

粤西大金山花岗岩体地球化学特征 及岩石成因探讨

余长发¹ 赵海杰² 陈懋弘² 罗大略³ 郭 敏³ 王志华¹

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要:大金山花岗岩体是一个与广东省大金山钨锡多金属矿床有关的隐伏岩体, 岩性主要由中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩组成。大金山花岗岩体具有高硅、富碱、贫镁钙、准铝质的特点, 属于高钾钙碱性系列; 微量元素以富集 Rb、Th、U 而亏损 Nb、Eu、Ti 为特征; 稀土元素含量较高, 中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩稀土元素含量分别为 $203.36 \times 10^{-6} \sim 248.42 \times 10^{-6}$ 、 $243.76 \times 10^{-6} \sim 255.08 \times 10^{-6}$, 似斑状黑云母花岗岩稀土元素含量略高, 中细粒黑云母花岗岩略富集重稀土而似斑状黑云母花岗岩则富集轻稀土; 两者均具有强烈的 Eu 负异常, δEu 值分别为 0.004~0.009、0.059~0.13。中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -2.05~-8.64、-0.92~-6.57; 两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) 分别为 1 277~1 692 Ma 和 1 204~1 556 Ma。综合区域地质背景和大金山花岗岩体的地球化学特征, 认为大金山花岗岩体形成于地壳拉张-伸展的构造背景下, 是中元古代地壳部分熔融的产物。

关键词:地球化学; Sr-Nd-Pb-Hf 同位素; 岩石成因; 大金山花岗岩体

中图分类号: P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1670-20

大金山钨锡多金属矿床位于广东省云浮市西北约 6 km 处, 是广东省地调院近几年新发现的一个矿床。大金山矿区可分为: 大坳矿段、坑底矿段、麻坳矿段等矿段。随着找矿勘查程度的不断提高, 大金山矿区显示出良好的找矿潜力。目前, 对大金山钨锡多金属矿的研究相对较少, 仅限于地质特征、地球化学异常、资源潜力评价等, 还没有对与之有关的花岗岩类进行过详细研究。本文通过对大金山花岗岩体的地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成进行分析, 来认识花岗岩体的岩石类型、岩浆源区及演化特征。这项工作不仅对理解该区的成岩成矿地质背景和构造演化有重要的意义, 也为下一步找矿提供重要的参考。

1 区域地质背景

大金山钨锡多金属矿床位于华夏与扬子陆块碰撞拼接带(即钦杭成矿带)的西南段, 云开隆起区核部的罗定盆地东北缘。该区经历了复杂的地质演化过程, 震旦纪至早古生代该区是华南加里东地槽的一部分; 志留纪末期, 在加里东运动的影响下, 构成准地台的褶皱基底; 中三叠世末期的印支运动使得该区由稳定的准地台阶段转入强烈活动的大陆边缘发展阶段; 晚三叠世粤西地区变为隆起区; 侏罗纪开始的燕山运动一直持续到白垩纪, 带来强烈的花岗岩质岩浆的侵入活动, 形成众多燕山期的花岗岩体; 新生代以来主要以陆相沉积建造为主^[1,2]。区内地层发

收稿日期: 2012-09-14; **改回日期:** 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40930419)、国家重点基础研究发展计划 973 课题(2012CB416704)和中国地质调查局地质调查工作项目(1212011120831)联合资助。

作者简介: 余长发, 男, 1986 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: yuzhangfa188@sina.com。

通讯作者: 赵海杰, 女, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: zhaohaijie_610@163.com。

育较全,元古宇主要为一套中深变质岩系,震旦系主要是云母千枚岩夹火山岩、火山碎屑岩等,奥陶系为一套类复理石、碳酸盐岩沉积建造,志留系为一套类复理石沉积建造,泥盆系为沉积碎屑岩和碳酸盐岩,石炭系以灰岩、白云岩为主,三叠系主要为砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩等,白垩系主要是以砾岩、砂岩为主的碎屑岩建造。由于该区曾受到过多次构造运动的影响,褶皱、断裂发育,形成北东向为主体的构造格局,区域上的控岩控矿构造主要有贵子弧形断裂、吴川—四会大断裂(图 1)^①。区内出露的岩体表现出多旋回、多期的特点,其中以加里东期和燕山期岩浆活动最为强烈,岩性以花岗岩、二长花岗岩为主。

