍认为其形成于板块内部造山后的伸展环境^[6-14]。区域内岩浆活动强烈,敖包梁杂岩体是燕山晚期的主要侵入体,是区

①华北地质勘查局综合普查大队.大座子山铜多金属矿储量核实报告[R].2011.

域内岩浆活动中心,控制着与火山作用有关的矿产形成与分布,由花岗岩、中酸性浅成-超浅成小型斑岩体群构成。本区为东西向古构造体系与NEE、NE向构造体系交汇地区,构造复杂,是找矿的有利地段。其总的构造轮廓是以东西向西拉木伦河断裂为基础格架,中生代构造岩浆活动又在其上叠加了一套NE、NEE向隆起和火山沉积盆地。

勘查区内NW向断裂构造为其控矿和赋矿构造,表现为压性或压扭性破碎带,宽度4~10 m。断层多呈NE和SW向倾斜,具断层角砾和光滑的断层擦痕。岩浆岩在勘查区内不甚发育,仅在勘查区的北部及南东角有晚侏罗世粗安岩和早白垩世花岗斑岩出露,侵入于满克头鄂博组地层中,受NE向构造体系控制呈NE向展布。矿区围岩蚀变随矿体呈线性展布,主要以绢云母化、硅化、黄铁矿化为主,与成矿关系密切。硅化、绢云母化表现为石英、绢云母呈细粒或鳞片状交代原岩矿物并与金属矿物伴生(图1)。

勘查区内地层主要有上侏罗统满克头鄂博组(J_3mk)流纹质晶屑凝灰岩、流纹质火山角砾岩、流纹岩和粗面岩。本次研究采集样品主要为与成矿更为密切相关的流纹岩和粗面岩(图2-a-b)。流纹岩(图2-c)呈斑状结构,基质为微粒结构,斑晶含量2%~5%。矿物成分主要为钾长石,其次为石英,有的斑晶边界被熔蚀呈港湾状。基质由微粒状长英质矿物组成。岩石薄片可见有微细的石英脉及似脉状的方解石。粗面岩(图2-d):呈斑状结构,基质为粗面结构。斑晶主要为斜长石、碱性长石,其次为角闪石和少量黑云母,偶尔见有石英。斑晶斜长石呈半自形-自形晶,柱状或板状,多具较细密的聚片双晶,部分具环带构造,推测为中-更长石。角闪石斑晶多已绿泥石化并析出铁质组分,多以柱状或呈六边形出现。黑云母斑晶数量很少,多已蚀变并析出铁质组分。基质主要由条状斜长石微晶及少量已脱玻化的玻璃质组成,斜长石微晶大致呈定向排列。

2 样品采集及测试方法

样品DS200-14、15和DS202-5、6、7、11、18分别采集于大座子山铜多金属矿钻孔ZK002和ZK11-2岩心;样品DS203-1采集于矿井;DS205-

1、DS206-2采集于大座子山顶;DS207-3采集于大座子山老平硐。实验均选取新鲜且后期无热液活动的样品,元素后期受蚀变作用影响较小,可以依此讨论火山岩的源区特征、构造环境等相关问题。

样品的主量、微量元素分析在国土资源部东北矿产资源监督测试中心完成。主量元素分析采用压片法X射线荧光光谱法(XRF),分析精度和准确度优于5%;微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),分析精度和准确度优于10%。

全岩Sr-Nd同位素分析在北京核工业地质研究院分析测试研究中心采用ISOPROBE-T热电质谱计完成,检测方法依据EJ/T692-1992《岩石矿物铷锶等时年龄测定》。Rb、Sr质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 校正,标准测量结果:NBS987为 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.710250\pm 7$,全实验流程本底为 2×10^{-10} g;Sm、Nd质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,标准测量结果:JMC为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512109\pm 3$,全实验流程本底小于 5×10^{-11} g。计算 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 过程中, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{U.R.}}=0.7045$, $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{U.R.}}=0.0827$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$ 。计算 T_{DM} 过程中, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$ 和 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$ 分别为亏损地幔现今的同位素比值,用大洋中脊玄武岩(MORB)代表,其值采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2135^{[15]}$ 。

3 实验结果和分析

3.1 主量元素

大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩(图3-a)主量元素特征见表1。流纹岩以高硅(SiO_2 74.93%~76.36%,平均75.63%)、富碱($(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 8.19%~8.67%,平均8.43%)、低铝(Al_2O_3 11.22%~11.70%)、低镁(MgO 0.004%~0.065%)、低钙(CaO 0.20%~0.39%)为特征。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为在1.29~1.54,较为富钾; TiO_2 含量为0.19%~0.22%,属低Ti流纹岩类^[8,16]。需要指出是,大座子山粗面岩较为特殊,较其他粗面岩更加偏酸性,但根据CIPW标准矿物计算结果,石英Q含量均低于20%,并且镜下长石具定向排列特征,因此将该火山岩定名为粗面岩是可靠的。粗面岩 SiO_2 含量65.52%~68.04%,平均66.55%; Al_2O_3 含量较高,在15.05%~16.38%;碱质($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为8.80%~10.20%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为0.85~1.64。



图1 大座子山铜多金属矿综合地质图
(据资料①修改)

Fig. 1 Comprehensive geological map of the Dazuozi Mountain copper polymetallic ore deposit (modified after reference①)

流纹岩 A/CNK 在 0.94~1.06,粗面岩 A/CNK 在 0.92~1.08,两种岩石均属于准铝-弱过铝系列。流纹岩在 SiO₂-K₂O 图解上位于高钾钙碱性系列区,粗面岩位于高钾钙碱性-钾玄岩系列(图 3-b)。流纹岩岩石分异程度较高,DI 指数为 92.93~95.46;粗面岩分异程度较流纹岩低,DI 指数为 81.36~88.48。

3.2 微量元素

在原始地幔标准化配分图解上(图 4-a),流纹

岩、粗面岩微量元素分布呈现整体右倾形态。粗面岩富集 Rb、Ba、Th、U、K、La 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE);流纹岩同样富集 Rb、Th、U、K、La 等大离子亲石元素,但是 Ba 强烈亏损,Sr、P、Ti 含量与原始地幔相当,部分样品甚至略低于原始地幔值,除 Ba、Sr、P、Eu、Ti 明显低于粗面岩外,流纹岩其他微量元素含量均与粗面岩相当,且趋势呈高度的正相关性,暗

①华北地质勘查局综合普查大队. 大座子山铜多金属矿储量核实报告[R]. 2011.

