

文章编号:1000-4734(2007)03-0406-08

安徽月山岩体岩石地球化学特征及成因

杨光树^{1,2}, 温汉捷¹, 胡瑞忠¹, 于文修², 樊海峰^{1,2}

(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, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:月山矿田是长江中、下游地区典型的夕卡岩-热液脉型铁、铜、金多金属矿田。月山岩体与金属矿床成因密切相关。通过对月山岩体系统的岩石学、岩石化学和微量元素地球化学特征研究,认为月山岩体是在区域拉张环境下,由亏损地幔低程度部分熔融形成的硅酸不饱和和高钾碱性玄武岩浆经 AFC 机制形成的。

关键词:安徽;月山岩体;岩石化学;微量元素;

中图分类号:P581;P588.1 **文献标识码:**A

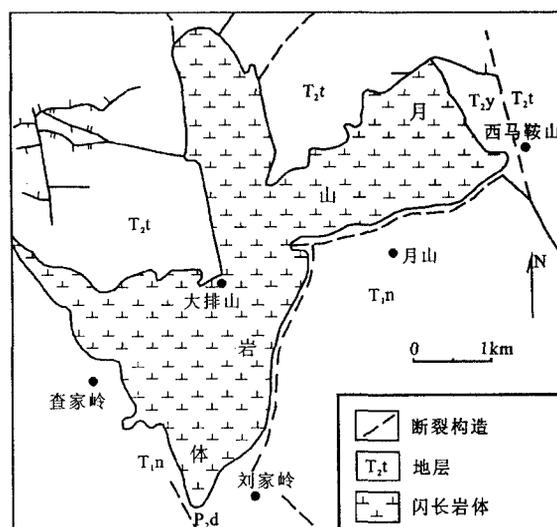
作者简介:杨光树,男,1980年生,博士研究生,从事矿床地球化学研究。

安徽月山地区是长江中下游地区铜-金-铁成矿带的重要组成部分,区内的月山矿田是长江中下游地区具代表性的大型夕卡岩-热液脉型铜(金)、铁多金属矿田,矿区内主要的侵入岩体为月山岩体。前人研究表明^[1-4],月山岩体与铁、铜、金及钼等金属成矿作用密切相关,月山岩体的特征、成岩岩浆的来源、性质与演化机制研究,对于与其成因紧密相关的金属矿床的成矿物质来源、流体演化以及区域成岩成矿作用研究都具有重要意义。本文主要通过系统的岩石化学和微量元素地球化学研究,浅析月山岩体的成因。

1 岩体地质特征

月山岩体位于安徽省安庆市月山镇,出露面积约 11 km²,区域上属于安徽沿江岩浆岩带内带。岩体的锆石 SHRIMP 年龄为 (133.2 ± 3.7) Ma^[5],矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 (137.6 ± 1.2) Ma^[6],角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 (135.6 ± 1.4) Ma^[1],为燕山期侵入体。岩体主要由中酸性中浅成小岩株组成,受控于 NE 和及近 EW 向两组基底断裂,在空间上表现为以大排山为中心,大体分东、南、北三区,呈现“枝杈”状分布(图 1)。月山岩体的侵入围岩为中、下三叠统经由灰岩、白云岩热变质形成的大理岩和白云质大理岩。对于岩浆侵位中心,有 3 种不同看法:①侵位中心位于岩体中部,沿地

表构造层向四周贯入^[7];②侵位中心位于南区,向北、向东侵入^[8];③侵位中心位于岩体东枝东北侧,由 NE 向 SW 方向上侵^[9]。根据地表现状观察及地球物理资料,我们倾向于第三种说法。岩体侵位方式以高能被动侵位为主,兼具主动侵位特点^[9],浅部形态和产状受地壳表生构造控制。岩体具有深源浅成相特征,剥蚀较浅,相分带不明显,岩性从中性到中酸性之间大多呈渐变过渡关系,中心相出露,中上部为过渡相,接触带为其边缘相。这种特征反映了岩体被动侵位后,退结晶分异作用导致岩石酸度相对增高^[7]。



T_{1n}. 下三叠统南陵湖组 T_{2t}. 中三叠统铜头尖组 T_{2y}. 中三叠统月山组 P_{2d}. 二叠系大隆组

图 1 月山岩体地质简图

Fig. 1. Geological sketch map of the Yueshan intrusion.

收稿日期:2007-06-27

基金项目:国家重点基础研究项目(2007CB411402);中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-102)

月山岩体主要由中、细粒自形-半自形等粒或不等粒状闪长岩和石英闪长岩组成,早期结晶的粒度较大的矿物(如斜长石、角闪石等)隙间充填有较小的晚期结晶的矿物集合体(如石英、钾长石等),形成嵌晶结构^[4]。造岩矿物以斜长石为主(61%~74.9%),钾长石含量较高(6%~18.3%),石英含量变化较大(0%~9%),暗色矿物主要是角闪石(13%~15%),副矿物(3%左右)主要为榍石、磷灰石和磁铁矿(表1)。从表1可

表 1 月山闪长岩矿物含量表(%)

岩石	斜长石	钾长石	石英	黑云母	角闪石	副矿物
闪长岩 ^①	74.9	6.8	1.1	0.4	14.7	2.16
二长闪长岩 ^①	62.3	18.3	2.0	0.5	14.5	2.4
闪长岩 ^②	77	6	0	0	12	5
二长闪长岩 ^②	67	9	5	0	13	4
石英二长闪长岩 ^②	68	12	7	0.5	10	2.5
闪长岩	75	8	1	0	13	2
二长闪长岩	68	10	3	1	15	3
石英二长闪长岩	60	15	9	1.3	11.7	2

