文章编号:1000-4734(2006)04-0377-10

与铜、金矿化有关的富碱侵入岩矿物化学研究

毕献武[1],胡瑞忠[1],J. E. Mungall[2],J. J. Hanley[2],
彭建堂[1],吴开兴[1],李鸿莉[1,3]

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550002;2. Department of Geology, University of Toronto, 22 Russell Street, Toronto, Canada, M5S 3B1;3. 中国科学院研究生院,北京,100039)

摘要:以哀牢山—金沙江富碱侵入岩带内与金矿化有关的姚安正长斑岩和与铜矿化有关的马厂箐花岗斑岩为研究对象,开展了系统的矿物化学研究。结果表明,姚安岩体形成的温压条件为(818±50) ℃和 0.9×10^8～1.3×10^8 Pa,马厂箐岩体形成的温压条件为(729±50) ℃和 2.2×10^8～2.8×10^8 Pa,两岩体的氧逸度均高于地幔石英-橄榄岩-磁铁矿出溶线,相对于马厂箐岩体而言,姚安岩体结晶时的氧逸度更高。两岩体矿化作用的差异与岩浆的分异程度有密切的关系。相对于铜矿化而言,氧逸度较高的岩浆有利于金矿化。

关键词:矿物化学;富碱侵入岩;铜、金矿化;哀牢山—金沙江富碱侵入岩带
中图分类号:P574.2;P618.41;P618.51　　**文献标识码**:A

作者简介:毕献武,女,1967 年生,博士,研究员,主要从事矿床地球化学研究. Email: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

岩浆结晶过程中热化学参数的研究对了解岩浆演化、岩浆成因、岩浆岩的侵位深度和形成环境等方面具有重要意义。矿物化学是目前运用较为普遍和有效的计算岩浆结晶过程中热化学参数(温度、压力、氧逸度等)的方法[1-16]。近年来,不少学者开展了与矿化作用有关的火成岩系统的矿物化学研究。结果表明,相对于斑岩型 Cu、W-Mo 成矿系统,与斑岩型 Au 和浅成低温 Au 成矿系统相联系的岩浆体系具有更高的氧逸度[10,17-21]。

我国滇西"三江"地区沿哀牢山—金沙江深大断裂及其附近,分布着一总体呈北西走向的巨型富碱侵入岩带。截止目前在该岩带的部分富碱侵入体中已发现若干与其有密切时空关系的金矿床和铜矿床,如姚安金矿床、北衙金矿床、马厂箐铜矿床、玉龙铜矿床[22-28]。这些矿床的发现,使得有关该岩带内岩石和矿床成因的研究,越来越受到地质工作者的关注并取得了重要研究进展[29-36]。近年来,作者重点对该岩带内的姚安金矿床和马厂箐铜矿床的成矿作用进行了研究,结果表明金和铜成矿分别与姚安和马厂箐两个富碱侵入岩体具有密切的成因联系,即富碱侵入岩成岩过程中分异出的岩浆流体参与了成矿作用[30,34-35,37]。但为什么两岩体成岩过程中分异出的岩浆流体会导致不同的矿化?针对这一问题,作者系统开展了与富碱侵入岩有关的铜和金成矿专属性研究。

角闪石、黑云母和长石是姚安岩体和马厂箐岩体的主要造岩矿物。作为与富碱侵入岩有关的铜和金成矿专属性研究系列之一,本文从研究富碱侵入岩成岩过程中氧逸度等物理化学条件的变化对形成铜和金矿的可能作用入手,运用矿物化学的方法,选择了姚安岩体和马厂箐岩体为研究对象,运用电子探针技术分析了两个岩体角闪石、黑云母和长石的主元素成分,通过研究矿物化学成分的变化,确定了两岩体的热化学参数,进而探讨了成岩与成矿之间存在的可能联系。

1 地质背景

哀牢山—金沙江富碱侵入岩带位于三江(金沙江—澜沧江—怒江)褶皱带的东缘,沿 NW-NNW 向的哀牢山—金沙江深大断裂及其两侧分布(图 1)。岩带长约 2000 km,宽 50～80 km,主要岩性有正长斑岩、碱性花岗斑岩、碱性花岗岩。研究表明,该岩带内富碱侵入岩体的成岩时代约为

收稿日期:2006-05-11
基金项目:国家自然科学基金(40373020);中国科学院西部之光项目;中国科学院创新项目(KZCX3-SW-125);中国科学院百人计划项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

30～40 Ma,形成于裂谷或地壳拉张的构造环境,是富集地幔(EMII)部分熔融的产物[36,38-40]。姚安岩体和马厂箐岩体属哀牢山—金沙江富碱侵入岩带的组成部分。

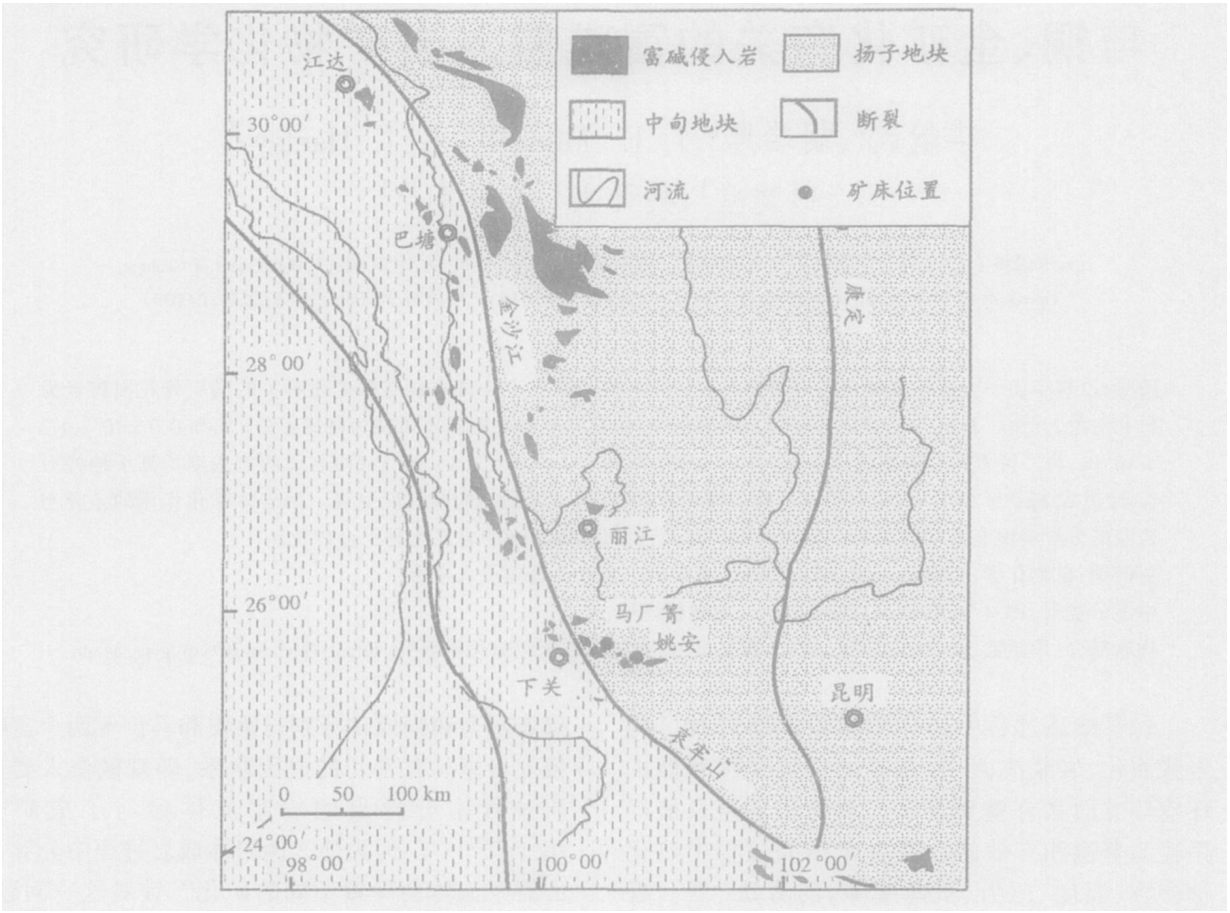

图 1 哀牢山—金沙江富碱侵入岩带地质简图(据张玉泉等[41]修改)

Fig. 1. Geological sketch map of the Ailaoshan-Jinshajiang alkaline intrusion belt (modified from Zhang et al.[14]).