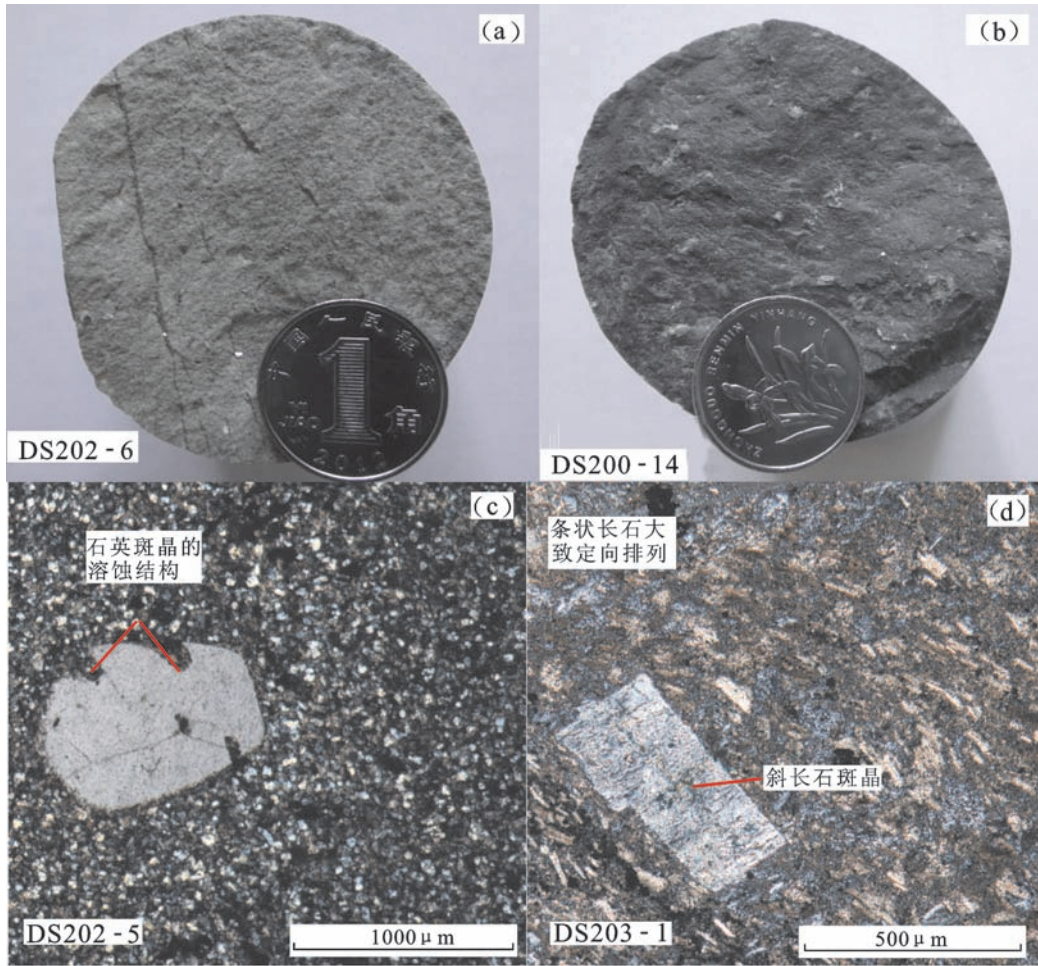


图2 大座子山流纹岩、粗面岩岩心样品特征和镜下特征

Fig. 2 Photographs and microscope photographs of rhyolite and trachyte from the Dazuoizshan copper polymetallic ore deposit

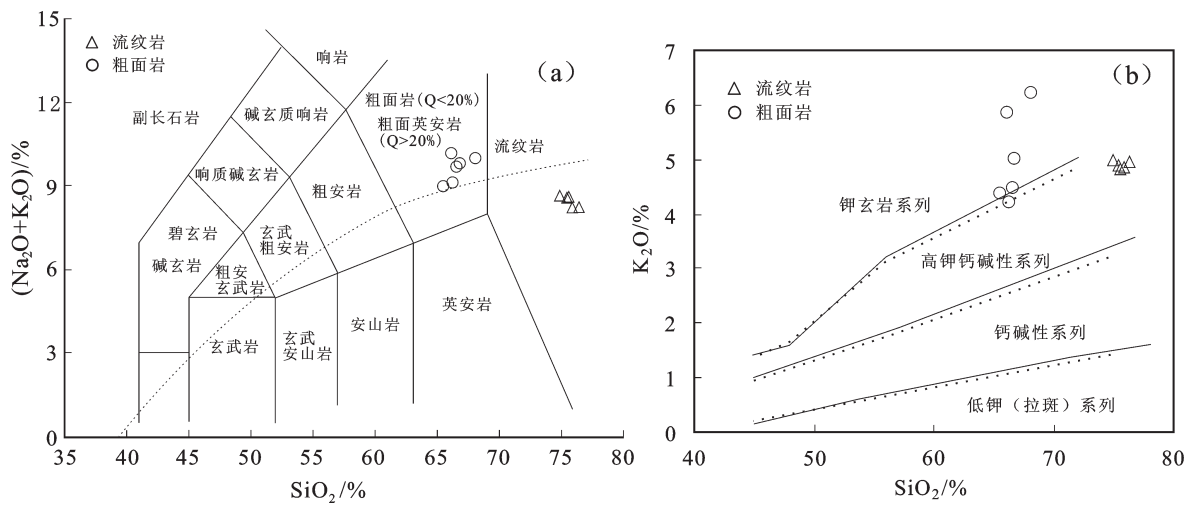


图3 大座子山铜多金属矿火山岩TAS分类图解(a)^[17]、SiO₂-K₂O图解(b)^[18]

Fig. 3 TAS volcanic rock classification diagram (a)^[17] and SiO₂-K₂O diagram (b)^[18] of volcanic rocks from the Dazuoizshan copper polymetallic ore deposit

表1 大座子山铜多金属矿区流纹岩、粗面岩主量元素含量(%)

Table 1 Major element compositions of rhyolite and trachyte from the Dazuoizhishan copper polymetallic ore deposit (%)

分析项目	DS200-14	DS200-15	DS202-5	DS202-6	DS202-7	DS202-11	DS202-18	DS203-1	DS205-1	DS206-2	DS207-3
	粗面岩	粗面岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩
SiO ₂	66.18	66.77	75.44	74.93	75.54	75.90	68.04	65.52	76.36	66.23	66.54
TiO ₂	0.85	0.84	0.21	0.20	0.20	0.19	0.85	0.72	0.22	0.67	0.70
Al ₂ O ₃	15.05	15.20	11.35	11.43	11.28	11.22	15.08	16.38	11.70	16.06	16.28
Fe ₂ O ₃	1.59	1.19	1.09	1.48	1.54	0.66	0.30	2.76	1.96	2.57	2.76
FeO	2.52	2.97	1.93	1.84	1.71	2.52	3.35	1.53	0.31	1.48	1.04
MnO	0.12	0.12	0.12	0.09	0.09	0.10	0.18	0.09	0.02	0.13	0.07
MgO	0.32	0.36	0.02	0.00	0.01	0.04	0.24	0.49	0.07	0.56	0.30
CaO	1.59	1.37	0.32	0.39	0.34	0.37	0.57	2.40	0.20	2.28	1.19
Na ₂ O	4.33	4.81	3.65	3.68	3.73	3.35	3.78	4.43	3.22	4.78	5.23
K ₂ O	5.88	5.01	4.90	4.99	4.83	4.85	6.24	4.38	4.97	4.21	4.49
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.02	0.02	0.01	0.01	0.16	0.19	0.02	0.19	0.19
LOI	0.90	0.61	0.61	0.62	0.42	0.36	0.48	0.64	0.80	0.44	0.81
Total	99.50	99.41	99.64	99.67	99.69	99.57	99.27	99.52	99.82	99.60	99.59
Na ₂ O+K ₂ O	10.20	9.82	8.54	8.67	8.56	8.19	10.02	8.80	8.19	8.99	9.72
K ₂ O/Na ₂ O	1.36	1.04	1.34	1.36	1.29	1.45	1.65	0.99	1.54	0.88	0.86
A/CNK	0.92	0.96	0.95	0.94	0.94	0.98	1.08	1.00	1.06	0.97	1.04
DI	87.08	86.44	94.54	94.40	94.51	92.93	88.48	81.36	95.46	82.73	88.00