注:①326地质队提供;②引自唐水成等^[23]

看出,斜长石含量随着岩石酸性的增加而减少,钾长石和石英的含量则相应增加,反映出月山岩体结晶晚期富硅富碱,岩石由中性向酸性过渡的正向演化。总体而言,月山岩体富含Na、K、贫Fe的矿物学特征,富硅富碱的岩石学特征^[10]。

2 岩石化学特征

本次研究的样品采自安庆铜矿井下-520 m中段和部分钻孔,均为新鲜的未蚀变闪长岩。50多个样品的岩石化学成分分析结果显示,SiO₂含量在56.33%~64.69%之间,平均为59.22%,显示出月山岩体硅含量变化较大;通过标准矿物计算结果来看,所有样品未出现霞石、钾霞石、白榴石,多数样品出现石英,但含量较少,峰值在5%左右,即岩体硅呈弱饱和。月山闪长岩体部分岩石学数据见表2。

表 2 月山闪长岩岩石化学成分(w_B/%)

Table 2. Petrochemical composition of the Yueshan diorite

样号	A-16	A-17	A-13	A-8	A-1	A-3	A-10	A-33	A-23	A-19	A-38	A-6	A-12	A-2	A-24	A-9
SiO ₂	59.92	57.33	58.96	59.18	64.69	57.85	58	56.33	61.76	57.31	56.56	58.57	56.54	62.81	58.67	61.75
TiO ₂	0.87	0.74	0.72	0.64	0.67	0.7	0.45	0.49	0.68	0.65	0.66	0.73	0.78	0.91	0.58	0.54
Al ₂ O ₃	16.98	16.37	16.91	17.21	6.73	16.48	16.03	18.12	14.97	16.81	14.85	16.1	16.45	15.84	16.54	17.21
Fe ₂ O ₃	1.86	2.21	1.97	2.08	0.65	2.32	1.77	1.99	1.29	2.04	2.59	1.94	1.94	1.07	2.03	1.82
FeO	2.39	3.21	2.33	2.89	1.51	2.78	2.98	2.45	1.73	2.56	3.91	2.59	2.71	1.9	2.37	2.05
MnO	0.89	0.79	0.69	0.76	0.63	0.71	0.75	0.69	0.59	0.77	0.75	0.75	0.69	0.76	0.71	0.7
MgO	2.54	2.81	2.47	3.24	2.31	2.76	3.48	2.75	3.29	3.28	3.85	3.37	3.13	2.63	2.98	2.99
CaO	4.47	5.88	5.19	4.49	3.18	6.38	5.07	4.87	4.77	6.02	7.89	6.27	5.66	4.75	5.15	3
Na ₂ O	4.83	4.85	5.06	4.85	4.52	4.67	5.24	4.57	4.64	5.23	4.03	4.13	4.73	4.46	4.94	4.56
K ₂ O	3.49	3.19	3.37	2.81	3.67	3.56	3.32	3.34	3.28	3.5	2.65	3.24	3.14	3.42	3.2	3.71
P ₂ O ₅	0.48	0.42	0.37	0.43	0.38	0.41	0.39	0.31	0.35	0.45	0.5	0.29	0.51	0.4	0.49	0.26
H ₂ O ⁻	0.21	0.55	0.52	0.41	0.26	0.29	0.28	0.19	0.61	0.3	0.27	0.32	0.23	0.22	0.24	0.28
烧失量	0.84	1.78	1.41	1.31	1.25	0.92	2.07	3.53	2.11	0.96	1.39	1.52	3.22	0.91	1.73	0.85
总和	99.56	99.58	99.44	99.88	100.19	99.54	99.55	99.45	99.46	99.59	99.63	99.5	99.5	99.86	99.39	99.44
Q	5.97	2.01	3.56	5.64	13.92	1.98	0.19	2.23	9.58	-	3.73	5.73	2.28	11.29	3.88	9.32
An	14.5	13.75	13.71	17.07	14.13	13.65	10.65	19.84	10.6	12.2	14.84	16.12	14.92	13.21	13.8	14.07
Ab	41.33	41.89	43.61	41.56	38.59	40	45.43	40.25	40.25	44.75	34.67	35.6	41.47	38.07	42.75	39.07
Or	20.85	19.24	20.28	16.82	21.88	21.3	20.09	20.54	19.88	20.96	15.89	19.51	19.24	20.39	19.33	22.2
σ	4.02	4.34	4.33	3.55	3.07	4.46	4.69	4.34	3.24	5.2	3.18	3.38	4.26	3.1	4.08	3.59
ALK	8.43	8.22	8.6	7.77	8.28	8.35	8.78	8.25	8.14	8.85	6.8	7.52	8.17	7.96	8.34	8.39
N/K	1.38	1.52	1.5	1.73	1.23	1.31	1.58	1.37	1.41	1.49	1.52	1.27	1.51	1.3	1.54	1.23
SI	16.81	17.27	16.24	20.42	18.24	17.16	20.71	18.24	23.11	19.77	22.61	22.08	20	19.48	19.24	19.77
DI	82.65	76.89	81.16	81.1	88.52	76.94	76.36	82.86	80.3	77.92	69.13	76.96	77.91	82.96	79.75	84.66
A/CNK	0.855	0.74	0.79	0.897	0.973	0.712	0.748	0.907	0.754	0.72	0.623	0.742	0.766	0.805	0.789	1.014
AR	2.27	2.13	2.23	2.09	2.4	2.13	2.37	2.05	2.34	2.24	1.83	1.98	2.1	2.24	2.2	2.39
OX	0.44	0.41	0.46	0.42	0.3	0.45	0.37	0.45	0.43	0.44	0.4	0.43	0.42	0.36	0.46	0.47
富钙率	0.37	0.39	0.41	0.33	0.38	0.43	0.36	0.38	0.41	0.41	0.42	0.42	0.4	0.43	0.39	0.28