大金山钨锡多金属矿床产于大金山隐伏花岗岩体顶部或者近接触带的围岩中。矿体主要受大结山弧形断裂带控制,沿主干断裂与旁侧的构造裂隙带呈北东向产出(图 2)^①。矿区内出露的地层主要为元

古宇沙湾坪组片麻岩、变粒岩、片岩、变质石英砂岩等,以及元古宇云开群黑云母片麻岩、混合岩等。矿体主要赋存于沙湾坪组片麻岩、变粒岩、片岩及云开群黑云母片麻岩中。围岩蚀变主要有硅化、云英岩化、绿泥石化等,矿体主要赋存在硅化带和云英岩化带中,以含矿石英脉、石英网脉等形式产出(图 3)^①。矿石构造以脉状、浸染状、块状为主,结构以粒状、短柱状为主。锡石呈自形晶粒状,粒径 1~2 mm,多数以粒状集合体产出。黑钨矿呈短柱状、柱状,粒径 5~10 mm,多以板状集合体形式产出。矿石矿物主要有锡石、黑钨矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉铋矿、斑铜矿等,脉石矿物有石英、长石、绿泥石、方解石、萤石等。

2 岩体地质特征

大金山花岗岩体主要隐伏于云开群黑云母片麻

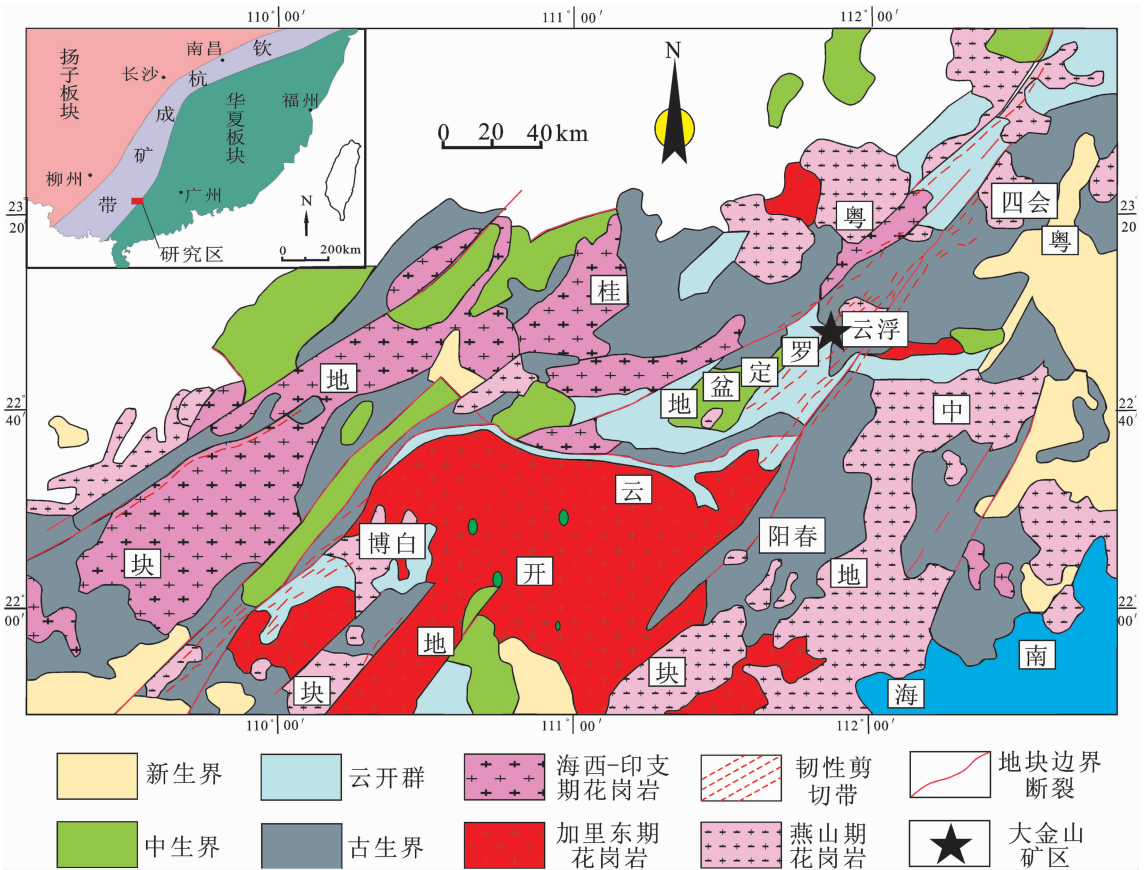


图 1 云开地区地质略图(据傅良刚等,2010)

Fig.1 Geological sketch map of Yunkai area (after Fu et al., 2010)

① 罗大略,郭敏,何训虎等.广东省云浮市大金山地区多金属矿勘查工作设计(内部资料).2010:1-85.