1.1 姚安岩体

与姚安金矿床具有成因联系的姚安岩体呈岩株侵位于侏罗系妥甸组(J_3t)灰褐色粉砂质泥岩中,主要由正长斑岩和石英正长斑岩组成。正长斑岩为灰白色,块状构造,斑状结构。斑晶由微纹正长石、斜长石、辉石、角闪石及黑云母组成,基质为显晶质,成分与斑晶类似,副矿物以磷灰石、榍石、磁铁矿为主,含少量锆石;石英正长斑岩在姚安岩体中占的比例很小。K-Ar 定年结果显示该岩体的成岩时代为(33.5 ±1.0)Ma[40]。正长斑岩 SiO_2 含量为 58.5 %～67.1 %,$K_2O + Na_2O$ 为 8.6 %～10.0 %,K_2O/Na_2O 平均值为 1.4,A/CNK(Al_2O_3/($CaO + Na_2O + K_2O$))为 0.69～1.08,FeO_{total} 为 3.5 %,MgO/($FeO_{total} + MgO$)为 0.69～0.53[33]。

金矿体产于姚安岩体与侏罗系地层的内外接触带中。姚安金矿床可分为两个成矿阶段。早期硫化物阶段和晚期氧化物 + 硫化物阶段。与金矿化关系密切的蚀变包括沿断裂带两侧分布的钾长石化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化。REE 和同位素证据表明,姚安金矿床的早期成矿作用与矿体两侧的钾质蚀变密切相关,姚安富碱侵入岩体成岩过程中分异出的岩浆流体提供了早期成矿作用所必需的成矿流体[35]。

1.2 马厂箐岩体

马厂箐岩体出露面积约 1.3 km^2,位于洱海断裂与程海断裂的夹持部位,呈岩株侵位于下奥陶统(O_1)细碎屑岩和下泥盆统(D_1)灰岩中。该岩体主要岩性为碱性花岗斑岩和石英正长斑岩。花岗斑岩为灰白色,块状构造,斑状结构。斑晶由条纹长石、斜长石、石英、角闪石及黑云母组成。基质为显晶质,成分与斑晶类似。副矿物有磷灰石、榍石、磁

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁矿和少量锆石。石英正长斑岩为灰白色,块状构造,斑状结构。斑晶为条纹长石、斜长石、石英和黑云母。基质为长英质,微粒结构。副矿物为自形粒状磷灰石、榍石和磁铁矿。K-Ar 定年结果显示该岩体的成岩时代为(45 ±1.0) Ma[40]。花岗斑岩 SiO_2含量为 66.9 %～70.8 %, K_2O + Na_2O 平均为 8.3 %, K_2O/Na_2O 平均值为 1.2, A/CNK[Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)]为 0.87～1.12, FeO_{total} 为 2.3 %, MgO/(FeO_{total} + MgO)为 0.63～0.37[33]。

铜矿体产于岩体内部钾硅酸盐蚀变带内和岩体与下奥陶统(O_1)细碎屑岩的接触带中。铜矿化与钾长石化关系密切,同时叠加有硅化和绢云母化。地球化学证据表明,马厂箐富碱侵入岩体成岩过程中分异出的岩浆流体提供了铜成矿所必需的成矿流体[30,33]。

2　矿物化学

黑云母、角闪石和长石的主元素成分由 CAMECA SX50 电子探针测定,加速电压为 20 kV,电子束流 25 nA,束斑尺寸 5 μm,计数时间为 10 s。电子探针分析在加拿大多伦多大学地质系完成。黑云母和角闪石中的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 含量采用林文蔚[42]的待定矿物化学式阳离子数法确定。

2.1　黑云母

姚安岩体和马厂箐岩体黑云母的主元素电子探针分析结果列于表 1 和表 2。结果表明,姚安正长斑岩黑云母的 Mg/(Fe^{2+} + Mg)变化范围为 0.62～0.73,平均值为 0.66,而马厂箐花岗斑岩黑云母 Mg/(Fe^{2+} + Mg)变化范围为 0.57～0.68,平均值为 0.62。将样品点投影在金云母—铁云母—铁叶云母—镁叶云母图解(图 2)中,两个岩体的黑云母均为金云母。黑云母 Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)比值均一是氧化态岩浆的重要标志。两岩体黑云母 Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)比值均一(姚安约为 0.34,马厂箐约为 0.38),表明黑云母未遭受后期流体改造[13,43]。

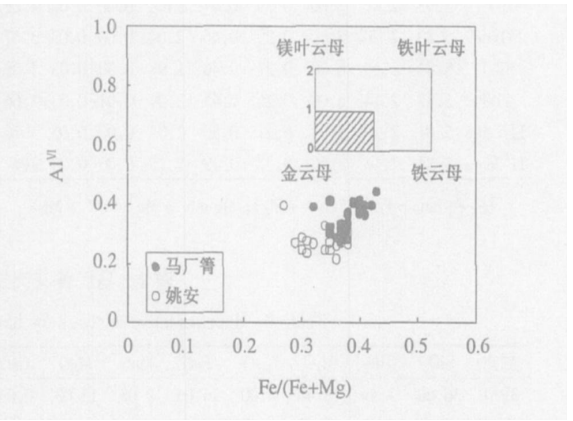

图 2　姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩黑云母分类图解(据 Elliott[4])

Fig. 2. Biotite classification of the Yao'an and Machangqing alkaline intrusions in the birany diagram Al^{VI} vs. Fe/(Fe + Mg).