注:σ=(K₂O+Na₂O)/(SiO₂-43);ALK=K₂O+Na₂O/N/K;Na₂O/K₂O;SI=MgO×100/(MgO+Fe₂O₃+FeO+K₂O+Na₂O);DI:分异指数;AR:碱度率;OX:氧化率;A/CNK=[(Al₂O₃)/(CaO+Na₂O+K₂O)];富钙率=[(CaO)/(Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO+CaO)];Q、An、Ab、Or为CIPW标准矿物计算结果,利用文献^[11]的方法按侵入岩调整氧化铁。

岩石总碱含量($K_2O + Na_2O$)为 6.80% ~ 8.85%, 平均值 8.25%, 较中国正常闪长岩值^[12]高; Na_2O/K_2O 值在 1.0 ~ 2.0 之间, 平均值 1.40; 碱度率 AR 值在 1.83 ~ 2.40 之间, 平均值为 2.20, 显示出岩体在较富钠的背景上富钾。在 TAS 全碱图上^[13], 个别样品落入粗面英安岩范围, 绝大多数样品投影点落入粗面安山岩范围内, 且大部分样品投影点落入碱性岩系列(图 2)。里特曼(Rittman)曾用二分法来划分岩石的碱性, 其组合指数 $\sigma > 4$ 为碱性岩系列, $\sigma < 4$ 为钙碱性岩系列^[15]。月山闪长岩体的里特曼指数(σ)在 3.07 ~ 5.20 之间, 平均 3.96, 其中大多数样品 σ 值在 3.50 ~ 4.50 之间, 显示了月山岩体的富碱特征; 结合岩体 AR-SiO₂图解(略), 随着 SiO₂ 含量增加, CaO 含量减少, 岩体的碱度(AR)增大, 反映出岩体由钙碱性岩系向碱性岩系方向演化, 这与岩体岩石学特征一致。在 K₂O-SiO₂图解中(图 3), 大部分样品投影点落入高钾钙碱性岩系列, 且大多数投影点位于高钾钙碱性岩与钾玄岩系列交界过渡区内, 有 5 个样品投影点落到钾玄岩系列, 但是仍然靠近高钾钙碱性岩系列, 反映出月山岩体比正常钙碱性闪长岩更富碱, 以及岩浆向富碱方向演化的特征。岩体的 Al/NKC 值在 0.62 ~ 1.01 之间, 平均 0.79, Al/NK 值在 1.31 ~ 1.63 之间, 表明 Al 呈现弱不饱和-弱饱和, 与岩石偏中性、富碱等特征一致。此外, 月山岩体富钙特征也很明显, 富钙

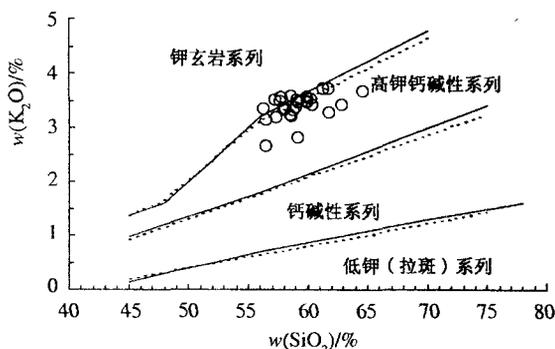


图 3 月山闪长岩 K₂O-SiO₂图解

Fig. 3. K₂O vs. SiO₂ diagram of the Yueshan diorite.

率($[w(CaO)/w(CaO + MgO + FeO + MnO + Fe_2O_3) \times 100\%]$)平均为 0.40, 高出戴里平均闪长岩、中国平均闪长岩^[11]约 10%, 与岩石中钙质造岩矿物较发育一致, 其原因可能是岩浆上升时遭受了强烈的钙质混染(同化混染作用)。

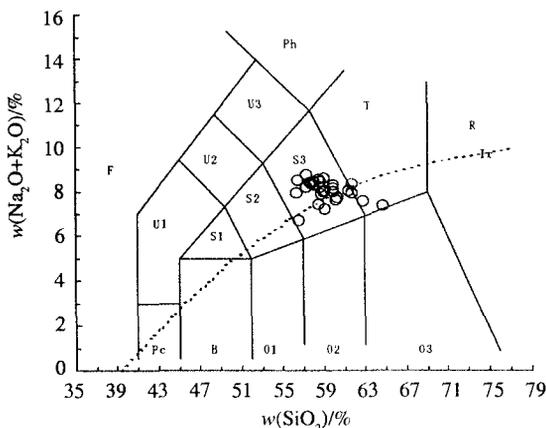
作为长江中下游岩浆岩带的一部分, 月山岩体具有较高氧化率、富钙碱性组分(高钠、富钾、富钙), 贫基性组分(Mg、Fe)等区域中酸性岩浆岩的共同特征。同时, 月山岩体比安徽沿江地区与 Cu、Au 成矿密切相关的高钾钙碱性中酸性侵入岩组合富钠, 比与 Fe 成矿作用相关高钠钙碱性中基性岩组合富钾, 显示其成岩特殊性。

