



青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及地质意义

郝金华^{1,2}, 陈建平^{1,2}, 董庆吉², 李玉龙³, 王涛³, 马继义^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083; 3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012)

摘要:青海“三江”北段斑岩型钼铜成矿带地处青海南部地区,区内呈NW-SE向展布一系列新生代具钼铜矿化的岩体。通过对具有代表性的纳日贡玛、陆日格、打古贡卡含矿斑岩地球化学、Sr-Nd-Pb同位素特征的研究,表明“三江”北段含矿斑岩主要为过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列;微量元素配分曲线总体呈右倾型,大离子亲石元素(LILE)富集,高场强元素(HFSE)亏损,具有较弱的Eu负异常,Sr-Nd-Pb同位素处于亏损地幔(MORB)与富集地幔的演化曲线上,被俯冲板片流体所交代的富集地幔可能为岩浆的源区。同时,“三江”北段斑岩源区同位素更向亏损地幔端员靠拢,而软流圈物质注入量的多少则导致了“三江”北段成矿带、玉龙成矿带岩石地球化学特征的差异。以纳日贡玛大型钼铜斑岩矿床为中心的青海南部“三江”北段斑岩型钼铜矿带的确立,暗示在青海南部仍然具有寻找大型斑岩型及岩浆期后热液型矿床的潜力。

关键词:元素地球化学, Sr-Nd-Pb同位素, 新生代含矿斑岩, “三江”北段, 青海南部

中图分类号: P595; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0427-11

Element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of ore-bearing porphyries in northern Sanjiang Mo(Cu) ore belt, Qinghai Province: implications for tectonic setting and petrogenesis

HAO Jin-hua^{1,2}, CHEN Jian-ping^{1,2}, DONG Qing-ji², LI Yu-long³, WANG Tao³ and MA Ji-yi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Beijing Land Resources Information Development, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China)

Abstract: The northern Sanjiang porphyry Mo(-Cu) ore belt is located in the southern Qinghai Province, where a series of NE-SE trending Cenozoic Mo-Cu mineralized rock bodies occur. In recent years, lots of large-size porphyry-skarn Mo(-Cu) ore deposits, such as the Narigongma porphyry-type Mo(-Cu) deposit and the Lurige and Dagugongka porphyry-skarn-type Mo(-Cu) lead-zinc deposits have been discovered. Based on analyzing petrologic characteristics of element geochemical data and Sr-Nd-Pb isotopic data of representative porphyries in Narigongma, Lurige and Dagugongka, this paper discusses the metallogenic geological background and the origin and evolution of porphyries in the study area, with the purpose of contributing to future mineral exploration. Ore-bearing porphyries in the study area are mainly biotite granitic porphyries and leucogranitic porphyries, with SiO₂ content of 64.87%~76.30%, K₂O+Na₂O 3.43%~8.90%, and K₂O+Na₂O 0.79%~47.24%, belonging to the calc-alkaline-shoshonitic series and being similar to things of the Yulong mineralization belt. All

收稿日期: 2010-12-01; 修订日期: 2011-03-23

基金项目: 国家科技支撑计划子课题资助项目(2006BA01A08); 中国地质调查局地质调查资助项目(1212010630804)

作者简介: 郝金华(1978-), 男, 讲师, 在读博士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: Haojh@cugb.edu.cn

the ore-bearing porphyries in the study area have similar distribution of rare earths and trace elements, with right-oblique curve, characterized by LILE (large-ion lithophile element) concentration, high field strength elements depletion, and significant Ti-Nb-Sr trough. The porphyries show weak Eu-depleted anomaly and adakite affinity. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio ranges from 18.410 0 to 19.429 0, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ from 15.609 0 to 15.685 0, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ from 38.577 0 to 39.522 8, $^{87}\text{Ru}/^{86}\text{Sr}$ from 1.901 0 to 8.722, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ from 0.705 291 to 0.710 307, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ from 0.702 873 to 0.705 859, and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ from 0.512 573 to 0.513 204, and the depleted mantle age (t_{DM}) is 0.60~0.85 Ga. These data are basically consistent in all the ore deposits. Most of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ are distributed in enriched mantle (EM II). $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon\text{Nd}(t)$ values are on the evolution curve of the depleted mantle (MORB) and enriched mantle (EM II). Sr-Nd-Pb isotopic data indicate that the enriched mantle (EM II) metamorphosed by subducted plate fluid might have been the source of the porphyries. In comparison with things of the Yulong ore belt, the depletion of Sr-Nd-Pb isotopes is more obvious in the northern Sanjiang ore belt, and the injection rate of asthenospheric material caused the geochemical differences between the northern Sanjiang ore belt and the Yulong ore belt. The establishment of the molybdenum-copper metallogenic belt in northern Sanjiang Region, whose center is the Narigongma-Lurige large-size molybdenum-copper deposit, suggests that there still exists a great potential for finding large porphyritic and postmagmatic hydrothermal ore deposits in this region.

Key words: element geochemistry; Sr-Nd-Pb isotope; Cenozoic porphyries; northern Sanjiang; southern Qinghai

西南“三江”地区为中国乃至世界上具有重要地位的新生代多金属成矿带,跨越滇、川西、藏东并延伸至青海南部,发育一系列大型、超大型的铜、金、铅锌等金属矿床,为我国青藏高原 3 条斑岩铜矿带之一(王召林等,2008;邓军等,2010)。国内外学者对“三江”地区中南段斑岩铜钼金矿带,特别是玉龙斑岩铜矿带的岩石学、地球化学、年代学等进行了大量的研究,深入探讨了构造背景、岩浆演化和成矿模式,研究认为“三江”铜多金属成矿带形成于印度-欧亚大陆碰撞造山背景下,受新生代陆内走滑断裂系统控制。

近年来在青海南部“三江”成矿带北段,陆续发现了以纳日贡玛含矿斑岩体为中心的又一大型斑岩-矽卡岩型钼铜矿带,其中包括纳日贡玛大型斑岩钼铜矿床、陆日格和打古贡卡斑岩-矽卡岩型钼铜铅锌矿床(王召林等,2008;杨志明等,2008)。本文拟从纳日贡玛、陆日格和打古贡卡含矿斑岩入手,通过分析其岩石地球化学、同位素地球化学特征,探讨青海“三江”北段斑岩钼铜矿带的成矿背景、岩石成因演化等,以期对今后的找矿工作有所帮助。