注:A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)摩尔比,DI(标准矿物组分:石英+正长石+钠长石+霞石+石榴石+六方钾霞石),据文献[19]。

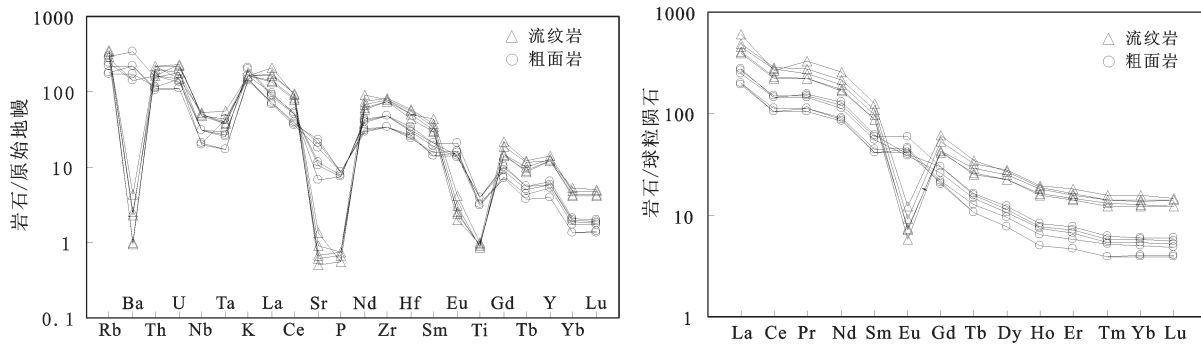


图4 大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩微量元素原始地幔标准化配分图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)(标准值据文献[21])

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of rhyolite and trachyte from the Dazuoizhishan copper polymetallic ore deposit (chondrite and primitive mantle normalized data after reference [21])

示其为同一物质熔融的产物^[20]。

3.3 稀土元素

大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩微量元素含量见表2。在球粒陨石标准化图解上(图4-b)呈

显著右倾趋势,轻稀土明显富集,LREE/HREE为16.09~20.57。流纹岩稀土总量ΣREE为365.0×10⁻⁶~506.0×10⁻⁶,δEu为0.094~0.137,强烈Eu负异常,δCe为0.603~0.801,呈弱负异常;粗面岩稀土总量较流

表2 大座子山铜多金属矿区流纹岩、粗面岩微量元素、稀土元素含量(10^{-6})
 Table 2 Trace element and REE compositions of rhyolite and trachyte from the Dazuoizhan copper polymetallic ore deposit(10^{-6})

分析项目	DS200-14	DS200-15	DS202-5	DS202-6	DS202-7	DS202-11	DS202-18	DS203-1	DS205-1	DS206-2	DS207-3
	粗面岩	粗面岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩
La	59.62	66.17	91.89	95.40	109.71	117.09	63.22	47.68	141.12	47.65	46.40
Ce	89.53	89.53	137.69	143.15	166.81	171.85	93.10	65.23	164.85	68.35	64.61
Pr	13.77	14.80	21.15	21.13	23.77	25.90	14.40	10.66	31.80	10.54	10.01
Nd	52.71	59.65	79.23	81.94	89.96	99.81	57.02	42.82	120.60	41.24	39.55
Sm	8.52	9.45	13.35	13.46	14.80	16.49	9.06	6.78	19.22	6.39	6.29
Eu	2.25	2.35	0.33	0.43	0.41	0.52	3.47	2.70	0.70	2.36	2.61
Gd	5.42	6.07	8.78	8.55	8.81	11.02	6.12	4.51	12.79	4.27	4.17
Tb	0.54	0.61	0.95	0.98	1.06	1.22	0.59	0.47	1.28	0.40	0.40
Dy	2.74	3.12	5.69	5.73	6.29	6.97	2.94	2.39	6.75	1.96	1.93
Ho	0.42	0.47	0.90	0.91	1.01	1.10	0.44	0.37	1.05	0.29	0.29
Er	1.09	1.27	2.34	2.41	2.63	2.98	1.20	0.97	2.73	0.78	0.78
Tm	0.14	0.16	0.31	0.33	0.36	0.40	0.15	0.13	0.36	0.10	0.10
Yb	0.91	1.02	2.09	2.14	2.36	2.66	0.98	0.86	2.41	0.68	0.67
Lu	0.13	0.15	0.31	0.32	0.36	0.38	0.14	0.12	0.35	0.10	0.10
ΣREE	237.8	254.8	365.0	376.9	428.3	458.4	252.8	185.7	506.0	185.1	177.9
LREE/HREE	19.87	18.80	16.09	16.65	17.72	16.16	19.12	17.91	17.25	20.57	20.08
δ Eu	1.01	0.95	0.09	0.12	0.11	0.12	1.43	1.49	0.14	1.38	1.56
δ Ce	0.77	0.70	0.77	0.78	0.80	0.77	0.76	0.71	0.60	0.75	0.74
Cr	6.85	10.29	5.61	5.77	6.81	6.79	1.73	4.02	5.51	5.77	1.60
Rb	178	152	227	230	229	185	189	116	218	110	137
Sr	241	220	13	14	11	28	146	483	19	440	378
Y	26.4	29.0	55.8	55.4	58.5	54.3	26.4	24.4	63.1	18.0	17.5
Nb	21.7	21.6	35.3	34.9	35.0	37.5	21.9	15.1	36.4	14.4	14.8
Cs	3.88	3.19	3.25	3.10	3.08	1.63	5.38	4.77	2.17	2.81	4.12
Ba	1000	1000	16.24	6.57	17.59	6.82	2400	1500	31	1200	1500
Ta	1.08	1.18	1.61	1.51	1.78	2.25	1.02	0.69	1.55	0.71	1.78
Th	14.1	14.2	18.4	17.1	13.9	18.7	13.5	9.4	18.7	9.7	9.1
U	3.12	2.82	4.61	3.72	4.92	3.17	3.78	2.35	4.75	3.05	2.34
Zr	528	526	844	829	871	928	527	387	879	382	383
Hf	9.15	9.52	13.39	15.26	17.18	18.37	10.77	7.58	15.30	7.87	8.10