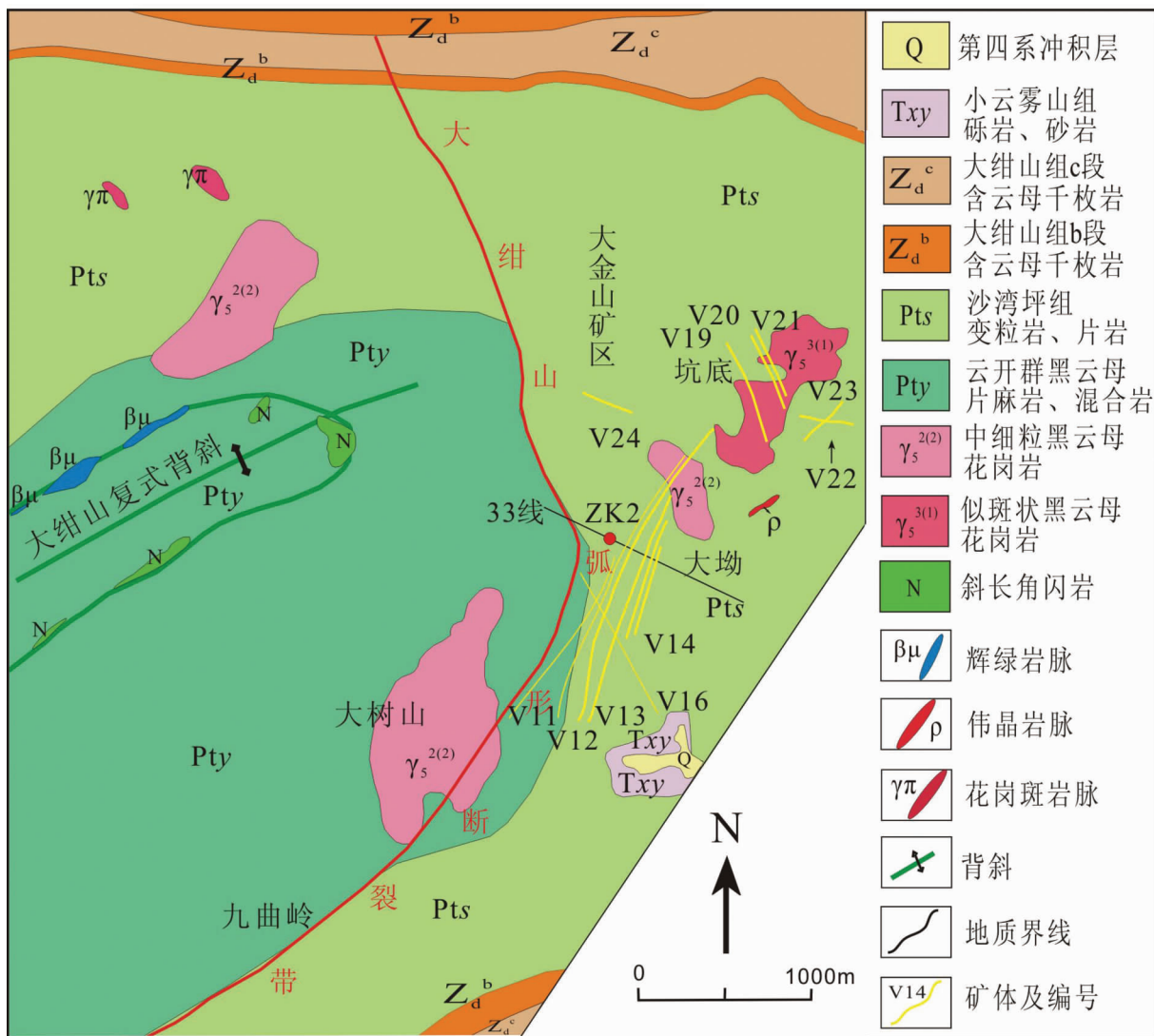


图2 大金山钨锡多金属矿床地质简图(据罗大略等,2010 修编)
 Fig.2 Geological sketch map of the Dajinshan tungsten-tin polymetallic ore deposit (modified after Luo et al., 2010)

岩和沙湾坪组变粒岩中,只在大树山、大坳、坑底、分水坳等地有零星出露,岩体出露部分呈椭圆状或不规则状。受本区北东向构造控制,岩体多呈北东向展布。大金山花岗岩体是一个多次侵入的复式岩体,根据野外地质观察及岩相学特征将其划分为两类:中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩。

中细粒黑云母花岗岩呈灰白色、浅灰色,中细粒-等粒结构,粒径均匀,大小为 1~3 mm。主要成分为斜长石(30%~35%)、钾长石(25%~30%)、石英(35%左右)、黑云母(5%~10%),含少量白云母;副矿物主要有磁铁矿、刚玉、锆石、磷灰石等。石英粒度均匀,呈他形粒状。钾长石主要为正长石,表面泥化,有微弱的

碳酸盐化。斜长石聚片双晶清楚可见,有少量绢云母化(图 4)。

似斑状黑云母花岗岩呈灰白色,似斑状结构。斑晶含量为 30%~40%,主要为斜长石(10%~20%)、石英(10%~15%)、钾长石(5%左右)、黑云母(5%左右),斑晶粒径 0.5~2 cm。基质成分与斑晶一致,钾长石(10%~20%)、斜长石(15%~20%)、石英(15%~20%)、黑云母(5%~10%)。副矿物有磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石等。