表 1　姚安正长斑岩黑云母主元素成分

Table 1. Representative analyses for biotite from the Yao'an alkaline porphyry

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Fe_2O_{3Calc}	FeO_{Calc}	Total	O=F-Cl	CT
5-1core	37.31	4.00	13.42	0.00	14.56	0.27	15.72	0.04	0.62	9.16	3.60	0.22	2.18	12.60	98.90	1.56	97.34
5-1rim	37.21	4.11	13.22	0.00	12.54	0.23	17.22	0.01	0.59	9.20	3.74	0.18	1.93	10.80	98.26	1.62	96.64
3-1core	37.39	3.93	13.10	0.03	15.41	0.20	16.04	0.01	0.59	9.29	3.26	0.20	1.96	13.65	99.45	1.42	98.03
3-1rim	37.10	4.05	13.01	0.00	13.57	0.22	16.83	0.00	0.76	9.11	3.21	0.20	1.80	11.95	98.07	1.40	96.67
1-1core	36.59	3.90	13.18	0.05	16.23	0.21	14.85	0.01	0.54	8.96	2.16	0.21	2.21	14.24	96.87	0.95	95.92
1-2core	37.38	3.95	13.34	0.01	13.11	0.23	17.11	0.00	0.60	9.18	3.69	0.15	1.94	11.36	98.74	1.59	97.15
8-1core	37.57	3.67	12.90	0.01	15.73	0.16	15.25	0.00	0.56	9.17	2.35	0.23	2.25	13.70	97.59	1.04	96.55
9-1core	35.93	4.08	13.70	0.00	15.63	0.09	14.51	0.00	0.57	8.86	3.22	0.16	2.27	13.59	96.75	1.39	95.36
9-2core	37.59	4.06	13.23	0.06	14.07	0.20	16.55	0.00	0.61	9.35	4.11	0.18	2.01	12.26	100.01	1.77	98.24
9-3rim	37.07	3.98	13.38	0.00	13.56	0.14	16.80	0.01	0.56	9.35	4.03	0.21	1.86	11.88	99.09	1.75	97.34
3-1core	36.69	4.02	13.08	0.00	14.79	0.22	15.87	0.02	0.66	9.17	3.54	0.20	1.87	13.11	98.26	1.53	96.73
5-1	37.06	4.08	13.54	0.13	12.99	0.18	17.36	0.10	0.65	9.20	3.99	0.23	1.78	11.39	99.49	1.73	97.76
5-1′	38.82	3.84	13.68	0.01	11.59	0.14	17.66	0.07	0.83	9.20	4.03	0.22	2.04	9.75	100.09	1.74	98.35
5-1core	37.15	3.88	13.56	0.00	15.66	0.24	15.79	0.03	0.52	9.31	3.26	0.19	1.99	13.86	99.56	1.41	98.15
10-1	37.33	3.93	13.22	0.00	15.17	0.25	15.82	0.05	0.63	9.37	3.27	0.21	1.94	13.42	99.26	1.43	97.83
11-1	37.14	3.79	12.89	0.04	15.43	0.21	15.53	0.06	0.61	9.28	1.76	0.17	1.95	13.68	96.91	0.78	96.13
11-1core	36.44	4.14	12.84	0.00	15.30	0.17	15.57	0.03	0.59	9.09	3.24	0.21	1.94	13.56	97.61	1.41	96.20
11-2core	36.54	4.06	12.92	0.01	16.11	0.21	14.65	0.05	0.59	9.17	2.28	0.21	2.10	14.22	96.80	1.01	95.79

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 1

样号	Si	Al^{IV}	T-site	Al^{VI}	Ti	Fe^{2+}	Cr	Mn	Mg	Y-site	Ca	Na	K	X-site	Cations	F	Cl	Fe-ratio	Mg-ratio
5-1core	5.85	2.15	8.00	0.33	0.47	1.91	0.00	0.04	3.68	6.42	0.01	0.19	1.83	2.03	16.45	3.57	0.12	0.34	0.66
5-1rim	5.83	2.17	8.00	0.27	0.48	1.64	0.00	0.03	4.02	6.45	0.00	0.18	1.84	2.02	16.47	3.71	0.10	0.29	0.71
3-1core	5.84	2.16	8.00	0.24	0.46	2.01	0.00	0.03	3.73	6.48	0.00	0.18	1.85	2.03	16.51	3.22	0.11	0.35	0.65
3-1rim	5.83	2.17	8.00	0.23	0.48	1.78	0.00	0.03	3.94	6.46	0.00	0.23	1.83	2.06	16.52	3.19	0.11	0.31	0.69
1-1core	5.82	2.18	8.00	0.29	0.47	2.16	0.01	0.03	3.52	6.48	0.00	0.17	1.82	1.99	16.46	2.17	0.11	0.38	0.62
1-2core	5.83	2.17	8.00	0.28	0.46	1.71	0.00	0.03	3.98	6.47	0.00	0.18	1.83	2.01	16.48	3.64	0.08	0.30	0.70
8-1core	5.92	2.08	8.00	0.32	0.44	2.07	0.00	0.02	3.59	6.43	0.00	0.17	1.84	2.01	16.45	2.35	0.12	0.37	0.63
9-1core	5.77	2.23	8.00	0.36	0.49	2.10	0.00	0.01	3.47	6.44	0.00	0.18	1.82	2.00	16.44	3.27	0.09	0.38	0.62
9-2core	5.85	2.16	8.00	0.27	0.48	1.83	0.01	0.03	3.84	6.44	0.00	0.18	1.86	2.04	16.48	4.05	0.10	0.32	0.68
9-3rim	5.81	2.19	8.00	0.28	0.47	1.78	0.00	0.02	3.92	6.46	0.00	0.17	1.87	2.04	16.50	4.00	0.11	0.31	0.69
3-1core	5.81	2.19	8.00	0.25	0.48	1.96	0.00	0.03	3.75	6.46	0.00	0.20	1.85	2.06	16.52	3.54	0.11	0.34	0.66
5-1	5.77	2.23	8.00	0.25	0.48	1.69	0.02	0.02	4.03	6.48	0.02	0.20	1.83	2.04	16.52	3.93	0.12	0.30	0.70
5-1′	5.93	2.07	8.00	0.39	0.44	1.48	0.00	0.02	4.02	6.36	0.01	0.25	1.79	2.05	16.41	3.89	0.11	0.27	0.73
5-1core	5.80	2.20	8.00	0.29	0.46	2.04	0.00	0.03	3.67	6.49	0.01	0.16	1.85	2.01	16.50	3.21	0.10	0.36	0.64
10-1	5.84	2.16	8.00	0.27	0.46	1.98	0.00	0.03	3.69	6.44	0.01	0.19	1.87	2.07	16.51	3.24	0.11	0.35	0.65
11-1	5.87	2.14	8.00	0.26	0.45	2.04	0.01	0.03	3.66	6.44	0.01	0.19	1.87	2.07	16.51	1.76	0.09	0.36	0.64
11-1core	5.81	2.20	8.00	0.21	0.50	2.04	0.00	0.02	3.70	6.47	0.00	0.18	1.85	2.04	16.51	3.26	0.11	0.36	0.64
11-2core	5.84	2.16	8.00	0.27	0.49	2.15	0.00	0.03	3.49	6.42	0.01	0.18	1.87	2.06	16.48	2.30	0.11	0.38	0.62

注: Fe-ratio = Fe^{2+}/ (Fe^{2+} + Mg); Mg-ratio = Mg/ (Fe^{2+} + Mg).