纹岩低, ΣREE 为 $177.9 \times 10^{-6} \sim 254.8 \times 10^{-6}$, δCe 为 0.701~0.766, 但是 Eu 显示弱正异常, δEu 值在 0.948~1.556, 印证了分异指数较低, 残留相斜长石较少, 并且与残留相中的角闪石、紫苏辉石和石榴石有密切关系。两种岩石稀土元素配分曲线趋势除了 Eu 以外呈高度相关, 表明两者存在一定的演化

关系。

从流纹岩的岩石学和主量、微量元素特征分析, 应为大兴安岭中生代两类流纹岩中的 II 型流纹岩^[9]、低 Ti 流纹岩^[8], 与 I 型花岗岩(低 Ti 流纹岩)相比, 高 K_2O 、低 CaO 、 MgO ; Rb 含量极高, Ba、Sr 元素强烈亏损, 具高 Rb/Sr 比值, 并具有强烈的 Eu 负异

常。此类流纹岩具有与大陆裂谷流纹岩一致的不相容元素和稀土元素分布模式,并与碱性系列玄武岩类构成地球化学双峰式火山岩组合。

3.4 Sr、Nd同位素

杨扬等对赤峰地区晚侏罗世满克头鄂博组(J_3mk)流纹岩和粗安质熔结凝灰岩进行了锆石U-Pb测年,其结果分别为 $(156\pm 2)Ma$ ($n=24$)和 $(157\pm 3)Ma$ ($n=19$)^[5],大座子山铜多金属矿流纹岩与杨扬选取的流纹岩属同期火山岩,且岩石学特征非常相近,因此以155 Ma作为大座子山铜多金属矿火山岩体的主成岩年龄,来计算粗面岩、流纹岩的Sr、Nd同位素初始比值及相关参数。本文所研究火山岩的 $f_{Sm/Nd}$ 平均在-0.5左右,而且 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值小于0.13,因此对Sm-Nd同位素模式年龄 T_{Dm} 的计算采用单阶段模式^[22]。

大座子山铜多金属矿粗面岩、流纹岩Sr-Nd同位素组成和测定结果和计算结果见表3。流纹岩现今的 $^{87}Rb/^{86}Sr$ (20.3823~23.5431)、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7496~0.7583)远高于粗面岩的 $^{87}Rb/^{86}Sr$ (0.7623~3.2751)、

$^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7068~0.7134),2种岩石极高的 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值(全球平均0.09)显示了该区域成熟大陆壳的特征;而2种岩石 $^{147}Sm/^{144}Nd$ (0.0883~0.1081)、 $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0.5120~0.5123)现今比值较为接近。两种岩石具有类似的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 和 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 初始比值,分别介于0.7046~0.7063和0.5119~0.5122($t=155Ma$), $\epsilon_{Nd}(0)$ 为-6.20~-12.17, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为-4.24~-10.37。 $f_{Sm/Nd}$ 在-0.450~-0.552,2种火山岩均显示具有大陆岩石圈特征^[23]。Nd同位素模式年龄 T_{Dm} 为1090~1597 Ma。

4 讨论

4.1 岩浆源区特征和岩石成因

为了讨论大座子山铜多金属矿火山岩岩浆源区的特征,首先要排除岩浆在上升侵位过程中的同化混染作用。岩浆演化过程中的结晶分异作用对Sr同位素组成影响很小,因此若岩浆受到其他物质混染作用, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 与 $1/Sr$ 、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 $1/Nd$ 会呈正相关关系^[24]。大座子山粗面岩在 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i-1/Sr$ 和 $\epsilon_{Nd}(t)-1/Nd$ 协变图解上(图5-a-b), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 不随 $1/$

表3 大座子山铜多金属矿区粗面岩、流纹岩Sr-Nd同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of rhyolite and trachyte from the Dazuozishan copper polymetallic ore deposit

分析项目	DS200-14	DS201-14	DS202-11	DS202-14	DS202-16	DS202-18	DS203-1	DS205-1	DS206-2
	粗面岩	粗面岩	流纹岩	粗面岩	粗面岩	粗面岩	粗面岩	流纹岩	粗面岩
Rb/ 10^{-6}	189	117	221	141	121	199	130	292	125
Sr/ 10^{-6}	260	369	31.3	139	107	183	492	35.8	473
$^{87}Rb/^{86}Sr$	2.1076	0.9163	20.3823	2.9304	3.2751	3.1343	0.7623	23.5431	0.7635
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.710158	0.708273	0.749646	0.711957	0.713403	0.7125	0.706942	0.758304	0.706843
误差 2σ	14	17	16	13	10	9	15	10	11
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	0.705521	0.706250	0.704606	0.705486	0.706189	0.705563	0.705257	0.706275	0.705157
$\epsilon_{Sr}(t)$	17.08	27.44	4.10	16.59	26.57	17.69	13.33	27.79	11.92
Sm/ 10^{-6}	9.49	8.15	16.9	4.85	4.85	10.2	8.32	53.4	6.95
Nd/ 10^{-6}	58.4	49.7	97	27.1	32.4	63.7	51.6	366	42.9
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.0982	0.0992	0.1052	0.1081	0.0905	0.0965	0.0974	0.0883	0.098
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512318	0.512183	0.512014	0.512131	0.512096	0.512314	0.51232	0.512058	0.512241
误差 2σ	11	5	6	7	10	7	9	9	6
$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	0.512218	0.512082	0.511907	0.512021	0.512004	0.512216	0.512221	0.511969	0.512142
$\epsilon_{Nd}(0)$	-6.24	-8.88	-12.17	-9.89	-10.57	-6.32	-6.20	-11.31	-7.74
$\epsilon_{Nd}(t)$	-4.30	-6.95	-10.37	-8.14	-8.47	-4.35	-4.24	-9.17	-5.79
$f_{Sm/Nd}$	-0.501	-0.496	-0.465	-0.450	-0.540	-0.508	-0.504	-0.552	-0.502
T_{Dm}/Ma	1100	1287	1597	1472	1305	1091	1090	1327	1198

注:以 $t=155 Ma$ 求得Sr、Nd同位素初始比值及相关参数。

Sr、1/Nd 发生变化;在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - SiO_2 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - SiO_2 协变图解上(图5-c~d), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 不与 SiO_2 呈线性关系,表明粗面岩的初始岩浆在上升侵位过程中没有经受明显的同化混染作用,因此可以用粗面岩的主量元素、微量元素、Sr-Nd同位素组成来示踪岩浆源区特征。

大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩轻重稀土分异强烈,富集Rb、Ba(流纹岩微弱富集)、Th、U、K、La等大离子亲石元素(LILE),亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素(HFSE),流纹岩强烈Eu负异常,粗面岩Eu轻微正异常,Eu正异常往往是地壳加厚的指示^[25],表明地壳在早期可能经历了一个垂直方向增生的过程。上文讨论火山岩形成于石榴子石稳定的榴辉岩相或者石榴子石-斜长角闪岩相的源区,源区残留大量石榴子石而斜长石较少,该特征暗示了火山岩可能起源于增厚的下地壳物质的部分熔融^[26-27]。据国外学者研究,比安山岩更加偏酸性的