1 区域地质背景

青海“三江”北段斑岩型钼铜成矿带地处青海南部玉树藏族自治州境内,构造上处于金沙江缝合带

与班公湖-怒江缝合带所夹持的羌塘地体之上,位于“三江”成矿带的囊谦-昌都-兰坪-思茅成矿带中的纳日贡玛-妥坝铜多金属成矿带的西北端。该区是吸纳和调节印度-亚洲大陆碰撞应力应变的构造转换带,先后主要经历了晚古生代-中生代古、新特提斯洋盆扩张-俯冲造山作用及新生代大规模陆内变形的地质演化过程。晚古生代-中生代古特提斯洋盆的发育及其随后的俯冲消减和江达-维西弧发育(莫宣学等,2006);受印度-亚洲大陆斜向碰撞事件的影响,新生代该区构造变形异常复杂,至少经历了两次逆冲和四次走滑事件,形成了一系列 NW-SE 向的逆冲断裂系统、走滑断裂系统以及由其引发的褶皱、走滑拉分盆地等(Yin *et al.*, 2000; Hou *et al.*, 2003)。

区内断裂及节理裂隙相当发育,按展布方向可分为北西向、北东向、近东西向和近南北向 4 组断裂,各断裂彼此交错切割;其中北西西向断裂为区内的主干断裂,控制了本区的沉积建造、岩浆活动、后期的变质改造及矿产分布。区内呈 NW-SE 向展布一系列燕山期、喜马拉雅期岩浆活动岩体,具钼铜矿化的岩体主要为喜马拉雅期侵位的高钾钙碱性花岗斑岩,整体呈 NW-SE 向产出,受 NW-SE 向深大断裂控制明显。区域 NW-SE 依次分布为打古贡卡、纳日贡玛、陆日格、哼赛青等斑岩钼铜矿床(点见图 1)。

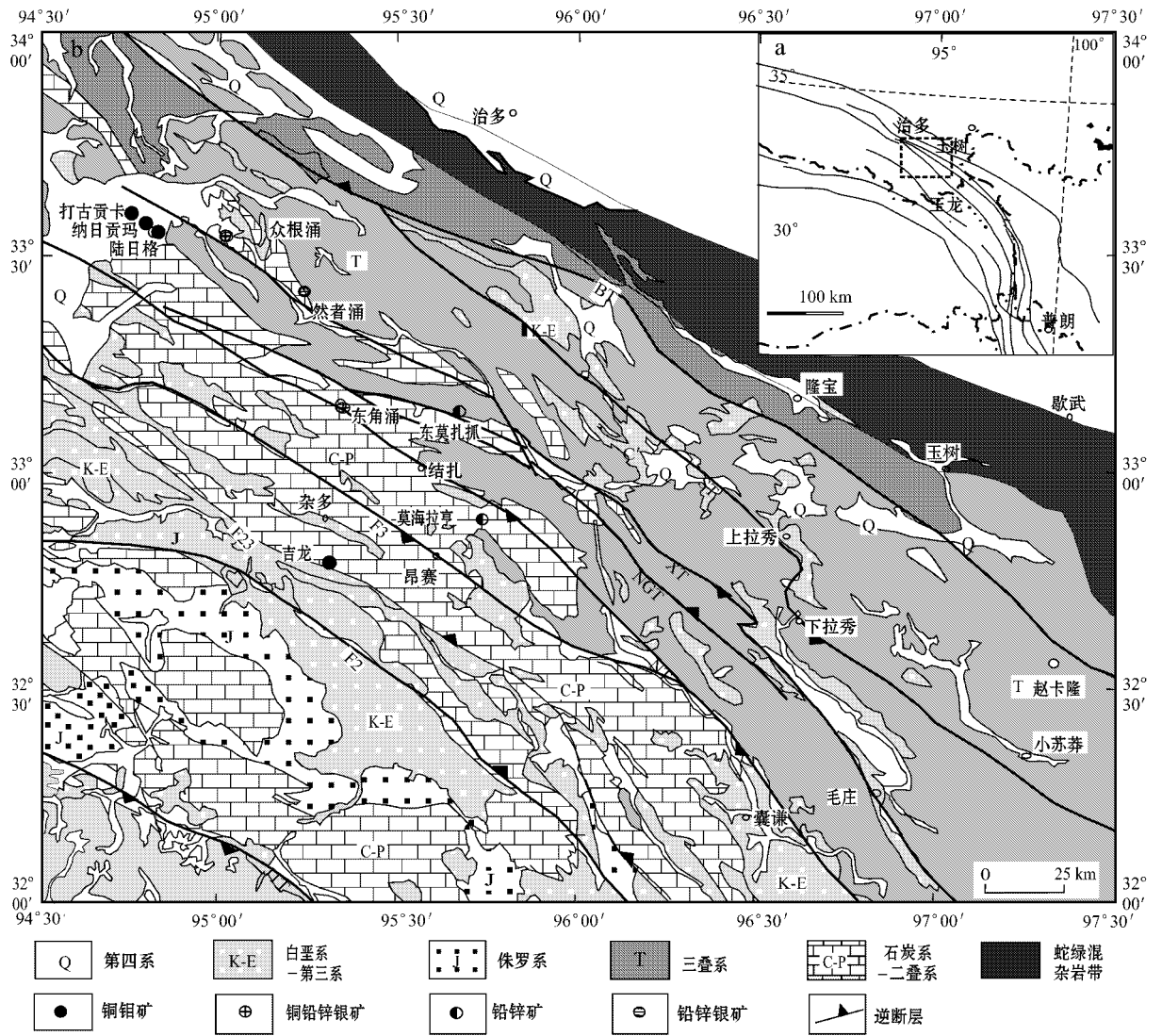


图 1 青海南部“三江”北段构造地质图(据侯增谦等 2008;王召林等 2009)

Fig. 1 Geological map of northern Sanjiang molybdenite-copper ore belt (after Hou *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009)

2 含矿斑岩岩石学特征

青海“三江”北段斑岩钼铜矿带出露地层主要为二叠系碎屑岩及火山岩(P_1gd)、三叠系灰岩(T_3j)及第四系(Q)。青海“三江”北段斑岩钼铜矿带主要含矿斑岩为喜马拉雅期侵位的高钾钙碱性花岗斑岩,其岩性主要为黑云母花岗斑岩、浅色细粒花岗斑岩及少量斜长花岗斑岩、石英闪长玢岩等,斑岩体多呈岩枝状侵位于杂多复式背斜北翼的下二叠统开心岭群中基性火山岩中。纳日贡玛矿区主要出露黑云母花岗斑岩(出露面积约 0.7 km^2),主体受 NE 向纳日

贡玛断裂控制;浅色细粒花岗斑岩及石英闪长玢岩在矿区出露范围较小,多以 NE 向岩脉侵位于下二叠统火山岩及略早侵位的黑云母花岗斑岩中;而陆日格矿区斑岩多以宽度不超 100 m、长度不超 1 000 m NNW、NNE 向细小岩脉展布;打古贡卡矿区花岗斑岩呈不规则状小岩株沿 NEE 向展布。铜钼矿化主体与黑云母花岗斑岩有关,细粒花岗斑岩常见孔雀石化。