表 2 马厂箐花岗斑岩黑云母主元素成分

Table 2. Representative analyses for biotite from the Machangqing alkaline porphyry

测点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Fe_2O_{3Calc}	FeO_{Calc}	Total	O=F=Cl	CT
39A1	36.60	3.55	13.40	0.00	16.05	0.08	15.08	0.03	0.11	9.80	0.94	0.16	1.98	14.26	95.80	0.43	95.37
39A2	36.29	3.41	13.42	0.07	16.26	0.07	14.91	0.01	0.10	9.86	1.03	0.10	1.82	14.62	95.51	0.46	95.05
39A3	36.90	3.37	13.39	0.03	16.34	0.03	15.30	0.01	0.14	9.67	0.82	0.09	2.00	14.54	96.08	0.37	95.71
39A4	36.68	3.49	13.28	0.00	16.26	0.10	14.89	0.01	0.12	9.66	0.95	0.13	2.10	14.37	95.57	0.43	95.14
39A5	34.53	2.89	14.34	0.06	17.42	0.05	14.17	0.00	0.09	9.68	0.65	0.04	1.01	16.52	93.93	0.28	93.65
39A6	34.62	3.29	14.20	0.00	17.54	0.14	14.15	0.04	0.08	9.33	0.76	0.06	1.58	16.12	94.20	0.33	93.87
39A7	34.44	3.18	14.20	0.13	16.68	0.06	14.33	0.02	0.09	9.21	0.87	0.05	1.67	15.17	93.27	0.38	92.89
39A8	34.25	3.31	14.17	0.02	16.60	0.18	13.95	0.04	0.04	9.72	0.54	0.11	1.37	15.36	92.91	0.25	92.66
39A9	34.74	3.14	14.11	0.04	16.31	0.10	14.30	0.03	0.13	9.63	0.82	0.04	1.44	15.02	93.38	0.35	93.03
39A10	34.56	3.25	14.12	0.00	16.51	0.09	14.06	0.06	0.08	9.44	0.74	0.07	1.69	14.99	92.98	0.33	92.65
39B1	34.62	3.51	14.27	0.00	17.64	0.11	13.45	0.00	0.11	9.67	0.69	0.12	1.64	16.16	94.17	0.32	93.85
39B2	34.86	3.35	13.92	0.01	16.85	0.13	13.75	0.29	0.09	9.24	1.08	0.12	1.97	15.08	93.71	0.48	93.23
39B3	34.56	3.14	13.73	0.01	15.79	0.25	14.51	0.55	0.06	8.74	0.86	0.10	1.96	14.03	92.29	0.38	91.91
39B4	34.44	3.32	14.21	0.01	17.10	0.19	14.22	0.13	0.07	9.04	0.83	0.07	1.79	15.49	93.63	0.36	93.27
39B5	34.48	3.51	14.52	0.01	17.53	0.16	13.30	0.07	0.09	9.03	0.72	0.10	2.18	15.57	93.51	0.33	93.18
39B6	35.93	3.41	13.38	0.02	15.63	0.26	15.18	0.00	0.08	9.88	1.86	0.12	1.63	14.16	95.73	0.81	94.92
39B7	35.98	3.43	13.40	0.00	15.79	0.22	15.24	0.04	0.14	9.87	2.09	0.11	1.52	14.42	96.31	0.91	95.40
38A1	35.93	3.63	13.28	0.04	15.95	0.24	15.14	0.00	0.12	9.88	1.53	0.13	1.60	14.51	95.88	0.67	95.21
38A2	36.28	3.51	13.30	0.00	16.29	0.26	15.14	0.02	0.11	10.00	1.39	0.15	1.55	14.89	96.44	0.62	95.82
38A3	36.41	3.65	13.14	0.06	15.07	0.19	15.38	0.01	0.08	9.94	1.89	0.09	1.87	13.38	95.91	0.82	95.09
38A4	36.29	3.07	13.01	0.03	15.46	0.32	15.70	0.07	0.08	9.86	1.98	0.15	1.42	14.18	96.01	0.87	95.14
38A5	37.01	3.15	13.04	0.00	15.33	0.18	15.72	0.05	0.08	10.03	2.41	0.17	1.72	13.79	97.16	1.05	96.11
38A6	37.72	2.02	12.44	0.01	14.05	0.24	16.61	0.04	0.06	9.77	2.27	0.12	1.68	12.54	95.35	0.98	94.37
38B1	37.11	3.16	12.99	0.00	16.36	0.58	15.11	0.00	0.05	9.87	1.77	0.09	1.90	14.65	97.08	0.77	96.31
38B2	36.50	2.65	13.47	0.03	15.28	0.22	15.99	0.06	0.05	8.57	1.63	0.09	2.29	13.23	94.53	0.71	93.82

测点	Si	Al^{IV}	T-site	Al^{VI}	Ti	Fe^{2+}	Cr	Mn	Mg	Y-site	Ca	Na	K	X-site	Cations	F	Cl	Fe-ratio	Mg-ratio
39A1	5.82	2.18	8.00	0.33	0.42	2.14	0.00	0.01	3.58	6.48	0.01	0.04	1.99	2.03	16.51	0.95	0.09	0.37	0.63
39A2	5.80	2.20	8.00	0.33	0.41	2.18	0.01	0.01	3.56	6.49	0.00	0.03	2.01	2.04	16.54	1.04	0.05	0.38	0.62
39A3	5.84	2.16	8.00	0.33	0.40	2.16	0.00	0.00	3.61	6.51	0.00	0.04	1.95	2.00	16.51	0.82	0.05	0.37	0.63
39A4	5.85	2.15	8.00	0.34	0.42	2.17	0.00	0.01	3.54	6.48	0.00	0.04	1.96	2.00	16.49	0.96	0.07	0.38	0.62
39A5	5.64	2.36	8.00	0.40	0.36	2.38	0.01	0.01	3.45	6.60	0.00	0.03	2.02	2.04	16.64	0.67	0.02	0.41	0.59

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表 2

测点	Si	Al^{IV}	T-site	Al^{VI}	Ti	Fe^{2+}	Cr	Mn	Mg	Y-site	Ca	Na	K	X-site	Cations	F	Cl	Fe-ratio	Mg-ratio
39A6	5.64	2.36	8.00	0.36	0.40	2.39	0.00	0.02	3.43	6.61	0.01	0.02	1.94	1.97	16.58	0.78	0.03	0.41	0.59
39A7	5.65	2.35	8.00	0.39	0.39	2.29	0.02	0.01	3.50	6.60	0.00	0.03	1.93	1.96	16.56	0.90	0.03	0.40	0.60
39A8	5.64	2.36	8.00	0.39	0.41	2.29	0.00	0.03	3.43	6.54	0.01	0.01	2.04	2.06	16.60	0.56	0.06	0.40	0.60
39A9	5.69	2.31	8.00	0.41	0.39	2.23	0.01	0.01	3.49	6.53	0.01	0.04	2.01	2.06	16.59	0.85	0.02	0.39	0.61
39A10	5.68	2.32	8.00	0.41	0.40	2.27	0.00	0.01	3.44	6.54	0.01	0.03	1.98	2.02	16.55	0.77	0.04	0.40	0.60
39B1	5.65	2.35	8.00	0.39	0.43	2.41	0.00	0.02	3.27	6.52	0.00	0.03	2.01	2.05	16.57	0.71	0.07	0.42	0.58
39B2	5.71	2.29	8.00	0.40	0.41	2.31	0.00	0.02	3.36	6.50	0.05	0.03	1.93	2.01	16.51	1.12	0.07	0.41	0.59
39B3	5.70	2.30	8.00	0.37	0.39	2.18	0.00	0.04	3.57	6.54	0.10	0.02	1.84	1.96	16.50	0.89	0.06	0.38	0.62
39B4	5.63	2.37	8.00	0.37	0.41	2.34	0.00	0.03	3.47	6.61	0.02	0.02	1.89	1.93	16.54	0.86	0.04	0.40	0.60
39B5	5.65	2.36	8.00	0.45	0.43	2.40	0.00	0.02	3.25	6.55	0.01	0.03	1.89	1.93	16.48	0.75	0.05	0.43	0.57
39B6	5.78	2.22	8.00	0.32	0.41	2.10	0.00	0.04	3.64	6.51	0.00	0.02	2.03	2.05	16.56	1.89	0.06	0.37	0.63
39B7	5.77	2.23	8.00	0.30	0.41	2.12	0.00	0.03	3.64	6.51	0.01	0.04	2.02	2.07	16.58	2.12	0.06	0.37	0.63
38A1	5.76	2.24	8.00	0.27	0.44	2.14	0.00	0.03	3.62	6.51	0.00	0.04	2.02	2.06	16.57	1.55	0.07	0.37	0.63
38A2	5.78	2.22	8.00	0.28	0.42	2.17	0.00	0.04	3.60	6.51	0.00	0.03	2.03	2.07	16.58	1.40	0.08	0.38	0.62
38A3	5.83	2.17	8.00	0.30	0.44	2.02	0.01	0.03	3.67	6.46	0.00	0.03	2.03	2.06	16.52	1.92	0.05	0.35	0.65
38A4	5.83	2.17	8.00	0.29	0.37	2.08	0.00	0.04	3.76	6.53	0.01	0.03	2.02	2.06	16.59	2.01	0.08	0.36	0.64
38A5	5.88	2.12	8.00	0.32	0.38	2.04	0.00	0.02	3.72	6.48	0.01	0.02	2.03	2.07	16.55	2.42	0.09	0.35	0.65
38A6	6.04	1.96	8.00	0.39	0.24	1.88	0.00	0.03	3.97	6.52	0.01	0.02	2.00	2.02	16.54	2.30	0.06	0.32	0.68
38B1	5.89	2.11	8.00	0.31	0.38	2.17	0.00	0.08	3.57	6.51	0.00	0.01	2.00	2.01	16.52	1.78	0.05	0.38	0.62
38B2	5.86	2.14	8.00	0.41	0.32	2.05	0.00	0.03	3.83	6.65	0.01	0.02	1.76	1.78	16.43	1.66	0.05	0.35	0.65