岩石无法由地幔直接熔融形成^[28],而流纹质、粗面质岩浆能够通过下地壳熔融生成。葛文春等^[9]将大兴安岭中生代流纹岩,划分为2种类型,I型流纹岩为钙碱性玄武岩岩浆结晶分异的产物,II型流纹岩为下地壳斜长角闪岩非理想熔融的产物。前文通过分析主量、微量元素特征,大座子山流纹岩属葛文春分类的II型流纹岩。从Sr-Nd同位素分析结果看,流纹岩、粗面岩具有类似的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 初始比值和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 初始比值,分别介于0.7046~0.7063和0.5119~0.5122($t=155\text{ Ma}$),在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 相关图上(图6)位于EM I富集地幔端元之上的下地壳趋势右侧,表明岩浆来源极大可能是下地壳的重熔, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为-6.20~-12.17,远低于原始地幔值; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-4.24~-10.37, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 参数在-0.450~-0.552,结果均为负值,反映了火山岩的陆壳成因环境,成岩物质来自于下地壳。物探资料基本证实了大兴安岭地区下地壳下部主要为铁镁质等基性岩^[29],加

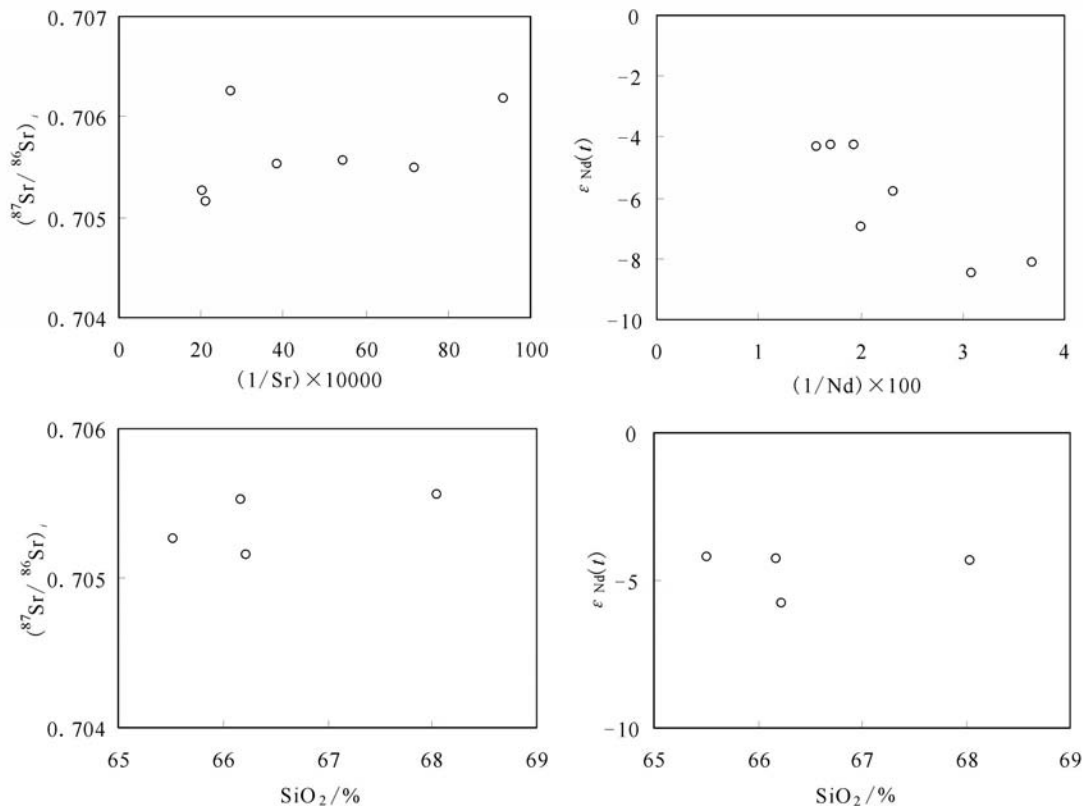
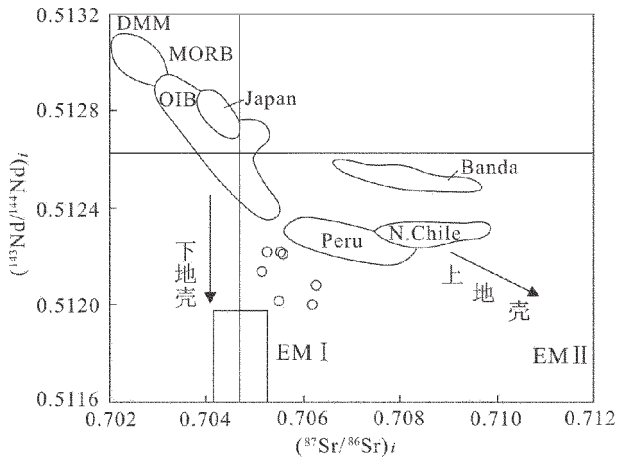


图5 大座子山粗面岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -1/Sr(a)、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -1/Nd(b)及 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - SiO_2 (c、d)相关图解

Fig. 5 diagrams of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -1/Sr(a), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -1/Nd(b), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - SiO_2 (c and d) of trachyte from the Dazuozishan copper polymetallic ore deposit



MORB—洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩;Japan—日本 Aso 和 Towada 岛弧火山岩;Banda—印度尼西亚岛弧玄武岩;Peru 和 N. Chile—大陆边缘弧玄武岩;DMM—亏损 MORB 地幔;EM I 和 EM II 分别为两个富集地幔端员

图6 大座子山铜多金属矿粗面岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i相关图(底图据文献[34])

Fig. 6 Diagram of (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i versus (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i of trachyte from the Dazuoizhishan copper polymetallic ore deposit (base map after reference [34])

之流纹岩、粗面岩具有极为相似的微量元素特征,笔者推测大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩可能同为存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类经重熔作用而形成,而流纹岩 Ba、Sr 较粗面岩具明显亏损,暗示流纹岩岩浆发生的斜长石分离结晶作用较粗面岩更强^[30-33]。

将大兴安岭南段大座子山、小东沟、碾子沟、鸡冠山、车户沟这5个典型铜钼矿床岩体 Sr-Nd 同位

素特征加以对比:矿床同处于西拉木伦断裂以南,赤峰—开源断裂以北,嫩江断裂以西;该区域岩体多为中生代火山岩和沉积岩,局部有中生代—古生代花岗质侵入岩;断裂多受北东向和东西向构造控制。从成岩年代学来看,大座子山、碾子沟和鸡冠山成岩年代均在 155 Ma 左右,其成岩作用属同一期岩浆作用;大座子山 Sr-Nd 同位素特征与碾子沟、鸡冠山岩体特征相近,均属“鸡冠山式”矿床类型,成岩物质均来自于地壳,并且大座子山和碾子沟成岩物质均来自于下地壳(表4,图7)。