黑云母花岗斑岩呈灰色、浅灰色、浅黄色,具典型斑状结构,块状构造,手标本较浅色花岗斑岩蚀变严重。斑晶主要为石英、斜长石、钾长石和黑云母组成,斑晶含量大于 30%。基质具微晶结构,由石英、

斜长石、正长石、黑云母及少量黄铁矿组成,含有少量磷灰石、榍石等副矿物。金属硫化物黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿以稀疏的浸染状构造分布于斑岩中。浅色细粒花岗斑岩呈灰白色或浅灰色,具斑状至等粒结构,块状构造。斑晶主要为石英、斜长石和钾长石,基质为微晶结构,矿物成分有石英、斜长石、钾长石、绢云母及少量的黄铁矿。副矿物有锆石、金红石、钛铁矿、榍石和磷灰石等。

斑岩中斑晶石英为他形粒状,粒度变化比较大,可见较明显的溶蚀现象,颗粒边部常呈港湾状,为基质细粒石英颗粒充填,局部微裂隙发育并被绢云母所充填。钾长石斑晶粒度变化较大,表面较新鲜,但也可见有灰色细粒土状质点(泥化)。斜长石斑晶的粒度大小不一,自形到他形板状,主要为中长石、更长石和钠长石。斜长石双晶发育,少数斑晶正环带极为发育,斑晶斜长石常具绢云母化、高岭土化等。黑云母斑晶粒度变化较大,以较自形板状为主,具明显的多色性,解理发育,沿解理缝常因绿泥石交代而析出铁质和金红石颗粒。

斑岩及围岩蚀变明显,围岩中玄武岩普遍已蚀变为青磐岩化玄武岩、角岩化玄武岩、矽卡岩化等蚀变和变质岩石。矿石矿物组成较简单,主要有黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等。矿石以浸染状、细脉状构造为主,自形-半自形结构,包含结构和交代溶蚀结构等。

3 测试样品及测试方法

斑岩样品采自纳日贡玛、打古贡卡矿区,主要岩性为与成矿有关的黑云母花岗斑岩和浅色花岗斑岩,挑选钻孔中蚀变相对较弱的样品用于测试主量元素、微量元素、稀土元素分析,测试结果见表1。测试工作在中国地质大学(北京)地学实验中心完成,常量元素分析测试仪器为PS-950等离子体光谱仪,微量元素分析用ICP-MS法测试,实验仪器型号为Agilent 7500a ICP-MS,分析方法见文献Han等(2007)。

同时对上述纳日贡玛样品进行了Pb-Sr-Nd同位素测试,测试工作在中国地质科学院同位素重点实验室完成,Pb同位素分析用Nu Plasma HR多接受器等离子体质谱仪(MC-ICPMS)测定,仪器的质量分馏以 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=2.3875$ 为标准进行校正,Rb-Sr、Sm-Nd同位素测试仪器为MAT262固体同位素质谱仪,标样结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Sr标样NBS987)=

0.710254 ± 12 , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.71290$,分析流程及实验方法见黄萱(1990)、何学贤等(2007)。

4 斑岩岩石地球化学特征

4.1 常量元素

青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩中 SiO_2 的含量为64.87%~76.30%,平均为70.92%; TFeO 为0.34%~4.54%,平均为2.01%; Al_2O_3 为12.00%~15.40%,平均为13.86%; Na_2O 为0.11%~4.69%,平均为2.44%; K_2O 为3.32%~6.69%,平均为4.58%。青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 值为3.43%~8.90%,平均为7.02%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.79~47.24,平均为6.40。 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图略)表明,青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩表现为富碱、高钾,投点落入钾质-超钾质范围。 A/CNK 值为0.90~2.73,基本全部属于过铝质岩石。从 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图2)可见,斑岩基本上落入高钾钙碱性系列,少部分属于钾玄武岩系列。

哈克图解(图略)表明,随着 SiO_2 含量增加,主要元素 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TFeO 、 CaO 、 Na_2O 和 P_2O_5 等氧化物的含量呈递减的趋势,而 K_2O 则与 SiO_2 含量呈正相关关系。

4.2 稀土元素

“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩稀土元素总量为 $(93.34 \sim 239.84) \times 10^{-6}$,平均为 158.03×10^{-6} ;LREE为 $(87.90 \sim 227.74) \times 10^{-6}$,平均为 148.42×10^{-6} ;HREE为 $(5.44 \sim 38.37) \times 10^{-6}$,平均为 9.61×10^{-6} ; δEu 为0.32~0.91,平均为0.69; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为5.38~33.84,平均为24.74。

“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩稀土元素标准配分曲线(图3)显示出较明显的右倾型[($\text{La}/\text{Yb})_N$ 为5.38~33.84],富集轻稀土元素,轻微富集重稀土元素,其中轻稀土元素分异明显,而重稀土元素分异不显著,在配分图上显示左陡而右缓的特征,暗示为同一岩浆演化的产物。“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩总体具弱的或Eu负异常,其中陆日格矿区黑云母花岗斑岩弱的负Eu异常,而浅色花岗斑岩则具负Eu异常(郝金华等2010b),表明随着斑岩成岩演化,含矿斑岩源区经历了一定程度的斜长石分离结晶作用,且源区可能有少量的斜长石残留。

表1 含矿斑岩常量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)测试结果及相关参数
Table 1 Compositions of major($w_B/\%$), trace and rare earth($w_B/10^{-6}$) elements of porphyries