注:Fe-ratio = $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$; Mg-ratio = $Mg/(Fe^{2+}+Mg)$.

2.2　角闪石

角闪石的主元素电子探针分析结果列于表 3。根据 Leake 等[44]的分类,角闪石为韭闪石。马厂箐岩体韭闪石的 Fe/(Fe + Mg)比值变化范围为 0.38～0.42,$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$比值为 0.31～0.35,姚安岩体 Fe/(Fe + Mg)韭闪石比值变化范围为 0.40～0.43,$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$比值为 0.29～0.40。

2.3　长石

长石主元素电子探针分析结果列于表 4。长石均由 Ab、An 和 Or 三个端元组成,成分及光性特征表明属斜长石和正长石,相对于马长箐岩体,姚安岩体长石中的 An 和 Or 端元组分增加,表明姚安正长斑岩长石是由高温富钾的岩浆结晶形成的。

表 3　姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩角闪石主元素成分

Table 3. Representative analyses for amphibole from the Yao'an and Machangqing alkaline porphyry

	M39-5-1	M39-5-2	M39-5-3	M39-5-4	M39-5-5	Y36-10-1	Y36-10-2	Y36-3-1	Y36-3-2	Y36-3-3	Y36-3-4	Y35-6-2	Y35-6-3	Y35-5-2	Y33-11-1
SiO_2	45.31	53.43	45.96	46.19	51.71	44.73	45.61	44.85	44.70	46.82	45.37	43.65	44.62	43.88	44.26
TiO_2	1.19	0.23	0.99	1.09	0.46	1.59	1.40	1.59	1.38	1.07	1.09	1.39	1.44	1.19	1.61
Al_2O_3	7.64	2.30	7.06	7.26	3.47	8.54	7.52	8.43	8.10	7.17	7.81	8.21	8.40	7.10	8.24
FeO	16.02	10.56	14.96	14.57	11.22	16.49	15.75	16.33	16.29	15.13	16.57	15.46	16.16	14.53	15.74
Cr_2O_3	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.04	0.09	0.07	0.03	0.01	0.02	0.00	0.05	0.00	0.05
MnO	0.51	0.17	0.60	0.47	0.18	0.38	0.36	0.34	0.38	0.39	0.38	0.34	0.35	0.35	0.45
MgO	12.48	17.24	12.85	13.14	16.47	12.43	12.85	12.66	12.53	13.15	12.43	11.69	12.30	12.47	12.43
CaO	11.32	11.67	11.32	11.29	11.77	11.16	11.17	11.26	10.89	11.08	10.94	10.48	11.15	10.52	11.01
Na_2O	1.68	0.59	1.65	1.59	0.92	2.07	2.05	2.20	2.07	2.00	2.02	1.93	2.25	1.90	2.05
K_2O	0.93	0.62	0.84	0.83	0.30	1.25	1.24	1.26	1.16	1.01	1.15	1.13	1.24	1.01	1.19
F	0.45	0.21	0.30	0.31	0.43	0.77	0.63	0.79	1.21	1.00	0.78	0.84	0.96	0.94	1.11
Cl	0.09	0.02	0.09	0.09	0.06	0.21	0.24	0.17	0.21	0.11	0.21	0.27	0.21	0.20	0.21
Fe_2O_{3Calc}	5.10	0.04	6.17	6.00	2.39	8.20	6.84	8.46	7.72	5.15	6.74	5.66	7.50	5.86	7.86
FeO_{Calc}	10.92	10.51	8.79	8.57	8.83	8.28	8.92	7.87	8.57	9.98	9.82	9.80	8.66	8.67	7.88
Total	97.63	97.03	96.61	96.83	96.97	99.60	98.82	99.88	98.91	98.94	98.75	95.39	99.10	94.09	98.29

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 3

	M39-5-1	M39-5-2	M39-5-3	M39-5-4	M39-5-5	Y36-10-1	Y36-10-2	Y36-3-1	Y36-3-2	Y36-3-3	Y36-3-4	Y35-6-2	Y35-6-3	Y35-5-2	Y33-11-1
O-F-Cl	0.21	0.09	0.15	0.15	0.19	0.37	0.32	0.37	0.55	0.45	0.38	0.42	0.45	0.44	0.51
Si	6.77	7.69	6.90	6.89	7.49	6.62	6.78	6.62	6.67	6.93	6.76	6.74	6.66	6.84	6.65
Al^{IV}	1.23	0.31	1.10	1.11	0.51	1.39	1.22	1.39	1.33	1.07	1.24	1.26	1.34	1.16	1.35
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al^{VI}	0.11	0.08	0.14	0.17	0.09	0.10	0.09	0.08	0.10	0.17	0.13	0.23	0.14	0.14	0.10
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Fe^{3+}	0.39	0.22	0.29	0.30	0.24	0.36	0.29	0.34	0.40	0.28	0.38	0.31	0.29	0.32	0.34
Ti	0.13	0.03	0.11	0.12	0.05	0.18	0.16	0.18	0.15	0.12	0.12	0.16	0.16	0.14	0.18
Mg	2.78	3.70	2.88	2.92	3.56	2.74	2.85	2.78	2.79	2.90	2.76	2.69	2.74	2.90	2.78
Fe^{2}	1.55	0.96	1.54	1.45	1.06	1.59	1.58	1.60	1.54	1.51	1.59	1.58	1.65	1.49	1.56
Mn	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
M1 ,M2 ,M3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Fe^{2+}	0.06	0.08	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08	0.08	0.10	0.09	0.10	0.10	0.08	0.09	0.08
Mn	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Ca	1.81	1.80	1.82	1.80	1.83	1.77	1.78	1.78	1.74	1.76	1.75	1.73	1.78	1.76	1.77
Na	0.10	0.08	0.10	0.10	0.09	0.12	0.12	0.12	0.14	0.13	0.14	0.14	0.12	0.13	0.12
M4	2.00	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.39	0.08	0.39	0.36	0.17	0.47	0.47	0.51	0.46	0.45	0.45	0.44	0.54	0.45	0.48
K	0.18	0.11	0.16	0.16	0.06	0.24	0.24	0.24	0.22	0.19	0.22	0.22	0.24	0.20	0.23
A-site	0.56	0.20	0.55	0.51	0.22	0.71	0.71	0.75	0.68	0.64	0.67	0.66	0.77	0.65	0.71
Total	15.56	15.17	15.55	15.51	15.22	15.71	15.71	15.75	15.68	15.64	15.67	15.66	15.77	15.65	15.71
Cl	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05
F	0.21	0.09	0.14	0.14	0.20	0.36	0.30	0.37	0.57	0.47	0.37	0.41	0.45	0.47	0.53
$Fe^{3+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+})$	0.30	0.004	0.39	0.39	0.20	0.47	0.40	0.49	0.45	0.32	0.38	0.34	0.44	0.39	0.47
Fe/(Fe + Mg)	0.41	0.24	0.39	0.38	0.27	0.42	0.40	0.41	0.41	0.38	0.42	0.41	0.41	0.38	0.41