邵济安等对大兴安岭中南段中生代不同阶段岩浆活动进行了分析,提出了早—中侏罗世辉绿岩墙侵入、地壳伸展,晚侏罗世粗面质岩浆喷发,早白垩世非造山碱性花岗岩侵位的火山岩成因模式^[40]。该模式在本研究区得到体现和验证,其形成的演化过程可归纳为:在侏罗—白垩世火山盆岭阶段的构造运动影响下,中侏罗世地壳底部存在大面积的底侵作用,底侵杂岩体(可能为存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类),地壳在垂直方向增生。在拆沉作用下,晚侏罗世下地壳重熔形成的粗面质岩浆喷发,分离结晶形成粗面岩;早白垩世粗面质岩浆经结晶分异形成流纹岩。

4.2 大地构造背景及演化

大兴安岭南段地区处于多块体拼合的特殊地质构造中,随着近年来该地区大型、超大型矿床的发现,其中生代火山岩形成的大地构造背景及后期构造演化一直是该区研究的热点问题之一。大座

表4 大兴安岭南段典型矿床同位素组成、成岩年代对比
Table 4 Correlation of typical deposits isotopic composition and diagenetic age in the southern section of the Da Hinggan Mountains

矿床类型	典型矿床	成矿有关岩体	同位素组成特征	年龄/Ma	文献来源
鸡冠山式	大座子山	流纹岩、粗面岩	$\epsilon_{Nd}(t) = -4.24 \sim -10.37$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7046 \sim 0.7063$	156 ± 2	同位素据本文; 年龄据文献[5]
	碾子沟	A 型花岗岩	$\epsilon_{Nd}(t) = -3.8 \sim -7.4$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7052 \sim 0.7052$	155	文献[35]
	鸡冠山	钾长花岗斑岩	$\epsilon_{Nd}(t) = -8.2 \sim -10.1$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7095 \sim 0.7165$	155 ± 2	同位素据文献[36]; 年龄据文献[37]
车户沟式	车户沟	二长花岗斑岩	$\epsilon_{Nd}(t) = -20.6 \sim -20.8$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7087 \sim 0.7089$	245	文献[38]
奥伦花式	小东沟	斑状花岗岩	$\epsilon_{Nd}(t) = -2.4 \sim -2.7$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7046 \sim 0.7052$	142 ± 2	文献[39]

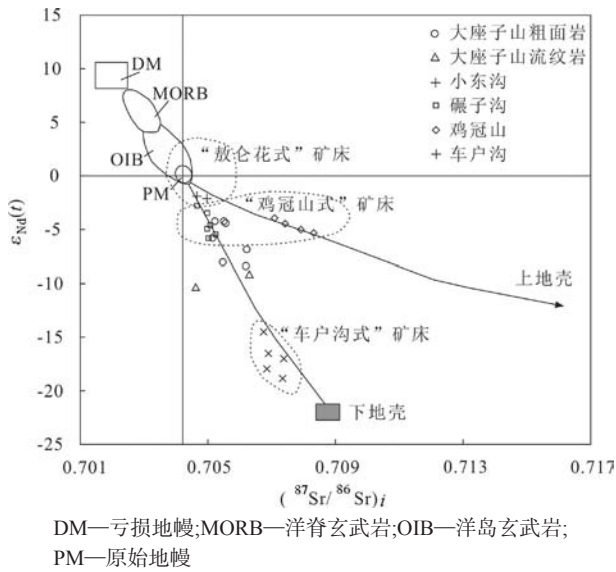
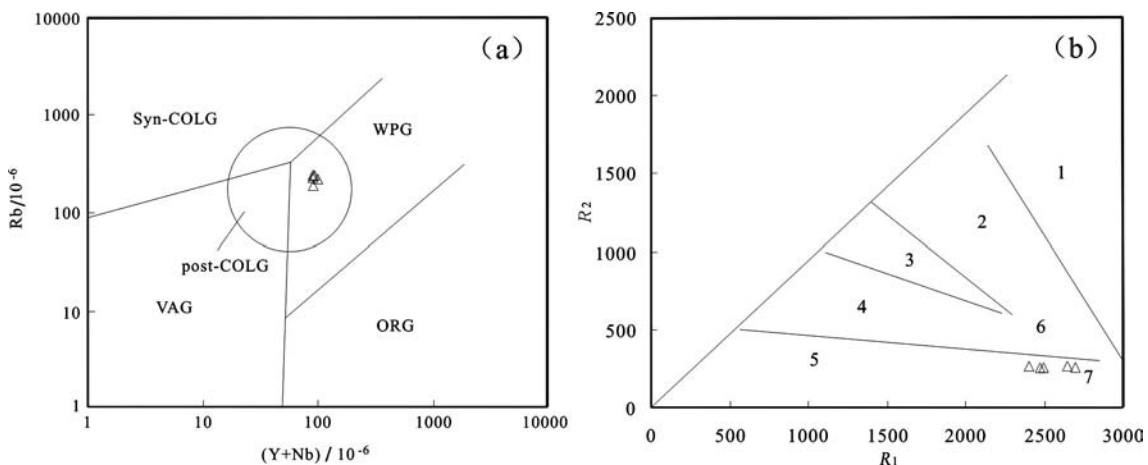


图7 大兴安岭南段Sr-Nd同位素组成对比图解
Fig. 7 Sr-Nd isotopic contrast diagram of the southern part of the Da Hinggan Mountains

子山铜多金属矿位于大兴安岭南段华北地台北缘温都尔庙—翁牛特旗加里东地槽褶皱带,东西向西拉木伦河深大断裂和少郎河深大断裂之间,矿区流纹岩、粗面岩形成于大兴安岭南段晚侏罗—早白垩世火山盆岭阶段,该期是大兴安岭南段构造和岩浆

作用的鼎盛时期,奠定了本区构造与火山岩带的基本格局^[10]。

目前学者们对大兴安岭南段中生代中晚期火山岩形成于板块内部伸展环境的认识基本达成一致,邵济安等认为该地区岩浆的形成和演化与板内伸展环境下的底侵作用有关^[41];林强、葛文春等提出了张性环境是与地幔柱的上涌而导致上覆岩石圈伸展有关^[8-9];张宏等虽然认为是后造山期挤压背景中“减压-剪切”环境中形成的,但是他强调了挤压背景下的“减压作用”,并暗示了它可能进一步发展为“拉张”作用^[42];吕志成等提出了此伸展环境可能与南蒙古—兴安造山带北缘蒙古—鄂霍次克残余洋在中生代的“剪刀式”闭合和南蒙古—兴安造山带南缘内蒙—吉黑坳拉槽在中生代的闭合作用有关^[11]。现有资料表明,大座子山火山岩形成于晚侏罗世约156 Ma;太平洋板块是从晚白垩世进入大规模扩张阶段^[43],而蒙古—鄂霍次克海是于中晚侏罗世闭合,155~145 Ma是蒙古—鄂霍次克海闭合的后造山伸展环境^[44];另外蒙古—鄂霍次克海闭合作用是由西向东方向^[45],其构造运动影响了板块环境致使内部压力减小,因此本文推断该区域晚侏罗世的伸展环境与蒙古—鄂霍次克海的闭合作用有关,而与太平洋闭合作用无关。