3 样品采集与分析方法

所有样品均采自钻孔岩心,较新鲜,少有蚀变。岩石地球化学分析和 Sr-Nd-Pb 同位素测试样

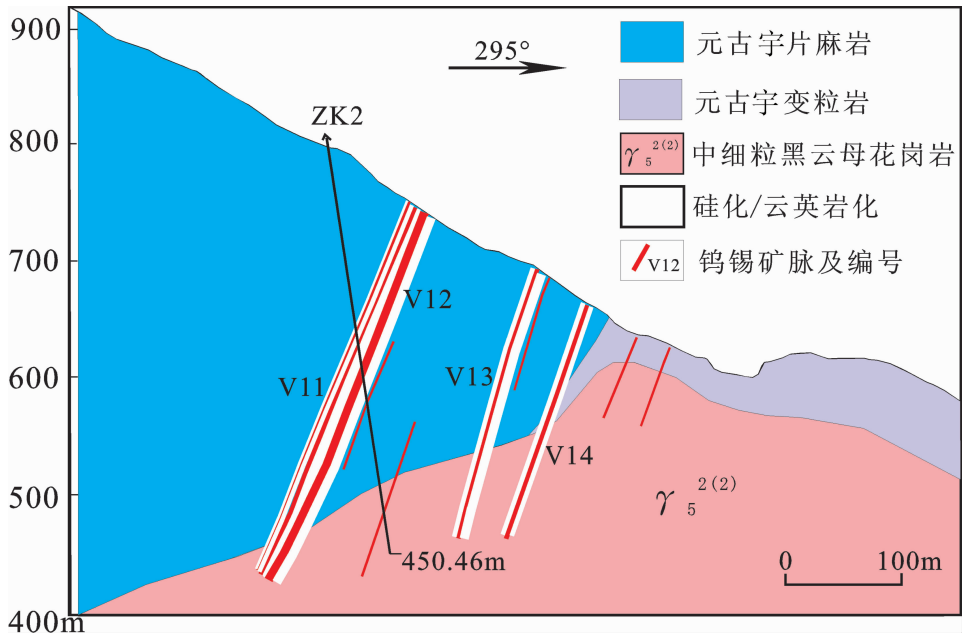


图 3 大金山钨锡多金属矿区 33 线剖面图(据罗大略等,2010 修改)

Fig.3 Geological section along No. 33 exploration line of the Dajinshan tungsten-tin polymetallic ore deposit (modified after Luo et al., 2010)

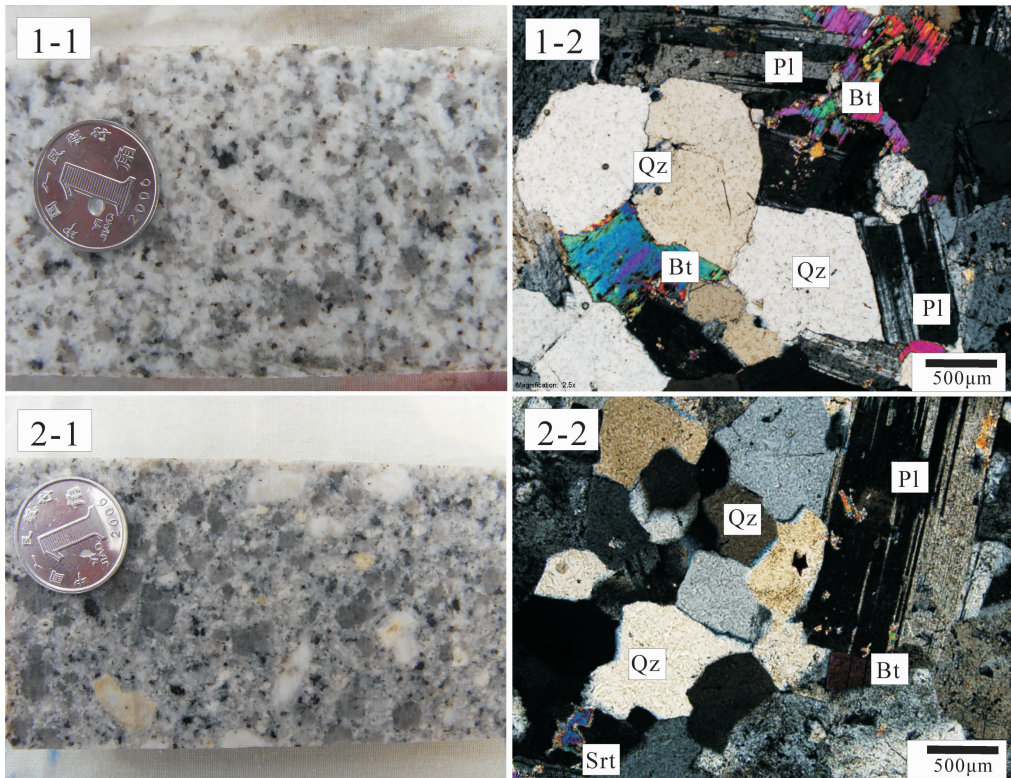


图 4 大金山花岗岩体样品照片和显微照片(正交偏光)
(1-1,1-2:中细粒黑云母花岗岩; 2-1,2-2:似斑状黑云母花岗岩)
Qz-石英;Pl-斜长石;Bt-黑云母;Srt-绢云母