矿床 编号	纳日贡玛				打古贡卡		
	ZK004-400	ZK004-560	ZK308-179	ZK805-348	DGG-B1	DGG-B2	DGG-B3
岩性	浅色花岗斑岩	黑云母花岗 斑岩	黑云母花岗 斑岩	黑云母花岗 斑岩	浅色细粒花岗 斑岩	黑云母二长花岗 斑岩	黑云母二长花岗 斑岩
SiO ₂	68.45	72.80	73.10	70.70	64.87	68.32	74.68
TiO ₂	0.28	0.33	0.30	0.49	0.49	0.46	0.19
Al ₂ O ₃	12.71	13.56	13.02	14.24	15.38	15.08	13.03
Fe ₂ O ₃	1.32	1.55	1.17	2.24	4.41	2.39	1.01
MnO	0.03	0.01	0.03	0.06	0.17	0.03	0.01
MgO	1.32	0.72	0.91	0.70	2.41	1.04	0.28
CaO	2.93	0.81	1.95	1.12	4.03	2.78	1.04
Na ₂ O	0.28	1.94	0.11	0.13	1.03	4.69	3.51
K ₂ O	5.91	6.69	3.32	6.04	3.54	3.70	5.39
P ₂ O ₅	0.19	0.14	0.13	0.17	0.20	0.20	0.09
LOI	5.78	1.64	5.70	4.27	3.99	0.46	0.52
Total	99.20	100.20	99.75	100.16	100.52	99.15	99.75
La	31.67	38.61	41.73	42.47	38.24	46.48	39.22
Ce	50.68	59.93	69.82	70.94	69.04	80.96	60.86
Pr	5.24	6.01	6.55	7.16	7.10	8.00	5.55
Nd	17.46	19.72	20.91	23.99	23.92	26.52	16.58
Sm	3.02	3.16	3.20	3.90	3.78	4.17	2.40
Eu	0.73	0.73	0.62	0.89	1.01	1.01	0.45
Gd	2.30	2.40	2.42	2.98	3.05	3.13	1.77
Tb	0.30	0.30	0.32	0.40	0.39	0.39	0.23
Dy	1.70	1.66	1.78	2.22	2.13	2.16	1.31
Ho	0.33	0.31	0.35	0.43	0.40	0.41	0.26
Er	0.94	0.85	1.00	1.21	1.11	1.17	0.79
Tm	0.14	0.14	0.16	0.18	0.15	0.16	0.12
Yb	0.90	0.86	1.08	1.20	0.93	1.09	0.92
Lu	0.14	0.14	0.18	0.20	0.14	0.16	0.14
δEu	0.85	0.81	0.68	0.80	0.91	0.86	0.67
$(La/Yb)_N$	0.05	0.03	0.11	0.11	0.03	0.00	0.03
Cs	7.93	6.86	9.68	17.17	8.37	2.60	4.88
Rb	264.77	314.13	143.65	386.04	101.44	107.66	243.40
Ba	448.25	468.84	369.96	253.90	188.68	649.40	414.80
Th	20.40	28.15	32.37	24.62	8.58	20.76	23.48
U	11.30	6.40	5.10	81.16	1.55	4.00	3.70
Nb	12.92	17.05	20.18	22.89	11.46	19.25	17.76
Ta	1.13	1.60	1.75	1.73	0.91	1.47	1.65
Pb	9.69	13.62	6.76	20.67	8.03	15.06	14.69
Sr	149.71	210.75	88.02	157.10	274.40	654.00	195.22
Nd	68.45	72.80	73.10	70.70	64.87	68.32	74.68
Zr	111.28	162.43	138.59	192.88	171.40	166.68	114.48
Hf	3.15	4.37	4.12	4.88	3.50	3.50	3.15
Y	9.11	8.43	9.44	11.60	11.90	12.45	8.52
Sc	2.62	3.45	3.04	5.11	5.98	4.77	2.27
V	23.60	28.67	23.21	46.76	63.02	45.54	12.05
Mn	211.65	83.36	217.15	442.43	1270.20	251.00	86.30
Cr	7.45	6.60	13.89	16.75	11.31	10.43	4.06
Co	4.57	7.18	4.25	7.43	10.13	4.45	1.11
Ni	4.34	7.63	6.53	9.23	28.50	9.02	3.35
Cu	108.66	474.73	123.31	446.01	80.36	5.32	3.51
Zn	32.51	24.25	20.74	311.04	148.20	55.84	31.92
Ga	15.22	16.30	16.75	18.84	19.07	20.86	17.35

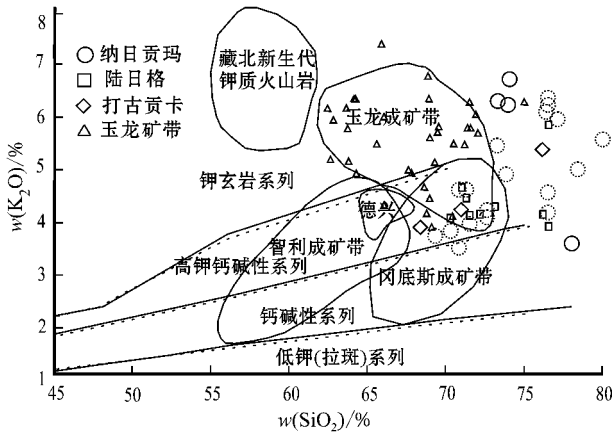


图 2 斑岩 K_2O-SiO_2 图解 玉龙铜矿带岩石数据引自马鸿文(1990)、张玉泉等(2000);藏北钾质火山岩数据引自丁林等(1999)、赖绍聪等(1999);纳日贡玛虚空心圈数据引自杨志明等(2008)、陈建平等(2008) 陆日格数据引自郝金华等(2010b)]

Fig. 2 K_2O-SiO_2 diagram (Yulong metallogenic belt data from Ma Hongwen, 1990; Zhang Yuquan *et al.*, 2000; potassic volcanic rocks in northern Tibet from Ding Lin *et al.*, 1999; Lai Shaocong *et al.*, 1999; hollow circle data of Narigongma from Yang Zhiming *et al.*, 2008 and Chen Jianping *et al.*, 2008; Lurige data from Hao Jinhua *et al.*, 2010b)

4.3 微量元素

“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩具相似的微量元素配分特征,曲线总体呈右倾型,大离子亲石元素(LILE)相对于高场强(HFSE)和轻稀土元素(LREE)明显富集。曲线的前半部元素总体呈富集状态,Rb、Th、U和K富集明显,而曲线后半部相容元素Hf、Sm、Y和Yb等富集度相对较低,这种地球化学特征符合钙碱性系列岩浆演化的普遍规律(图4)。

5 Pb-Sr-Nd 同位素特征

对纳日贡玛含矿斑岩进行了Pb-Sr-Nd同位素测试,测试结果见表2。“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值为18.410 0~19.429 0, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值为15.609 0~15.685 0, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值为38.577 0~39.522 8。它们均位于地球等时线(4.55 Ga)下方,位于北半球参考线(NHRL)上方,并大致与其平行。与玉龙矿带相比,“三江”北段斑岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值更高,而 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值与之相近。