ORG—洋中脊花岗岩;Syn—COLG—同碰撞花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;post—COLG—后碰撞花岗岩;1—地幔分离(斜长花岗岩);2—破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩;3—板块碰撞后隆起期花岗岩;4—晚造山期花岗岩;5—非造山期A型花岗岩;6—同碰撞S型花岗岩;7—造山期后A型花岗岩; $R_1=[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$; $R_2=(Al+2Mg+6Ca)$

图8 大座子山流纹岩构造环境判别图解(底图据文献[46-47])

Fig. 8 Discrimination diagram for tectonic settings of rhyolite from the Dazuoizhan copper polymetallic ore deposit (base map after references [46-47])

大座子山铜多金属矿流纹岩以富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为8.19%~8.67%)、低铝(Al_2O_3 含量为11.22%~11.70%)、低钙(CaO 含量0.20%~0.39%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 较高且较为富钾。流纹岩在 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解上投点在板内花岗岩和后碰撞花岗岩交叠区域(图8-a),在 R_1-R_2 图解上投点在非造山期和造山期后区域(图8-b)。由此推断,大座子山铜多金属矿含矿围岩形成的构造环境是造山期后伸展条件的板内环境,即在晚侏罗世150~160 Ma受到了蒙古—鄂霍次克海“剪刀式”闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响,由存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类熔融而形成的一套高钾钙碱性—钾玄岩系列火山岩。另外,流纹岩极低的Ba/Nb比值(0.18~0.85)明显不同于岛弧火山岩的特征($\text{Ba}/\text{Nb}>30$),表明其成因与同时代的俯冲作用无关,同时也证明了上文讨论的火山岩的来源是陆壳物质的重熔^[34]。

在前人的研究成果基础上^[6-7,10,14,34,40-41],结合本区地质现象、岩石地球化学特征,笔者可以推断区域上的构造演化过程:在造山作用期后软流圈隆起的背景下,地壳底部存在大面积的底侵作用,底侵的斜长角闪岩类和上涌的软流圈地幔分别为该区火山岩的形成提供了物质来源和热源。地壳经历了一个垂直方向增生的过程,加厚的下地壳压着岩石圈地幔经过拆沉作用一起拆沉至软流圈地幔,并在软流圈地幔提供的热源条件下发生了重熔作用。当下地壳岩浆不断积累,岩石经过拆沉而逐渐减薄,断陷盆地范围急剧扩大,伴有强烈的火山喷发,造成了岩石圈伸展而减薄,形成了典型的火山盆岭结构。

5 结 论

大座子山铜多金属矿流纹岩以高硅、高钾、低钛为特征,属高钾钙碱性系列;粗面岩高钾,属高钾钙碱性—钾玄岩系列。流纹岩、粗面岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-4.24~-10.37,同为存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类经重熔作用而形成。

大座子山铜多金属矿流纹岩、粗面岩形成的构造环境是造山期后伸展条件的板内环境,即在晚侏罗世150~160 Ma受到了蒙古—鄂霍次克海“剪刀式”闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响,由存留于中元古界下地壳的斜长角闪岩类熔融

而形成的一套高钾钙碱性—钾玄岩系列的火山岩。

参考文献(References):

- [1] 朱向东,梁立民,唐谷清,等. 内蒙古翁牛特旗二把伙银矿地质特征及成矿作用初探[J]. 矿产与地质, 2007, 21(2): 145-147.
Zhu Xiangdong, Liang Liming, Tang Guqing, et al. Initial discussion on geological characteristics of the Erbahuo silver deposit of Wengniute Inner Mongolia and its mineralization[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(2): 145-147(in Chinese with English abstract).
- [2] 郝国强. 内蒙古翁牛特旗二把伙银多金属矿区地质特征及找矿前景分析[J]. 矿产与地质, 2009, 23(3): 238-242.
Hao Guoqiang. Analysis of ore prospecting potential and geological character of Ag polymetallic ore deposit of Erbahuo, Wengniuteqi, Neimongu Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(3): 238-242(in Chinese with English abstract).
- [3] 吕增尧. 内蒙古克什克腾旗油房西矿区钼矿找矿潜力分析[J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(2): 174-179.
Lv Zengyao. Analysis of potential for molybdenum at Youfangxi area Keshenketengqi, Inner Mongolia[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(2): 174-179 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王国政, 张金良, 田振召, 等. 内蒙古油房西银多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 2012(2): 101-108.
Wang Guozheng, Zhang Jinliang, Tian Zhenzhao, et al. Geological characteristics and genesis of silver polymetallic deposit in Youfangxi, Inner Mongolia[J]. Mineral Resources and Geology, 2012, 26(2): 101-108(in Chinese with English abstract).
- [5] 杨扬, 高福红, 陈井胜, 等. 赤峰地区中生代火山岩锆石U-Pb年代学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊2): 257-268.
Yang Yang, Gao Fuhong, Chen Jingsheng, et al. Zircon U-Pb ages of Mesozoic volcanic rocks in Chifeng area[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(Supp.2): 257-268(in Chinese with English abstract).
- [6] 邵济安, 臧绍先, 牟保磊, 等. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. 科学通报, 1994, 39(6): 533-537.
Shao Ji'an, Zang Shaoxian, Mu Baolei, et al. Extension of orogenic belts and upwelling of asthenosphere: The example of Hinggan-Mongolian orogenic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(6): 533-537.
- [7] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379-388.
Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, et al. Deep geodynamics of Yanshanian Movement[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 379-388(in Chinese with English abstract).
- [8] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 论大兴安岭中生代两类流纹岩与玄武岩的成因联系[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 322-328.
Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou, et al. Genetic relationships between two types of Mesozoic rhyolite and basalts in great Xingan ridge[J]. Journal of Changchun University of Science and