3 微量元素地球化学特征

月山闪长岩体微量元素及成矿元素 Fe 的含量分析结果见表 3, 其中 Fe 含量据主量元素含量换算而成。成矿元素 Fe、Cu、Zn 中, 只有 Zn 富集系数(含量/闪长岩维氏值)大于 1, Fe、Cu 含量都较低, 富集系数均小于 1, 平均含量低于玄武岩相应元素的维氏值。导致月山岩体成矿元素强烈亏损的可能原因是闪长质岩浆的熔-流分离作用, 该过程使成矿元素和碱性组分向流体相分配^[3]。

3.1 过渡族元素

过渡族元素 Sc、Cr、Co、Ni、Ti、V、Mn 中, V、Ti、Co 的富集系数大于 1; 其余元素的富集系数都不大于 1。在原始地幔标准化蛛网图中(图 4), 过渡族元素 Ti、V 具明显正异常, Cr、Ni 为明显负异常。随着 FeO_总/MgO 比值的增大, V、Cr、Ni 的含量迅速降低^[7]。所有元素含量明显低于大洋拉斑玄武



S1.粗面玄武岩 S2 玄武质粗面安山岩 S3.粗面安山岩
T.粗面英安岩 Pc.苦橄质玄武岩 B.玄武岩 O1.玄武质安山岩 O2.安山岩 O3.英安岩 R.流纹岩 F.副长石岩
Ph.响岩 U1.碱玄岩(碧玄岩) U2.响岩质碱玄岩 U3.碱玄响岩 Ir.碱性、亚碱性岩石系列划分线(据文献[14])

图 2 月山闪长岩的 TAS 图解

Fig. 2. TAS diagram of the Yueshan diorite.

岩,而与高铝玄武岩相比,Cr、Ni、V 含量偏高。周涛发等^[4]研究认为,根据元素的亲氧性和八面体择位能,Cr、Ni 等元素在岩浆结晶过程中优先进

入铁镁矿物相,随橄榄石、单斜辉石或尖晶石结晶而分离,致使岩浆向硅碱逐渐富集的方向演变,从而造成 Cr、Ni 等过渡族元素趋向亏损。

表 3 月山闪长岩微量元素含量($\times 10^{-6}$)
Table 3. Trace element composition of the Yueshan diorite

样号	A-13	A-8	A-1	A-14	A-3	A-10	A-23	A-2	A-24	A-4	CKW1A-9	CKW3A-6	CKW1A-7	CKW3A-7
Sc	11.1	11.2	11.4	9.9	10	9.3	11.1	11.2	12	118	12.4	10.1	11	9.9
Ti	4160	4124	4064	3860	4082	3423	3189	4555	4100	4124	3992	3902	3986	3836
V	129	135	124	119	122	105	103	123	133	135	130	120	130	121
Cr	47	61	61	40	103	66	59	114	62	43	33	36	55	52
Mn	836	929	906	883	875	860	713	922	883	898	891	852	945	898
Fe	31869	37000	16323	27750	37855	35523	22464	22231	32569	29771	32025	27594	27517	25185
Co	16	16.2	16.3	15	16.2	14.3	12.1	16	17	16.1	16.1	15.3	16.2	16.4
Ni	27	30	31	23	52	34	28	64	37	23	18	20	70	30
Cu	10.2	44	12.1	19	15.1	16	13.2	330	9.3	12.3	18.2	15.2	17	17
Zn	53	90	73	76	71	64	55	84	55	78	82	74	82	85
Sr	1640	1566	1646	1633	1666	1507	1361	1519	1617	1589	1545	1734	1577	2663
Rb	52	53	59	60	54	52	45	54	52	54	55	54	54	60
Ba	1231	1238	1212	1401	1293	1148	1213	1140	1180	1210	1148	1276	1175	1152
U	5.2	3.7	4.1	17.3	2.9	3.2	3.1	3.7	3.1	3.1	4.2	3.4	3.3	3.6
Th	11.1	12.2	14.2	13.3	11.4	11.2	9.1	12	11.2	11.1	11.3	12	11	11.2
Nb	7.8	10	9.2	9.2	6.8	6.6	6.3	11.3	7.8	7.9	7.5	7.6	7.4	7.4
Ta	0.47	0.68	0.6	0.57	0.43	0.36	0.42	0.75	0.43	0.43	0.41	0.41	0.38	0.4
Zr	123	21	174	21	107	24	71	147	128	21	152	82	165	51
Hf	4.2	1.6	5.6	1.52	3.7	1.41	2.9	4.3	4	1.42	4.7	2.8	5.1	2.1
Rb/Sr	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
Sr/Ba	1.33	1.27	1.36	1.17	1.29	1.31	1.12	1.33	1.37	1.31	1.35	1.36	1.34	2.31
Th/U	2.13	3.3	3.46	0.77	3.93	3.5	2.94	3.24	3.61	3.58	2.69	3.53	3.33	3.11
Zr/Hf	29.29	13.13	31.07	13.82	28.92	17.02	24.48	34.19	32	14.79	32.34	29.29	32.35	24.29
Nb/Ta	16.6	14.71	15.33	16.14	15.81	18.33	15	15.07	18.14	18.37	18.29	18.54	19.47	18.5
Th/Hf	2.6	7.6	2.5	8.8	3.1	7.9	3.1	2.8	2.8	7.8	2.4	4.3	2.2	5.3
Ta/Hf	0.11	0.43	0.11	0.38	0.12	0.26	0.14	0.17	0.11	0.30	0.09	0.15	0.07	0.19