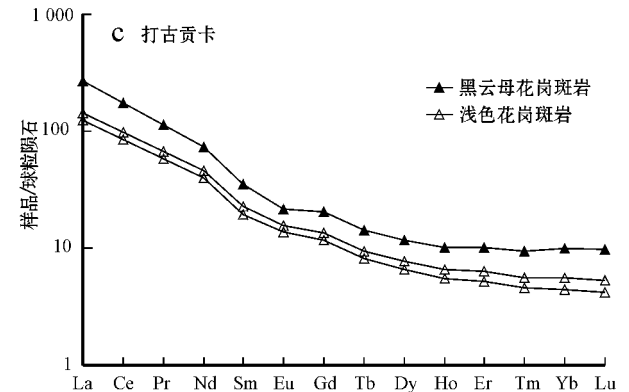
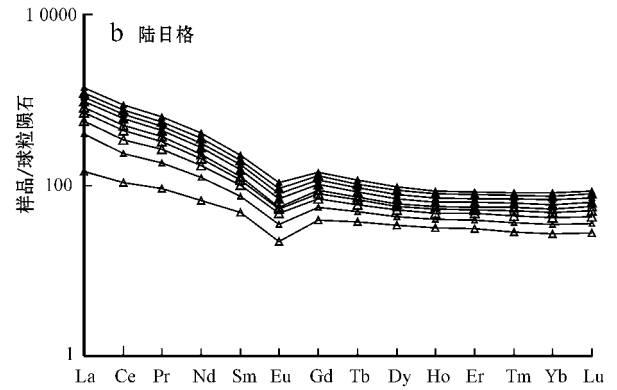
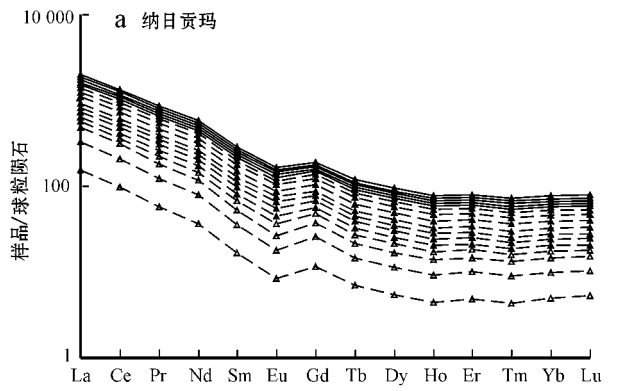


图 3 含矿斑岩 REE 球粒陨石标准化配分曲线 [球粒陨石数据 Sun 和 McDonough (1989); 纳日贡玛矿区虚线表示数据引自杨志明等(2008)、陈建平等(2008); 陆日格数据引自郝金华等(2010b)]

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of ore-bearing porphyries (chondrite content from Sun and McDonough, 1989; dotted line of Narigongma from Yang Zhiming *et al.*, 2008 and Chen Jianping *et al.*, 2008; Lurige data from Hao Jinhua *et al.*, 2010b)

“三江”北段斑岩含矿斑岩的 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 为1.901 0~8.722, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为0.705 291~0.710 307, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的初始计算值为0.702 873~0.705 859, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 的初始计算值为0.512 573~0.513 204,

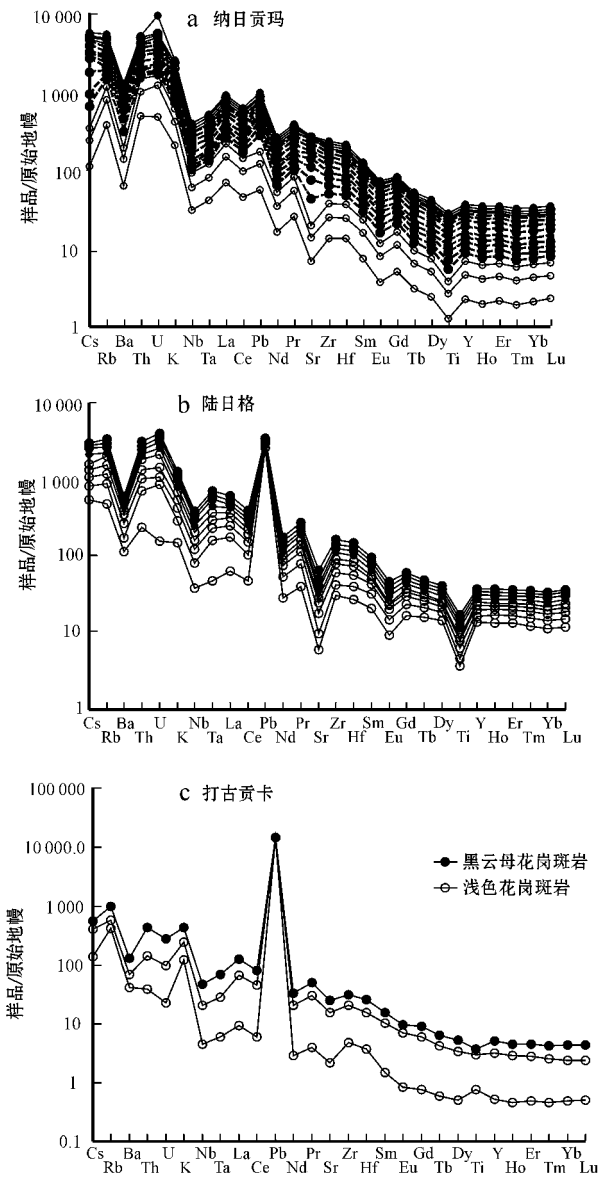


图 4 含矿斑岩微量元素标准化图解[原始地幔数据据 McDonough (1992); 纳日贡玛矿区虚线表示数据引自杨志明等 (2008)、陈建平 (2008); 陆日格数据引用郝金华等 (2010b)]

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams for porphyries (normalized data from McDonough, 1992; dotted line of Narijigoma from Yang *et al.*, 2008 and Chen *et al.*, 2008; Lurige data from Hao *et al.*, 2010b)

$\epsilon Nd(t)$ 除 ZK2401-220、ZK004-400 为 12.35、7.33 外, 其余为 0.30~0.64; 含矿斑岩的亏损地幔年龄 (t_{DM}) 为 0.60~0.85 Ga, 各个矿床大致一致, 接近南部玉龙矿带的 0.8~1.0 Ga (姜耀辉等, 2006)。“三江”北段斑岩的 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 值略低于玉龙, $\epsilon Nd(t)$ 值略高于玉龙斑岩 (表 2、图 6)。

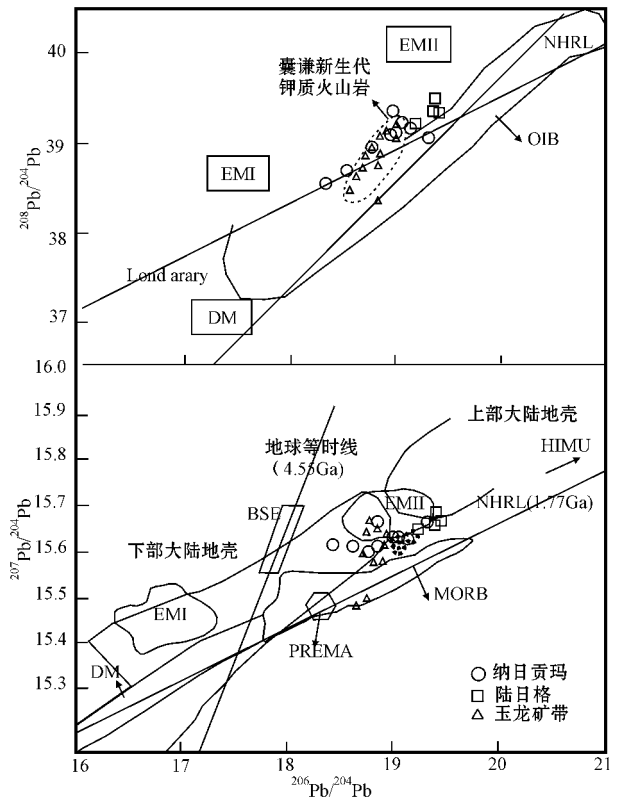


图 5 斑岩 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{208}Pb/^{204}Pb$ 图解 底图据侯增谦等 (2004) 纳日贡玛虚空心圈数据引自杨志明等 (2008)