- Technology, 2000, 30(4): 322–328(in Chinese with English abstract).
- [9] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 172–178.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, et al. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 172–178 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王京彬, 王玉往, 王莉娟, 等. 大兴安岭南段中生代伸展成矿系统[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 241–244.
- Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Lijuan, et al. Mesozoic extension–metallogenic system in southern part of Da Hinggan Mountains, China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(Supp.): 241–244 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 大兴安岭中南段中生代中基性火山岩岩石学地球化学研究[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 186–198.
- Lv Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, et al. Petrological and geochemical studies on the intermediate–basic volcanic rocks from the middle–south part of the Da Hinggan Mountains[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(2): 186–198 (in Chinese with English abstract).
- [12] 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 等. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 727–748.
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Fan Weiming, et al. Origin of late Mesozoic intermediate–felsic volcanic rocks from the northern Da Hinggan Mountain, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 737–748(in Chinese with English abstract).
- [13] 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 等. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩: 地壳生长的时代和方式[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 441–460.
- Liu Wei, Pan Xiaofei, Xie Liewen, et al. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hinggan Mts.: When and how continental crust grew?[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 441–460(in Chinese with English abstract).
- [14] 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 161–168.
- Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, et al. Petrogenesis of the late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1): 161–168(in Chinese with English abstract).
- [15] Jacobsen S B, Wasserbury G J. Sm–Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1984, 67: 137–150.
- [16] Riley T R, Leat P T, Pankhurst R J, et al. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(6): 1043–1065.
- [17] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745–750.
- [18] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contrib.Mineral.petrology, 1976, 50: 63–81.
- [19] Thornton C, Tuttle O. Chemistry of igneous rocks, part I: Differentiation index.American[J]. Journal of Science, 1960, 280: 664–684.
- [20] 孟凡超, 刘嘉麒, 李明, 等. 松辽盆地徐家围子营城组流纹岩地球化学特征及构造指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 227–241.
- Meng Fanchao, Liu Jiaqi, Li Ming, et al. Geochemistry and tectonic implications of rhyolites from Yingcheng Formation in Xujiaweizi, Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 227–241(in Chinese with English abstract).
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [22] Li X H, McCulloch M T. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China[J]. Precambrian Research, 1996, 76: 67–76.
- [23] 刁艳, 李峰, 王蓉, 等. 滇西九顶山铜铅矿花岗斑岩成因: LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr–Nd–Hf 同位素制约[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 134–148.
- Dao Yan, Li Feng, Wang Rong, et al. Petrogenesis of the granite porphyry related to the Jiudingshan Cu–Mo deposit in western Yunnan: Constraints from LA–ICP–MS zircon U–Pb chronology, Sr–Nd–Hf isotopes and petrogeochemistry[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 134–148(in Chinese with English abstract).
- [24] Briquieu L, Lancelot J R. Nd–Sr systematics and crustal contamination models for calc–alkaline igneous rocks[J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1979, 43: 385–396.
- [25] 邓晋福, 邱瑞照, 肖庆辉, 等. 对流地幔输入大陆与大陆成矿作用[J]. 矿床地质, 2004, 21(增刊): 24–31.
- Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Xiao Qinghui, et al. Input of material and heat from convective mantle into continent and continental metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 2004, 21(Supp.): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- [26] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662–665.
- [27] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium rich magmas from newly underplated hasaltic crust[J]. Nature, 1993, 362: 144–146.
- [28] Wyllie P J. Effects of H₂O and CO₂ on magma generation in the crust and mantle[J]. Journal of the Geological Society, 1977, 134: 215–234.
- [29] 许文良, 孙德有, 周燕, 等. 满洲里–绥芬河地学断面岩浆作用和地壳结构[M]. 北京地质出版社, 1994: 1–94.
- Xu Wenliang, Sun Deyou, Zhou Yan, et al. The Magmatism and Crustal Structure of Geoscience Transect, Manzhouli–Suifenhe,

- China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-94(in Chinese).
- [30] 隋振民, 徐学纯. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类Sr-Nd同位素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 48-55.
Sui Zhenmin, Xu Xuechun. Sr-Nd isotopic characteristics of Jurassic granites in northeastern Da Hinggan Mountains and their geological implications[J]. Geology in China, 2010, 37(1): 48-55(in Chinese with English abstract).
- [31] 徐璐璐, 柴凤梅, 李强, 等. 东天山沙泉子铁铜矿区火山岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1771-1790.
Xu Lulu, Chai Fengmei, Li Qiang, et al. Geochemistry and zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Shaquanzi Fe-Cu deposit in East Tianshan Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1771-1790(in Chinese with English abstract).
- [32] 郭文铂, 郑文宝, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床流体、成矿物质来源的地球化学约束[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 510-528.
Guo Wenbo, Zheng Wenbao, Tang Juxing, et al. Geochemical constraints on the source of metallogenic fluids and materials in the Jiama polymetallic Cu deposit, Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 510-528(in Chinese with English abstract).
- [33] 郭志军, 李进文, 黄光杰, 等. 内蒙古红花尔基白钨矿矿床赋花岗岩Sr-Nd-Pb-Hf同位素特征[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1226-1241.
Guo Zhijun, Li Jinwen, Huang Guangjie, et al. Sr-Nd-Pb-Hf isotopic characteristics of ore-bearing granites in the Honghuaerji scheelite deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1226-1241(in Chinese with English abstract).
- [34] 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 339-346.
Shao Ji'an, Zhang Lvqiao, Mu Baolei, et al. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts.[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 339-346(in Chinese with English abstract).
- [35] 张作伦, 曾庆栋, 屈文俊, 等. 内蒙碾子沟钨矿床辉钨矿Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 212-218.
Zhang Zuolun, Zeng Qingdong, Qu Wenjun, et al. The molybdenite Re-Os dating from the Nianzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 212-218(in Chinese with English abstract).
- [36] 张连昌, 吴华英, 相鹏, 等. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用-以华北大陆北缘西拉木伦铜多金属成矿带为例[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1351-1362.
Zhang Lianchang, Wu Huaying, Xiang Peng, et al. Ore-forming processes and mineralization of complex tectonic system during the Mesozoic: A case from Xilamulun Cu-Mo metallogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1351-1362.
- [37] Wu Huaying, Zhang Lianchang, Wan Bo, et al. Re-Os and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Xilamulun metallogenic belt, NE China, and constraints on mineralization events[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(2): 171-185.
- [38] Zeng Qingdong, Liu Jianming, Zhang Zuolun, et al. Geologic, fluid inclusion and sulfur isotopic studies of the Chehugou porphyry molybdenum-copper deposit, Xilamulun metallogenic belt, NE China[J]. International Geology Review, Resource Geology, 2011 61(3): 241-258.
- [39] 覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 等. 内蒙古小东沟斑岩型钨矿床的成矿时代及成矿物质来源[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 173-180.
Qin Feng, Liu Jianming, Zeng Qingdong, et al. The metallogenic Epoch and source of ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2008, 22(2): 173-180(in Chinese with English abstract).
- [40] 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(3): 193-200.
Shao Ji'an, Zhang Lvqiao, Mu Baolei, et al. Tectono-thermal evolution of middle-south section of the Da Hinggan Mountains[J]. Science in China(ser.D), 1998, 41(6): 570-579.
- [41] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 56-63.
Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui, et al. Relationship between Mesozoic Magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 37(1): 48-55(in Chinese with English abstract).
- [42] 张宏, 权恒, 赵春荆, 等. 辽西-大兴安岭晚侏罗世-早白垩世火山岩形成动力学背景的新认识[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 431-443.
Zhang Hong, Quan Heng, Zhao Chunjing, et al. New viewpoints on the dynamic background of the J_3 - K_1 volcanic rocks in Da Hinggan Mts. and Western Liaoning Province[J]. Geological Review, 1999, 45(Supp.): 431-443(in Chinese with English abstract).
- [43] Larson R L, et al. The bedrock geology of the world[R]. 1985, New York: Freeman.
- [44] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. Tectonophysics, 1999, 306: 33-56.
- [45] Metelkin D V, Vemikovskiy V A, Kazansky A Y, et al. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. Gondwana Research, 2010, 18(2/3): 400-419.
- [46] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [47] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using muhication[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43-55.