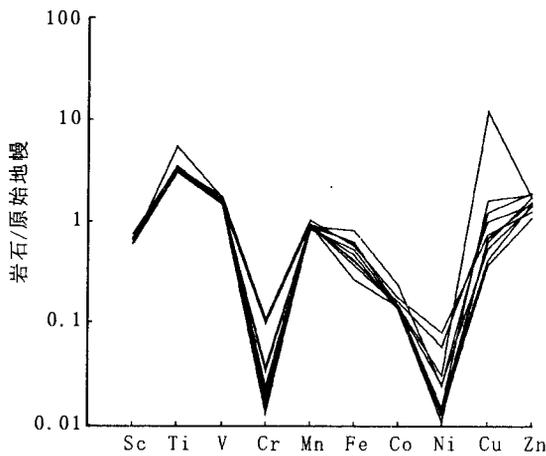


图 4 月山岩体过渡族元素 PM 标准化蛛网图 (原始地幔数据据文献^[16])

Fig. 4. PM-normalized transition element patterns of the Yueshan intrusion.

3.2 大离子亲石元素(LILE)

大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 中, Ba 和 Sr 含量远远大于地壳丰度^[17], 尤其 Sr 的丰度很高(图 5), 平均为 1617×10^{-6} , 最高一个样品达 2663×10^{-6} , 远高于上地壳值 350×10^{-6} 和下地壳值 230×10^{-6} , 因此月山岩体不可能为地壳岩石深熔或重熔的产物。只有部分大陆裂谷碱性玄武岩^[18]和金伯利岩^[19]才有如此高的 Sr, 表明月山岩体可能源自高钾富碱的地幔岩浆。Rb 相对地壳平均含量呈弱亏损; K/Rb 比值高, 平均为 559.46, Rb/Sr 比值低, 平均为 0.03, 体现了 Rb 的亏损, 表明岩浆上升时可能受到了低 Rb/Sr 比值岩石的混染。Sr/Ba 在 1.12 ~ 1.71 之间, 平均 1.38, 相对比较稳定。与氧化物之间的关系图

(略)中, Sr 和 Ba 与 MgO 含量之间没有明显的相关性, 表明 Sr 和 Ba 与岩体结晶分异之间关系不大, 很高的 K/Rb 比值也说明了这一点。与 MORB 相比, 月山岩体明显富集大离子亲石元素。

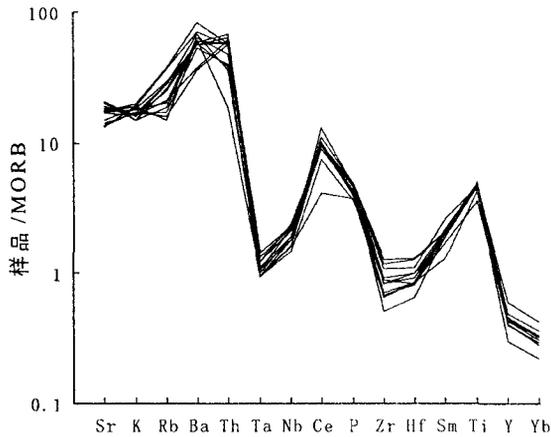


图5 月山闪长岩不相容元素 MORB 标准化蛛网图
Fig. 5. MORB-normalized incompatible element patterns of the Yueshan diorite.

3.3 高场强元素(HFSE)

高场强元素中(U、Th、Nb、Ta、P、Zr 和 Hf)中, U、Th、P 的含量远大于地壳含量, 显示了原始岩浆的深源性; Zr 的含量相对于原始地幔来说, 明显富集, 指示了地壳物质的混染。在 MORB 标准化蛛网图中(图 5), Th 明显正异常, Ta、Nb、Zr 显示负异常。Zr/Hf 平均 27.03, 小于球粒陨石比值 37.5, 更低于各类玄武岩的值, Zr/Hf 比值的变小, 可能与富 F(Cl) 流体的作用有关。Nb/Ta 平均 17.55, 略高于球粒陨石。Th/U 比值平均 2.88, 远远小于球粒陨石的比值 17.5^[20]; 且低于李龙等^[21]通过中国 Pb 同位素演化模型计算的中国大陆地幔 Th/U 比值 3.60; 同时 Th 的含量很高, 说明地幔可能存在近期交代作用。

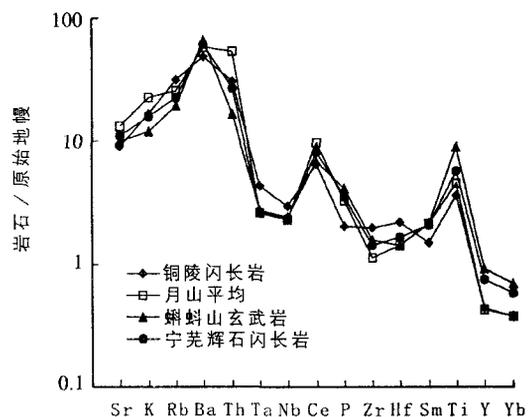
4 岩浆来源与演化机制

4.1 岩浆来源及性质

前以述及, 月山岩体在区域上属于安徽沿江岩浆岩带内带酸性侵入岩, 总体岩石学、岩石化学特征与安徽沿江乃至长江中下游地区基本一致, 都具有富碱、富钙和高铈低镁等特点, 显示了岩浆的同源性及相似性; 同时又有其自身特色, 兼具铜陵地