Fig. 5 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{208}Pb/^{204}Pb$ diagrams (after Hou Zenqian *et al.*, 2004; dotted line of Narijigoma from Yang Zhiming *et al.*, 2008) DM—亏损地幔; BSE—全硅酸盐地球; EMI、EmI—富集地幔; HIMU—具高 U/Pb 比值地幔; PREMA—普通地幔 DM—depleted mantle; BSE—bulk silicate earth; EmI, EmII—enriched mantle; HIMU—mantle with high U/Pb ratio; PREMA—frequently observed prevalent mantle composition

6 讨论

6.1 岩浆源区

大量的岩石学、岩石地球化学研究表明, 青藏高原内与新生代矿化有关的斑岩主要为中酸性岩浆, 岩性变化于花岗闪长岩—二长花岗岩—花岗岩, 与陆缘弧环境含矿斑岩较为类似 (Misra, 2000)。作为青海南部“三江”北段典型的 3 处斑岩型钼铜矿床, 纳日贡玛、陆日格、打古贡卡的含矿斑岩主要为黑云母花岗岩斑岩、浅色细粒花岗岩斑岩。青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩中 SiO_2 的含量为 64.87%~76.30%; $K_2O + Na_2O$ 值为 3.43%~8.90%; K_2O/Na_2O 值

表 2 斑岩 Sr-Nd-Pb 同位素测试结果及相关参数
Table 2 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of porphyries

矿床 样品	陆日格				纳日贡玛			
	Zk2401-220	K2401-259	Zk801-259	ZK801-266	ZK004-400	Zk004-560	ZK308-179	Zk805-348
$\epsilon(\text{Sm}) \times 10^{-6}$	3.469	1.741	3.241	3.317	1.664	2.422	2.626	1.958
$\epsilon(\text{Nd}) \times 10^{-6}$	17.586	8.896	17.961	19.341	8.978	15.144	17.062	11.768
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1193	0.1184	0.1092	0.1038	0.1121	0.0967	0.0931	0.1006
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.513251 ± 17	0.512619 ± 9	0.512621 ± 6	0.512623 ± 8	0.513014 ± 16	0.512642 ± 4	0.512628 ± 8	0.512627 ± 7
$\epsilon(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	104.10	125.60	153.60	132.80	146.40	282.80	125.00	199.70
$\epsilon(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	881.10	416.80	135.40	202.10	741.40	142.70	679.10	709.70
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	3.4190	8.7220	3.2830	1.9010	5.7130	5.7330	5.3260	8.1420
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.708773 ± 12	0.710307 ± 25	0.708517 ± 14	0.707382 ± 21	0.708319 ± 20	0.708091 ± 20	0.708835 ± 20	0.709384 ± 10
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	0.705859	0.702873	0.705719	0.705762	0.704911	0.704671	0.705658	0.704527
$\epsilon(\text{Nd}(t))$	12.35	0.23	0.34	0.42	7.33	0.61	0.36	0.30
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	19.363 ± 17	19.429 ± 9	19.2032 ± 9	19.36495 ± 23	18.9654 ± 14	19.0034 ± 8	19.0708 ± 13	19.3222 ± 7
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.6645 ± 14	15.6733 ± 7	15.6583 ± 8	15.685 ± 19	15.6342 ± 1	15.6398 ± 7	15.6377 ± 1	15.6663 ± 6
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	39.3881 ± 39	39.3774 ± 17	39.2616 ± 19	39.5228 ± 47	39.1064 ± 28	39.1423 ± 21	39.2513 ± 27	39.0932 ± 15

注 陆日格数据引自郝金华等(2010b)。

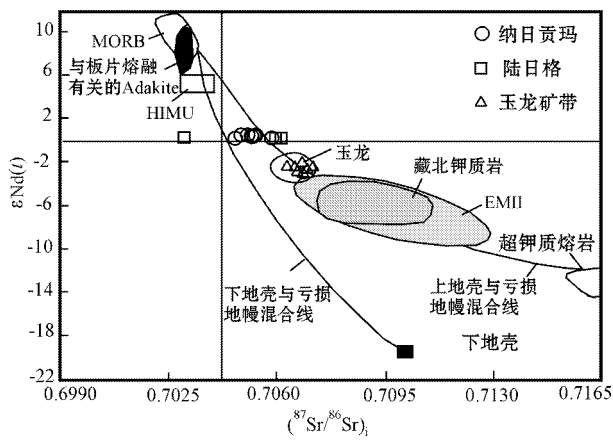


图 6 含矿斑岩 $\epsilon(\text{Nd}(t)) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 图解 MORB 数据引自侯增谦等(2004);藏北钾质岩数据引自张玉泉等(2000);玉龙铜矿带岩石数据据文献马鸿文(1990)张玉泉等(2000)]

Fig. 6 $\epsilon(\text{Nd}(t)) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ diagram (MORB data from Hou Zengqian *et al.*, 2004; potassic volcanic rock data of northern Tibet from Zhang Yuquan *et al.*, 2000; Yulong metallogenetic belt data from Ma Hongwen, 1990 and Zhang Yuquan *et al.*, 2000)

为 0.79~0.47, 与邻近的玉龙矿带相似, 斑岩主要为高钾钙碱性-钾玄岩系列。哈克图解表明, 主要元素存在良好的相关性, 表明青海“三江”北段斑岩铜矿带含矿斑岩具有相似的岩石成因或源区。

“三江”北段斑岩铜矿带含矿斑岩具较相似的稀土和微量元素配分特征, 曲线总体呈右倾型, 大离子亲石元素(LILE)富集、高场强(HFSE)亏损, 具显

著的 Ti、Nb 和 Sr 谷, 显示出岩浆与俯冲有关的特点 (Miller *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2001)。斑岩 Ti 明显的负异常说明斑岩源区存在金红石矿物相的残留; Nb、Ta 的亏损与 Zr、Hf 的富集则说明斑岩残留相中可能的角闪石相的存在; K、Rb 的富集和 Ba 的亏损则可能与源区的金云母的熔融缺失有关, 这些地球化学特征表明岩石源区直接或间接经历过板片流体交代 (Hou *et al.*, 2003, 2007; Qu *et al.*, 2007)。但与典型弧花岗岩不同的是, “三江”北段斑岩具高的 Sr、低 Y 及 Eu 不明显的负异常, 同样显示出与埃达克岩的亲性和 (Hou *et al.*, 2003; Jiang, 2006; 杨志明等 2008)。