注: FeO_{Calc}, Fe_2O_{3Calc}根据林文蔚等[42]计算.

表 4 姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩长石主元素成分

Table 4. Representative electron microprobe analyses of feldspar pairs from the Yao'an and Machangqing intrusions

样品	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	Ab	An	Or
M39-5Ab1	65.71	0.05	20.85	0.21	0.00	0.01	1.71	9.78	1.02	99.33	85.80	8.30	5.90
M39-5Ab2	64.75	0.00	20.07	0.59	0.06	1.02	2.22	9.88	0.36	98.95	87.10	10.80	2.10
M39-5Ab3	66.35	0.00	20.76	0.17	0.02	0.00	1.61	10.83	0.31	100.05	90.80	7.40	1.70
y36-2Ab2	62.00	0.06	22.32	0.48	0.02	0.13	3.90	7.90	1.35	98.16	72.20	19.70	8.10
y36-2Ab1	62.88	0.00	22.98	0.15	0.00	0.00	4.08	8.23	1.40	99.71	72.20	19.80	8.10
y35-2Ab1	63.47	0.00	22.79	0.34	0.00	0.01	3.87	8.35	1.11	99.94	74.40	19.10	6.50
Y33-3Ab1	63.50	0.03	22.05	0.17	0.04	0.01	3.34	8.64	1.75	99.51	74.20	15.90	9.90
Y33-3Ab2	63.81	0.03	22.06	0.22	0.00	0.02	3.39	8.31	1.79	99.62	73.10	16.50	10.40
Y33-1Ab2	63.86	0.02	22.70	0.25	0.04	0.00	3.71	8.50	1.52	100.60	73.60	17.80	8.70
Y33-1Ab3	61.09	0.02	22.55	0.30	0.00	0.00	4.11	7.89	1.36	97.32	71.40	20.50	8.10
Y36-2Or1	64.09	0.04	19.16	0.10	0.03	0.00	0.33	4.37	9.97	98.10	39.40	1.60	59.00
Y36-2Or2	64.42	0.06	19.30	0.14	0.00	0.00	0.34	4.38	9.72	98.36	40.00	1.70	58.30
Y35-2Or1	64.34	0.04	19.47	0.21	0.00	0.01	0.61	5.14	8.40	98.22	46.70	3.10	50.20
Y33-3Or1	63.58	0.04	19.11	0.10	0.00	0.00	0.40	4.59	9.50	97.30	41.50	2.00	56.50
Y33-3Or2	63.94	0.06	19.25	0.15	0.00	0.00	0.40	4.79	9.51	98.10	42.50	2.00	55.50
Y33-1Or1	63.84	0.05	19.17	0.15	0.01	0.00	0.44	4.63	9.50	97.78	41.60	2.20	56.20
Y33-1Or2	65.78	0.06	19.42	0.07	0.00	0.00	0.21	3.34	10.08	98.96	33.10	1.20	65.70
Y33-1Or3	64.29	0.08	19.09	0.10	0.00	0.01	0.38	4.20	9.48	97.63	39.40	2.00	58.60

注: 样品号中,M —马厂箐花岗斑岩样品, Y —姚安正长斑岩样品.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　温度、压力和氧逸度估计

3.1　温度-压力条件

运用角闪石—斜长石温度计[7]和角闪石压力计[2]估算马厂箐花岗斑岩的 t-p 条件,运用二长石温度计[5]和角闪石压力计[2]估算姚安正长斑岩的 t-p 条件。用于计算岩石压力条件的角闪石成分需满足 $0.4 < Fe/(Fe + Mg) < 0.65$ 和 $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Fe^{2+}) > 0.2$。压力计算采用下列公式[2]:

$$p(\pm 0.6 \times 10^8 Pa) = 4.76Al^{tot} - 3.01 - [(t - 675)/85][0.530Al^{tot} + 0.005294(t - 675)]$$

其中 t(温度)以 ℃为单位,$Al^{tot} = Al^{IV} + Al^{VI}$。计算结果表明,马厂箐花岗斑岩形成温度为 725～733 ℃,压力为 2.2×10^8～2.8×10^8 Pa,姚安正长斑岩形成温度为 812～824 ℃,压力为 0.9×10^8～1.3×10^8 Pa。

3.2　氧逸度

马厂箐花岗斑岩含有原生的榍石-磁铁矿-石英组合,指示了原始岩浆具有较高的氧逸度 $f(O_2)$,即矿物结晶时 $f(O_2)$ 高于石英-橄榄石-磁铁矿出溶线,接近于 Ni-NiO 出溶线[8,45]。

与磁铁矿和钾长石共生的黑云母 Fe^{2+}、Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 比值可用来估计岩浆的氧逸度[15]。图 3 为两个岩体黑云母的 Fe^{2+}、Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 三端元成分图解。从图中可以看出,两个岩体的样品点可明显分为两个区域,其中姚安正长斑岩样品点落在赤铁矿-磁铁矿(HM)出溶线和 Ni-NiO(NNO)出溶线之间,靠近Ni-NiO出溶线,而马厂箐花岗斑岩样品点落在 Ni-NiO 出溶线和石英-橄榄石-磁铁矿(QFM)出溶线之间,由此可见,相对于马厂箐花岗斑岩,姚安正长斑岩形成于更高的 $f(O_2)$ 条件。

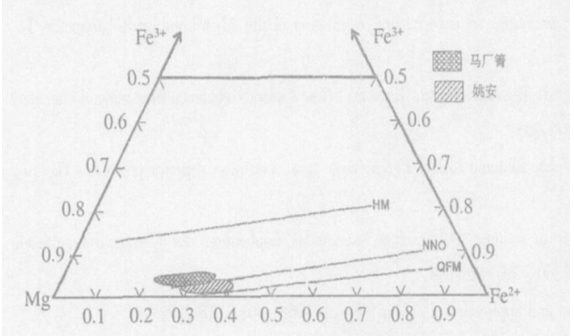

图 3　姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩黑云母的 Fe^{2+}、Fe^{3+} 和 Mg 三端元成分图解

Fig. 3. Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg ternary diagram for estimation of redox conditions for biotite crystallization in the Yao'an and Machangqing alkaline intrusions.