区高钾钙碱性中酸性侵入岩(与铜、金成矿有关)的富硅、富钾特征, 以及宁芜地区低硅高钠钙碱性中基性侵入岩(与铁成矿有关)的高钠特征。这些特征与月山地区铁-铜(金)复合矿床的形成是分不开的。

前人研究表明^[22-23], 长江中下游地区中生代岩浆岩有大致相似的母岩浆-源自地幔的碱性玄武岩浆, 因演化机制及混染程度不同而形成了不同的岩石组合。月山岩体高 Sr、U、Th、P 等微量元素地球化学特征也表明成岩岩浆可能源自地幔。在图 6 中, 我们选取了区域内经精确测定的具有代表性中酸性、中基性岩体不相容元素跟月山岩体平均值进行了原始地幔标准化比较, 月山岩体与铜陵中酸性侵入岩以及蝌蚪山玄武岩具有很相似的配分模式, 都具有 Nb、Ta 负异常, Ba、Ce、Ti 明显正异常, Y 和 Yb 亏损等特征。这些微量元素特征也说明, 月山岩体与区域内岩浆岩具有相同或相似的成因, 其初始岩浆源自地幔。



(原始地幔据文献[24], 繁昌蝌蚪山玄武岩据文献[25], 铜陵闪长岩据文献[26])

图6 安徽沿江地区侵入岩不相容元素 PM 标准化蛛网图
Fig. 6. PM-normalized incompatible element patterns of the intrusions along the Changjiang River segment of Anhui Province.

地球物理资料及区域成岩成矿实验研究证明^[27-28], 通过地壳物质的重熔或深熔作用形成闪长质或更基性的岩浆, 几乎是不可能的, 即岩浆源区应该在地幔。据区域同位素资料^[23], 安徽沿江地区岩浆岩的 ϵ_{Nd} 最高值为 +2.7 (釜山老第三纪碱性橄榄玄武岩), 暗示源区可能是为弱亏损地幔。作为基性端元的宁芜火山岩 ϵ_{Nd} 值为 +1.4, $I_{Sr} = 0.7050$, 其原始岩浆的 ϵ_{Nd} 可能高于 +1.4, 也说明岩浆可能源自亏损地幔。在我们的研究中, 月山岩体具富集 REE (尤其是 LREE)、大离子不相

容元素和高场强元素 Th, 亏损 Nb、Ta 等特征, 显示亏损地幔可能经历了地幔交代作用, 由于太平洋俯冲带位于日本至台湾一带^[29], 距离本地区 800 km 以上, 因此造成本地区地幔交代作用的板块俯冲不可能是太平洋板块, 而考虑到扬子地块与华北地块以及华夏地块与扬子地块的碰撞俯冲事件, 造成地幔交代是可能的。闫峻等^[30]推测长江中下游地区岩浆源区的交代作用与晋宁期华夏地块与扬子地块的碰撞有关。此外, 安徽沿江地区基性岩绝大多数投影到 Peccerillo^[31]的高钾岩系和橄榄安粗岩系, 据化学成分计算的 CIPW 标准矿物中多数出现霞石, 无石英出现^[23]; 月山岩体大部分样品投点在 TAS 图解中落入碱性岩系列(图 2), 在 K_2O-SiO_2 图解中落入高钾钙碱性岩系列, 以及月山及铜陵地区中酸性侵入岩具接近西澳金伯利岩和大陆碱性玄武岩的超高 Sr 丰度, 这些综合特征说明该区原始岩浆为大陆地幔碱性玄武岩。模拟实验研究表明^[25], 长江中下游地区中生代碱性玄武岩-辉长岩是由地幔橄榄岩经低程度部分熔融形成的产物, 熔融程度为 6% 左右。

结合上述分析, 我们认为月山岩体原始岩浆可能为亏损地幔-大陆地幔橄榄岩(可能经历过交代作用)通过低度部分熔融形成的硅酸不饱和的

高钾碱性玄武岩浆。

4.2 岩浆演化机制

大量研究证明, 铜陵地区侵入岩的主要成岩机制为较典型的 AFC (Assimilation and Fractional Crystallization) 机制^[22-26]。浅部构造层中的“三重结构”生长的侵入岩系统指示, 岩浆在上侵过程中可能发生多次停积^[32]。由此, 在岩浆上侵成岩过程中, 可能经历了两次 AFC 过程, 即深部岩浆房中的硅(碱)质 AFC 过程和高位岩浆房中的钙(镁)质 AFC 过程^[23,33]。

月山岩体岩石学数据显示, 随着 SiO_2 增加, TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 趋于减少, 在 Harker 图解中呈负相关, 说明岩浆演化早期有铁镁矿物及磷灰石的结晶分离; 同时, 碱含量($Na_2O + K_2O$)随着 SiO_2 增加, 呈弱正相关, 表明岩浆演化过程中经历了同化混染作用。氧化物- $lgSI$ 图解能清楚反映岩浆的演化性质和规律, 未受大陆地壳物质混染的地幔岩浆岩, 其主要氧化物与固结指数对数值($lgSI$)呈线性关系^[15]。在月山岩体氧化物- $lgSI$ 图解中(图 7), $lgSI$ 与 MgO 、 Na_2O 呈弱正、反线性关系, 而与其他氧化物无明显线性关系, 说明了成岩过程中岩浆经历了地壳物质的混染作用。