“三江”北段斑岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点图(图 5)中, “三江”北段斑岩均位于地球等时线(4.55 Ga)下方、北半球参考线(NHRL)上方, 并大致与其平行, 基本处于富集地幔(EMII)内。斑岩 $\epsilon(\text{Nd}(t)) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 图(图 6)中, “三江”北段斑岩投点基本位于沿一、三象限中间线分布, 处于亏损地幔(MORB)与富集地幔的演化曲线上。从“三江”北段斑岩 Pb-Nd-Sr 同位素表明被俯冲板片流体所交代的富集地幔可能为岩浆的源区。

本次研究中 ZK2401-220、ZK004-400 的 $\epsilon(\text{Nd}(t))$ 为 12.35、7.33, 表现出明显的亏损特征, 与本区的其他样品不一致。玉龙、纳日贡玛斑岩锆石中 Hf 同位素时均表明其具有正的 $\epsilon(\text{Hf})$ 值, 表明源区为亏损地幔(姜耀辉等 2006; 杨志明等 2008), 姜耀辉等(2006)解释为源区受到古老板片熔体的混染来解释。

因此被俯冲板片流体交代和软流圈物质注入而成的壳幔过渡带可能为纳日贡玛-玉龙带含矿斑岩的理想源区;同时“三江”北段斑岩源区同位素更向亏损地幔端员靠拢,而软流圈物质注入量的多少则导致了“三江”北段成矿带、玉龙成矿带与囊谦火山岩岩石地球化学特征的差异(杨志明等,2008)。

6.2 成矿构造背景

纳日贡玛主含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测试结果为 43.3 ± 0.5 Ma(杨志明等,2008);王召林等(2008)对纳日贡玛辉钼矿所作的 Re-Os 同位素测试年龄为 40.86 ± 0.85 Ma。因此“三江”北段成矿年代属于印度-欧亚大陆主碰撞向晚碰撞转换时期,略早于玉龙成矿带(侯增谦等,2007;莫宣学等,2009)。

自始新世以来,构造上夹持于金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带的羌塘地体在印度-亚洲大陆的持续会聚和南北挤压背景下,以大陆内部地体间的相对运动为主,以此来吸纳和调节印度-亚洲大陆碰撞应力应变的构造转换,构造上以陆内俯冲和逆冲-推覆-走滑活动为特征(Yin,2000;Hou *et al.*,2003)。在古新世-始新世期间(70~60 Ma)印度板片北东向的斜向碰撞,导致研究区内(纳日贡玛-玉龙)产生了右旋走滑断裂系统(Hou *et al.*,2003),此后由于受到扬子板块西向碰撞(侯增谦等,2006a,2006c)或欧亚板块北向碰撞(Paul,2001)的影响,控制斑岩熔融及含矿斑岩侵位的始新世右行走滑断裂转变为左行走滑断裂,走滑断裂系统导致了应力的释放及走滑拉分盆地的形成,地壳深大尺度的走滑断裂因减压作用引发富挥发分的含矿岩浆上涌,就位于断裂控制部位成矿,这些断裂系统直接控制着“三江”北段斑岩体的侵入位置。

6.3 找矿意义

“三江”斑岩铜多金属成矿带南北延续 2 000 多公里,喜马拉雅期是“三江”成矿带中斑岩型铜钼金最重要的成矿期,导致了大部分大型、超大型矿床的形成。以纳日贡玛为中心的“三江”北段斑岩型钼铜带在岩石地球化学、同位素等特征上反映出与玉龙矿带具有相似的岩浆源区,斑岩中矿物组合及成份也指示其具有良好的含矿性,与玉龙成矿带相比,“三江”北段斑岩结晶压力、温度较玉龙矿带低(郝金华等,2010a)。自玉龙矿带向北延至青海南部斑岩的年龄渐次增加,可以认为“三江”北段与玉龙矿带受控于统一的地球动力学机制,具有明显时空与成

因关系(王召林等,2008;杨志明等,2008;郝金华等,2010b),青海南部与玉龙矿带相连组成了一个南北近千公里的巨大的斑岩-矽卡岩型多金属矿集区。

因此,以纳日贡玛大型钼铜斑岩矿床为中心的青海南部“三江”北段带的确立,确立了我国又一个矿产资源开发基地,同时也表明在青海南部仍然具有寻找大型斑岩型及岩浆期后热液型矿床的潜力。

7 结论

(1)青海“三江”北段含矿斑岩主要为黑云母花岗岩斑岩、细粒花岗岩斑岩,斑岩主要为过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列。“三江”北段斑岩钼铜矿带各含矿斑岩具较相似的微量元素配分特征,曲线总体呈右倾型,大离子亲石元素(LILE)富集、高场强(HFSE)亏损,具显著的 Ti、Nb 和 Sr 谷,表明岩石源区直接或间接经历过板片流体交代,并显示与埃达克岩的亲石性。

(2)“三江”北段斑岩 Pb 均位于北半球参考线(NHRL)上方,并大致与其平行;基本处于富集地幔(EM II)范围内,而斑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 图中,“三江”北段斑岩投点基本位于沿一、三象限中间线分布,处于亏损地幔(MORB)与富集地幔的演化曲线上,被俯冲板片流体所交代的富集地幔可能为岩浆的源区。同时“三江”北段斑岩源区同位素更向亏损地幔端员靠拢,而软流圈物质注入量的多少则导致了“三江”北段成矿带、玉龙成矿带岩石地球化学特征的差异。

(3)始新世控制斑岩源区熔融和含矿斑岩侵位的走滑断裂,诱发了减压作用引起软流圈物质上涌,引起俯冲板片流体交代的壳幔过渡带的岩浆源区发生部分熔融,形成含矿岩浆,富含挥发分的含矿岩浆上涌就位于断裂控制部位形成“三江”北段斑岩体,从而形成斑岩钼铜矿。