4　讨　论

Cu 和 Au 在元素周期表上都属第 6 周期 ⅠB 族元素,具有相同的电子构型,因而具有某些类似的地球化学性状,如 Cu 和 Au 均具较强的亲硫性,为亲铜元素。但 Au 的电离势、负电性和氧化还原电位均高于 Cu,因此二者之间的差异又造成了它们各自不同的地球化学特征,如 Au 常以原子状态存在于自然界中,呈自然金和金属互化物出现,而 Cu 则主要呈硫化物和含硫盐矿物存在[46]。

近年来,作者重点对姚安金矿床和马厂箐铜矿床的成矿作用进行了研究,结果表明金和铜的成矿分别与姚安和马厂箐两个富碱侵入岩体具有成因联系,即它们成岩过程中分异出的岩浆流体参与了成矿作用[30,34-35,37,47]。姚安和马厂箐富碱侵入岩的矿物学和矿物化学证据,指示了与铜和金成矿作用具有成因联系的富碱侵入岩具有高的氧逸度,与巴布亚新几内亚 Lihir Island、澳大利亚 Cadia、美国 Bingham 和加拿大 Columbia 的 Au-Cu 矿床寄主的侵入岩体亦显示类似的特征[48-51]。

岩浆中金属元素的浓度反映了岩浆源区的特征、岩浆分异和岩浆的氧化还原状态。金和铜在岩浆结晶分异过程中为相容元素,要使其在残余岩浆中富集,条件是岩浆体系中硫不饱和[52]。如果形成姚安岩体和马厂箐岩体的初始岩浆富集亲铜元素,那么这种初始岩浆应起源于硫不饱和的地幔源区。岩石化学和矿物化学研究表明,姚安和马厂箐富碱侵入岩具有高碱富钾的特征,且姚安岩体钾含量高于马厂箐岩体[33]。前述研究表明,姚安正长斑岩的 FeO 含量(平均为 3.5 %)高于马厂箐花岗斑岩 FeO 含量(平均为 2.3 %),表明尽管姚安正长斑岩具有高钾的特征,但是其分异程度低于马厂箐花岗斑岩,因此这种高钾的特征是由其源区性质决定而不是岩浆结晶分异的结果,暗示形成富碱侵入岩的源区是富钾的。钾质岩浆熔体的高碱含量使 Fe^{3+}/Fe^{2+} 的比值增加,形成高氧逸度[53],而高的氧逸度可抑制体系的硫达到饱和。因此,这种富碱高钾岩浆体系中硫不

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

饱和不是地幔源区部分熔融程度高所致,而是富钾、高铁流体交代作用导致地幔源区硫化物氧化的结果[20]。姚安岩体和马厂箐岩体具有类似的富集地幔源区,形成于相似的大地构造背景,两岩体空间距离不超过 50 km[33],但两者形成的物理化学条件存在差异:马厂箐花岗斑岩形成温度为 725～733 ℃,压力为 2.2 ×10^8～2.8 ×10^8 Pa,姚安正长斑岩形成温度为 812～824 ℃,压力为 0.9 ×10^8～1.3 ×10^8 Pa。两岩体的氧逸度均高于地幔石英-橄榄岩-磁铁矿出溶线,相对于马厂箐岩体而言,姚安岩体结晶时的氧逸度更高。如果认为形成这两岩体的岩浆起源于硫不饱和的富集地幔,那么岩浆分异历史和岩浆的氧化还原状态可能是岩浆演化过程中铜和金行为的主要控制因素,但是有关同源岩浆的不同的演化途径尚需进一步研究。

5 小 结

本文从矿物化学角度研究了富碱侵入岩的成岩条件。结果表明,与铜矿化和与金矿化有关的富碱侵入岩形成条件有差异,研究区岩浆分异历史和岩浆的氧化还原状态是岩浆演化过程中铜和金行为的主要控制因素。

致谢:感谢加拿大多伦多大学 C. Cermignani 博士的大力支持。

参 考 文 献:

[1] Ague J J. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: implications for the aluminum-in-hornblende barometer[J]. *Geology*, 1997, 25: 563-566.

[2] Anderson J L, Smith D R. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer[J]. *Am Mineral*, 1995, 80: 549-559.

[3] Elliott B A, Rämö O T, Nironen M. Mineral chemistry constraints on the evolution of the 1.88 - 1.87 Ga post-kinematic granite plutons in the Central Finland Granitoid Complex[J]. *Lithos*, 1998, 45: 109-129.

[4] Elliott B A. Crystallization conditions of the Wiborg rapakivi batholith, SE Finland: an evaluation of amphibole and biotite mineral chemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2001, 72: 305-324.

[5] Fuhrman M L, Lindsley D H. Ternary-feldspar modeling and thermometry[J]. *Am Mineral*, 1988, 73: 201- 215.

[6] Ghent E D, Nicholls J, Simony P S, Sevigny J H, Stout M Z. Hornblende barometry of the Nelson batholith, southeastern British Columbia: Tectonic implications[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1991, 28: 1982-1991.

[7] Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 116: 433-447.

[8] Loferski P J, Ayuso A. Petrography and mineral chemistry of the composite Deboullie pluton, northern Maine, U. S. A.: implications for the genesis of Cu-Mo mineralization[J]. *Chem Geol*, 1995, 123: 89-105.

[9] Ludington S. The biotite-apatite geothermometer revisited[J]. *Am Mineral*, 1978, 63: 551-553.

[10] Rowins S M, Lalonde A E, Cameron E M. Magmatic oxidation in the syenitic Murdock Creek intrusion, Kirkland lake, Ontario: evidence from the ferromagnesian silicates[J]. *Geology*, 1991, 99: 395-414.

[11] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 110: 304-310.

[12] Stewart R B, Price R C, Smith I E M. Evolution of high-K arc magma, Egmont volcano, Taranaki, New Zealand: evidence from mineral chemistry[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1996, 74: 275-295.

[13] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of archean felsic plutonic rocks, Berens river aera, northwest superior province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38: 455- 470.

[14] Vyhnal C R, Mcsween H Y, Speer J A. Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids: implications for aluminum hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability[J]. *Am Mineral*, 1991, 76: 176-188.

[15] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. *Am Mineral*, 1965, 50: 1228-1272.

[16] Zhu C, Sverjensky D A. F-Cl-OH partitioning between biotite and apatite[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3435-3467.

[17] Blevin D L, Chappell B W. The role of magma sources, oxidization states and fractionation in determing the granite metallogeny of Eastern Australia[J]. *Trans R Soc Edinb Earth Sci*, 1992, 83: 305- 316.

[18] Ishihara S. The granitoid series and mineralization[J]. *Economic Geology*, 1981, 75th Anniversary Volume: 458 -484.

[19] Lowenstern J B. et al. Evidence for extreme partitioning of copper into a magmatic vapor phase[J]. *Science*, 1991, 252: 1405-1409.

[20] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. *Geology*, 2002, 30: 915-918.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[21] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region[J]. *Austr Jour Earth Sci*,1997, 44: 373-388.

[22] 李文桦.藏东—滇西斑岩铜、铅多金属矿带岩石化学特征及其与成矿的关系[J].地质与勘探,1982,(4):10-16.