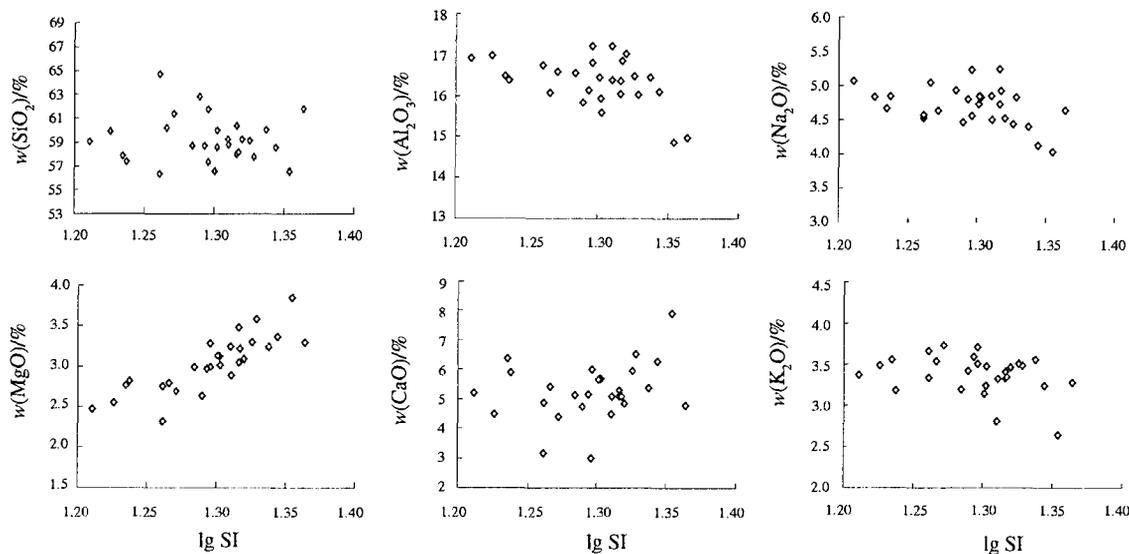


图 7 月山闪长岩氧化物- $lgSI$ 图解

Fig. 7. Oxide vs. $lgSI$ diagram of the Yueshan diorite.

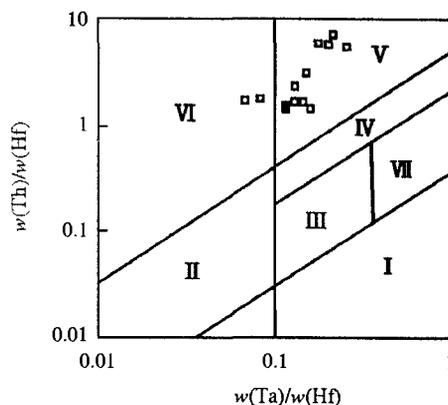
岩石化学特征说明, 本区岩浆在演化过程中经历了结晶分异与同化混染的共同作用。微量元素中, 月山岩体富集 Sr、U、Th、P、Ba、V、Ti 等, 亏损 Cr、

Ni、Rb、Ta、Nb、Zr 等特征, 同样说明了岩浆在成岩演化过程中的 AFC 机制; 岩体的稀土元素协变图、Li-Rb 图解等也指示了成岩的 AFC 机制。Sr-Nd、Pb 等

同位素的定量模拟计算表明^[34,34], AFC 过程中成岩物质约 70% 来自地幔, 30% 来自地壳混染。在 (Th/Hf)-(Ta/Hf) 大地构造环境判别图上(图 8), 月山岩体大部分投影点落入 V 区(大陆板内拉张带), 表明其成岩构造环境为板内拉张环境。大量研究也表明^[22-23,33], 该时期(135 Ma 左右)区域上正处于陆内造山向陆内变形转变的应力转换期, 在造山期后作用及古太平洋板块联合作用下, 部分先成 NE 向及近 EW 向断裂重新活动, 形成了一系列断陷火山岩盆地, 区域上总体为拉张环境。

5 结论

综上所述, 月山岩体成岩过程可概括如下: 在区域拉张的构造环境下, 亏损地幔(可能经历过交代作用)经低程度部分熔融形成的硅酸不饱和的高钾碱性玄武岩浆底侵, 同化了下地壳的硅、铝及变质水, 并发生铁镁质矿物的分离结晶, 形成了碱性闪长质岩浆, 闪长质岩浆在不同地质地球化学条件下继续上侵, 同化围岩(震旦-早古生代碳酸盐岩), 并发生了一系列碱质交代作用, 最终形成了一套富钾高钠钙碱性中酸性侵入岩组合。



I. 亏损大洋地幔 II. 正常大洋中脊玄武岩 III. 大洋板内拉斑玄武岩、洋岛玄武岩及过渡型和富集大洋中脊玄武岩 IV. 分离的大陆裂谷区 V. 大陆板内(拉张带) VI. 俯冲带及岛弧区 VII. 地幔柱

图 8 Th/Hf-Ta/Hf 构造岩浆环境判别图
(底图据文献[35])

Fig. 8 Th/Hf vs. Ta/Hf discrimination diagram of tectonomagmatic environment.