致谢 感谢青海地质调查院王富春和王贵仁等高级工程师对作者野外工作的大力帮助,感谢审稿人对本文提出的评审意见,特别感谢中国地质大学王瑜教授在写作过程中的指导。

References

- acteristics and metallogenic model of the Narigongma copper-molybdenum deposit in the north part of the Sanjiang region, Southwest China [J]. *Geoscience*, 22(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, Liu Jianfeng, *et al.* 2006. High Mg[#] and Low Mg[#] potassic-ultrapotassic volcanic rocks and their source nature on the Tibetan plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 595~602 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lin, Zhang Jinjiang, Zhou Yong, *et al.* 1999. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 408~421 (in Chinese with English abstract).
- Han Yigui, Zhang Shihong, Franco Pirrajno, *et al.* 2007. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong'er shan-Waifangshan region, western Henan Province, China, and its tectonic Implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 253~265.
- Hao Jinhua, Chen Jianping, Dong Qingji, *et al.* 2010a. Geochemistry of the ore bearing porphyry of Lurige Mo(Cu) deposit, Qinghai: Implications for tectonic setting and its genesis [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(4): 328~340 (in Chinese with English abstract).
- Hao Jinhua, Chen Jianping, Tian Yongge, *et al.* 2010b. Mineralogical features of porphyries in the Narigongma Mo(Cu) deposit, southern Qinghai and their implications for petrogenesis and mineralization [J]. *Geology and Exploration*, 46(3): 367~376 (in Chinese with English abstract).
- He Xuexian, Tang Suohan and Zhu Xiangkun. 2007. Precise measurement of Nd isotopic ratios by means of multi-collector magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26: 19~22 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Kamber B S, Wei R H, *et al.* 2007. Tibetan continental collision zones: evidence for slab melt metasomatism Adakite-like porphyries from the southern [J]. *Contribution to Mineral Petrology*, 153: 105~120.
- Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Meng Xiangjin, *et al.* 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239~248 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Ma Hongwen, Khin Zaw, *et al.* 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet [J]. *Economic Geology*, 98: 125~145.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. A possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in Northern Chile [J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. *Mineralium Deposita*, 25(5): 521~544 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008. Trust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Cu Deposits in eastern and Northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model [J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 123~144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 25(4): 337~357 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xuan. 1990. The Nd and Sr isotopic compositions and its tectonic evolution meaning of Shanxi Province granitoid [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 6: 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong and Ling Hongfei. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 617~633.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, *et al.* 2006. Petrogenesis of Cu-bearing porphyry associated with continent-continent collisional setting: Evidence from the Yulong porphyry Cu Ore-belt, east Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 697~706 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong. 1999. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks from the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 98~104 (in Chinese with English abstract).
- Ma Hongwen. 1990. Granitoid and Mineralization of the Yulong Porphyry Copper Belt in Eastern Tibet [M]. China University of Geoscience Publishing House, Beijing, 157 (in Chinese).
- Miller, Schuster R, Klotzli U, *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Petrol.*, (40): 1339~1424.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, *et al.* 2009. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in Southern Tibet: petrological and geochemical constraints [J]. *Earth Science—China University of Geosciences*, 34(1): 17~27 (in Chinese with English abstract).
- Paul T, Xu Z Q, Françoise R, *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 294: 1671~1677.
- Qu X M, Hou Z Q, Khin Zaw, *et al.* 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the south and geochronological results [J]. *Ore Geology Review*, 31: 205~223.
- Sun S S and McDonough W L. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Soc. Lond.*, 42: 313~345.
- Wang J H, Yin A and Harrison. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone [J]. *Earth Planet*, 199: 123~133.
- Wang Zhaolin, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2009. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in Zadoe area, southern Qinghai [J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 157~169 (in Chinese with English abstract).

Wang Zhaolin, Yang Zhiming, Yang Zhusen, *et al.* 2008. Narigongma porphyry molybdenite copper deposit, northern extension of Yulong copper belt: evidence from the age of Re-Os isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 503~510 (in Chinese with English abstract).

Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2008. Genesis of porphyries and tectonic controls on the Narigongma porphyry Mo-Cu deposit, southern Qinghai [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 489~502 (in Chinese with English abstract).

Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Earth Planet Sci.*, 28: 211~280.

Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, *et al.* 2003. Isotope characteristics of Shoshonitic rocks in eastern Qinghai-Tibet Plateau magmatic rocks: Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Science in China, Ser. D*, 30(5): 493~499 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈建平, 唐菊兴, 陈勇, 等. 2008. 西南“三江”北段纳日贡玛铜钼矿床地质特征与成矿模式 [J]. *现代地质*, 22(1): 9~18.

迟效国, 董春艳, 刘建峰, 等. 2006. 青藏高原高 Mg[#] 和低 Mg[#] 两类钾质-超钾质火山岩及其源区性质 [J]. *岩石学报*, 22(3): 595~602.

邓军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 2010. “三江”特提斯复合造山与成矿作用 [J]. *矿床地质*, 29(1): 37~42.

丁林, 张进江, 周勇, 等. 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 15(3): 408~421.

郝金华, 陈建平, 董庆吉, 等. 2010a. 青海“三江”北段陆日格含矿斑岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 29(4): 328~339.

郝金华, 陈建平, 田永革, 等. 2010b. 青海纳日贡玛斑岩(铜)矿含矿斑岩矿物学特征及成岩成矿意义 [J]. *地质与勘探*, 46(3): 367~376.

何学贤, 唐索寒, 朱祥坤. 2007. 多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)高精度测定 Nd 同位素方法 [J]. *地球学报*, 26: 19~22.

侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带 埃

达克质斑岩成因与构造控制 [J]. *岩石学报*, 20(2): 239~248.

侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例 [J]. *矿床地质*, 22(1): 1~11.

侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型 [J]. *中国地质*, 33(2): 340~351.

侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用 [J]. *矿床地质*, 25(5): 521~544.

侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 等. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿 [J]. *现代地质*, 21(2): 332~351.

侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. *矿床地质*, 27(2): 123~144.

侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用 [J]. *矿床地质*, 25(4): 337~357.

黄董. 1990. 山西省花岗岩类的 Nd 和 Sr 同位素组成及构造演化意义 [J]. *岩石学报*, 6: 1~11.

姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 等. 2006. 陆-陆碰撞靠山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例 [J]. *岩石学报*, 22(3): 697~706.

赖绍聪. 1999. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制 [J]. *岩石学报*, 15(4): 98~104.

马鸿文. 1990. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿 [M]. 北京: 地质出版社.

莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束 [J]. *地学前缘*, 13(6): 43~51.

莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 34(1): 17~27.

王召林, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2009. 青海杂多地区新生代构造特征与两种类型矿床的关系 [J]. *矿床地质*, 28(2): 157~169.

王召林, 杨志明, 杨竹森, 等. 2008. 纳日贡玛斑岩钼铜矿床: 玉龙铜矿带的北延——来自辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的证据 [J]. *岩石学报*, 24(3): 503~510.

杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2008. 青海纳日贡玛斑岩(铜)矿床: 岩石成因构造控制 [J]. *岩石学报*, 24(3): 489~502.

张玉泉, 谢应雯, 李献华, 等. 2000. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义 [J]. *中国科学 D 辑*, 30(5): 493~499.