[23] 沈秋伟. 论滇西喜山期碱性岩浆作用有关的金矿床[J]. 长春地质学院学报, 1991, 21:403-410.

[24] 王会远.北衙金矿地质特征及成矿地质条件的初步分析[J]. 西南矿产地质,1993,(2):17-24.

[25] 莆为民,等.鹤庆北衙富碱斑岩侵入体的岩石学特征及其构造环境[J].云南地质,1994,(1):33-41

[26] 向树元,叶俊林. 新的金矿类型—与碱性岩有关的金矿床[J]. 矿产与地质,1995,(2):73-76.

[27] Peng Z, Matanabe M, Hoshino K, Sueoka S, Yano T. The Machangqing copper-molybdenum deposits, Yunnan, China—an example of Himalayan porphyry-hosted Cu-Mo mineralization[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1998, 63: 95-117.

[28] 阎生好,王登红,余金杰.青藏高原西藏地区的喜马拉雅期成矿[A].陈毓川和王登红:喜马拉雅期内生成矿作用研究[M].北京:地震出版社,2001: 38-45.

[29] 谢应雯,张玉泉. 哀牢山—金沙江裂谷系岩石中镁铁云母成分特征及其岩石学意义[J].矿物学报,1995, 15(1):81-87.

[30] Hu R Z, Burnard P G, Turner G, Bi X W. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan province, China[J]. *Chem. Geol.*, 1998, 146: 55-63.

[31] 邓万明,等.滇西新生代富碱斑岩的岩石学特征与成因[J]. 地质科学,1998, 33(4):412-425.

[32] Wang P L, Lo C H, Lee T Y, Chung S L, Lan C Y, Yem N T. Thermochronological evidence for the movement of the Ailaoshan—Red River shear zone: A perspective from Vietnam[J]. *Geology*,1998, 26: 887-890.

[33] 毕献武. 滇西"三江"地区富碱侵入岩及其与铜、金成矿关系的研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 1999: 1-76.

[34] Bi X W, Cornell, D H, Hu R Z. The origin of altered fluid: REE evidence from primary and secondary feldspars in the mineralization-alteration zone[J]. *Ore Geology Reviews*,2002, 19: 69-78.

[35] Bi X W, Hu R Z, Cornell, D H. Trace Element and Isotope Evidence for the Evolution of Ore-forming Fluid of Yao'an Gold Deposit, Yunnan province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2004,37(3): 378-392.

[36] 毕献武,胡瑞忠,彭建堂,吴开兴,战新志. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体岩石地球化学特征[J].岩石学报,2005,(1):113-124.

[37] Bi X W, Hu R Z, Ye Z J, Shao S X. Relations between A-type granites and copper minralization as exemplified by the Machangqing Cu deposit [J]. *Science in China (Series D)*,2000. 43 (1): 93-102.

[38] Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y Q, Xie Y W, Li X H, Wang L W, Wang P L. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago[J]. *Nature*,1998, 394:769-773.

[39] 张玉泉,谢应雯,涂光炽.哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究[J].岩石学报,1987,(1):17-25.

[40] 张玉泉,谢应雯,涂光炽.哀牢山^{4}/金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd,Sr 同位素特征[J]. 中国科学(D 辑),1997, 27:289-293.

[41] 张玉泉,谢应雯.横断山区花岗岩类地球化学[M]. 北京:科学出版社,1995: 1-186.

[42] 林文蔚,角闪石和黑云母电子探针数据 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 计算[J]. 长春地球科学学报,1994, 155-162

[43] Mahmood A. Chemistry of biotites from a zoned granitic pluton in Morocco[J]. *Mineral Mag*,1983, 47: 364-369.

[44] Leake B E. Nomenclature of amphiboles[J]. *Can Mineral*, 1978, 16: 501-520.

[45] Wones D R. The significance of the assemblage titanite-magnetite-quartz in granitic rocks[J]. *Am Mineral*,1989, 74: 1744-1749.

[46] 刘英俊.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984: 1-300

[47] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C, Wu K X. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jingshajiang fault belt, SW China[J]. *Chem Geol*, 2004, 203: 305-317.

[48] Holliday J R, Wilson A J, Blevin P L, Tedder I J, Dunham P D, Pfitzner M. Porphyry gold-copper mineralization in the Cadia district, eastern Lachlan Fold Belt, New South Wales, and its relationship to shoshonitic magmatism[J]. *Mineralium Deposita*,2002, 37: 100-116.

[49] Lang J R, Stanley C R, Thompson J F H. Porphyry copper-gold deposits related alkalic igneous rocks in the Triassic-Jurassic arc terranes of British Columbia[A]. Pierce F W, Bolm J G. *Porphyry Copper Deposits of American Cordillera*[M]. Tucson: Arizona Geological Society,1995:219-236.

[50] Maughan D T, et al. Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 14-37.

[51] Müller D, et al. The transition from porphyry- to epithermal-style gold mineralization at Ladolam, Lihir Island, Papua New Guinea: a reconnaissance study[J]. *Mineralium Deposita*,2002, 37: 61-74.

[52] Bornhorst T J. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks from Guatemala[J]. *J Geol*,1986,94: 412-418.

[53] Wybon D. Sulphur-undersaturated magmatism-a key factor for generating magma-related copper-gold deposits[J]. *AGSO Research Newsletter*, 1994, 21: 7-8.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

MINERAL CHEMISTRY STUDIES OF Cu- AND Au-MINERALIZED ALKALINE INTRUSIONS

BI Xian-wu [1], HU Rui-zhong [1], Mungall J. E. [2], Hanley J. J. [2],
PENG Jian-tang [1], WU Kai-xing [1], LI Hong-li [1,3]

(1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*;
2. *Department of Geology, University of Toronto*, 22 *Russell Street, Toronto, Canada*, M5S 3B1;
3. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The Yao'an and Machangqing alkaline intrusions belong to the Jinshajiang-Red River alkaline intrusive suite, located in southwestern China. The Yao'an syenite porphyry is associated with Au mineralization and the Machangqing granite porphyry with Cu mineralization. Study of the mineral chemistry of dominant silicate minerals from evolved granitic rocks from these two intrusions provides insight into the overall petrogenesis of the Ailaoshan-Jinshajiang alkaline intrusive suite. The temperature and pressure derived from amphibole-plagioclase and perthite-plagioclase geothermometry, and Al in amphibole barometry suggest that the syenite porphyry in the Yao'an intrusion crystallized around 818 ±50 °C and 0.9 - 1.3 kbar, whereas the granite porphyry in the Machangqing intrusion crystallized around 729 ±50 °C, 2.2 - 2.8 kbar. The two intrusions formed under imposed oxygen fugacities far above the quartz fayalite-magnetite buffer. Oxygen fugacity estimates suggest that the syenite porphyry in the Yao'an intrusion crystallized under more oxidizing conditions than the Machangging. The similar tectonic setting, emplacement age, magma source region and the only slightly different bulk chemical compositions of the intrusions suggest that the difference in mineralization (Cu vs. Au) of these two intrusions may have been related to the differences in t, p, or $f(O_2)$ during crystallization. The results show that a high $f(O_2)$ and weakly fractionated magma favored Au enrichment relative to Cu in the Jinshajiang-Red River alkaline zone.

Key words: mineral chemistry; alkaline intrusion; Cu and Au mineralization; Ailaoshan-Jinshajiang alkaline intrusion belt

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net