参 考 文 献:

- [1] 陈江峰. 安徽月山岩体的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及与其有关的成矿时代估计[J]. 现代地质, 1991, 5(1): 91-99.
- [2] 董树文, 邱瑞龙. 安庆月山地区构造作用与岩浆活动[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 15-141.
- [3] 周涛发, 岳书仓. 安徽月山地区闪长岩类地质地球化学研究[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(3): 20-30.
- [4] 周涛发, 岳书仓. 安徽月山岩体地球化学特征及成因机理分析[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1): 70-80.
- [5] 陈江峰, 喻钢, 杨刚, 杨胜洪. 安徽沿江江南晚中生代岩浆-成矿年代学格架[J]. 安徽地质, 2005, 15(3): 161-169.
- [6] 李波, 陈江峰, 郑永飞, 赵子福, 钱卉. 安徽月山石英闪长岩氧同位素分馏、Rb-Sr 等时线定年与矿物蚀变之间的关系[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1185-1192.
- [7] 邱瑞龙. 安徽月山高钾闪长岩岩石学特征及岩石成因探讨[J]. 地质论评, 1992, 38(2): 98-107.
- [8] 阎桂林, 张鸣, 李永涛. 安徽安庆月山岩体的磁组构及古地磁特征[J]. 地球科学, 1990, 15(6): 667-673.
- [9] 章传玲, 林新多, 张叔贞. 安徽省怀宁月山岩体侵入前缘带构造的控矿规律[J]. 矿床地质, 1994, (增刊): 107-109.
- [10] 束学福. 安庆夕卡岩型铁铜矿床地质地球化学特征及铁质来源研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 219-224.
- [11] Le Maitre R W. Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classifications[J]. *Contr Miner Petro*, 1976, 56: 181-189.
- [12] 黎彤, 饶纪龙. 中国岩浆岩的平均化学成分[J]. 地质学报, 1963, 43(3): 271-280.
- [13] Le Maitre R W. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms* [M]. Blackwell: Oxford, 1989, 185-193.
- [14] Irvine T N and Barager W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 532-548.
- [15] 邱家骧, 林景任. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-276.
- [16] Sun S-S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc Spec Pub*, 1989, 42: 313-345.
- [17] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Review Geophysics*, 1995, 33: 241-265.
- [18] Condie K C. *Plate Tectonic and Crustal Evolution* [M]. New York: Pergamon press, 1982: 110-310.
- [19] McCulloch M T, Jaques A L, Lewis J D. Nd and Sr isotopes in kimberlites and lamproites from western Australia; an enriched mantle origin[J]. *Nature*, 1983, 302(31): 333-351.

- [20] Jochum K P, Arndt N T, Hofmann A W. Nb-Th-La in komatiites and basalts constraints on komatiite petrogenesis and mantle evolution[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 107: 272-289.
- [21] Li Long, Zheng Yong-fei, Zhou Jian-bo. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 61-68.
- [22] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京:地质出版社,1991:1-238.
- [23] 唐永成,邢凤鸣,吴言昌,等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1998:1-351.
- [24] Pearce J A, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]. Thorps R S. *Andesites*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982: 525-548.
- [25] 徐祥,邢凤鸣. 安徽沿江地区中生代基性岩稀土元素地球化学特征[J]. *安徽地质*, 1999, (92)2: 81-89.
- [26] 王元龙,王焰,张旗,贾秀琴,韩松. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 325-338.
- [27] 326地质队. 安徽省安庆地区成矿条件及铜金铁成矿预测[R]. 合肥:安徽省地矿局,1990.
- [28] 赵斌,朱成明,等. 岩浆成因夕卡岩的实验证据[J]. *科学通报*, 1993, 38(21): 1986-1989.
- [29] Zhang Yue-qiao, Ma Yin-sheng, Yang Song, Shi Wei, Dong Shu-wen. Cenozoic extensional stress evolution in South China[J]. *Journal of Geodynamics*, 2003, 36(5): 591-613.
- [30] 闫峻,陈江峰,谢智,等. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究:岩石圈地幔性质与演化的制约[J]. *地球化学*, 2005, 34(5): 455-469.
- [31] Peccerillo A, et al. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamenu area northern Turkey, Contrib[J]. *Miner Petro*, 1976, 58(1): 63-81.
- [32] 翟裕生,姚书振,林新多,等. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. *矿床地质*, 1992, 11(1): 1-12.
- [33] 邢凤鸣,徐祥. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩[J]. *地球化学*, 1996, 25(1): 29-38.
- [34] 邢凤鸣,赵斌,徐祥,朱成明,赵劲松,蔡恩照. 安徽省铜陵地区侵入岩成因的实验研究[J]. *中国区域地质*, 1997, 16(3): 267-274.
- [35] 滕彦国,刘家铎,张成江,倪师,彭秀红. 兰坪盆地及邻区岩浆岩的微量元素地球化学研究[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 21(1): 40-44.

PETRO-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF YUESHAN INTRUSION, ANHUI PROVINCE

YANG Guang-shu^{1,2}, WEN Han-jie¹, HU Rui-zhong¹, YU Wen-xiu¹, FAN Hai-feng^{1,2}

- (1. *The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The Yueshan ore field is a typical skarn-hydrothermal-type Fe, Cu(Au) polymetallic ore field in the middle-lower reaches of the Changjiang (Yangtze) River. The Yueshan intrusion has close genetic relationship with the ore deposits. Systematic studies on petrology, petrochemistry and trace element geochemistry of the intrusion were carried out, and the results showed that the Yueshan intrusion was formed by a combined process of wall-rock assimilation of crustal material and fractional crystallization of Si-unsaturated high-K alkaline basalt, which was derived from low-degree partial melting of the depleted mantle. The diagenetic environment of the intrusion is a regionally extensional one.

Key words: Yueshan, Anhui Province; petrochemistry; trace element