Fig.4 Photographs and microstructure (crossed nicols) of granite stock from Dajinshan area
(1-1,1-2: medium to fine grained biotite granite; 2-1,2-2: pseudoporphyritic biotite granite)
Qz-Quartz; Pl-Plagioclase; Bt-Biotite; Srt-Sericite

品经无污染破碎、磨碎(200目以下)制成分析样品,测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)完成,精度优于1%。稀土和微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析,精度优于5%,少数含量极少($<10^{-8}$)的元素分析精度优于10%。Sr-Nd-Pb同位素测试采用ISOPROB-T热电离质谱仪,依据GB/T17672-1999《岩石中铅铷锶同位素测定方法》测定Sr、Nd、Pb同位素, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值通过ICP-MS方法测得Rb、Sr、Sm、Nd含量计算得到。

在精确测年的基础上进行锆石Hf同位素测试,测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接受等离子质谱仪和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上完成的。实验过程中采用He作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 $55\mu\text{m}$,测定时采用锆石国际标样GJ1作为参考物质,其 $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$ 的平均值为 $0.282\ 008\pm 0.000\ 028(2\sigma)$,分析点与U-Pb定年分析点为同一位置。分析流程及校正参见侯可军等^[3]。测试时对标准锆石(GJ1)共完成了6个点的测试, $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$ 的变化范围为 $0.281987\sim 0.282\ 036$,平均值为 $0.282\ 014\pm 0.000\ 016(2\sigma)$,与已有的研究结果^[3,4]在误差范围内完全一致。

4 结果

4.1 主量元素特征

大金山花岗岩体主量元素分析结果见表1。并以此为基础利用Geokit软件进行CIPW标准矿物计算^[5]。大金山岩体的两类花岗岩具有相似的主量元素地球化学特征,都具有高硅、富铝、富碱、贫镁钙的特征。中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩的 SiO_2 含量分别为 $75.51\%\sim 77.32\%$, $74.31\%\sim 77.44\%$,显著高于世界花岗岩的平均值 $69.26\%\sim 71.63\%$ ^[6,7];全碱含量($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)分别是 $7.49\%\sim 8.69\%$, $8.03\%\sim 8.81\%$,高于全球和南岭地区含锡花岗岩的平均值 7.85% 、 7.46% ^[8]; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值分别为 $1.02\sim 1.15$, $1.32\sim 1.65$;所有样品在 SiO_2 - K_2O 图解中都表现出高钾钙碱性系列岩石的特征(图5)。由图6可看出,中细粒黑云母花岗岩中 SiO_2 与 Al_2O_3 呈现负相关,与其他主量元素氧化物相关性不明显;似斑状黑云母花岗岩中 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、

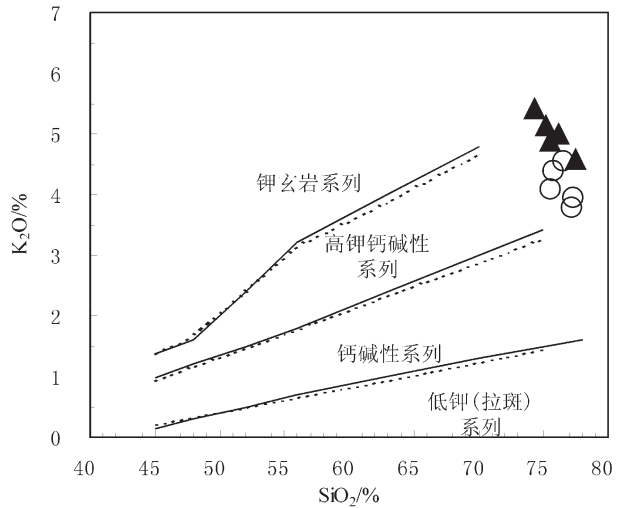


图5 大金山花岗岩体 SiO_2 - K_2O 图解
(○-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩)

Fig.5 K_2O versus SiO_2 diagram for Dajinshan granite stock
(○- Medium to fine grained biotite granite;
▲- Early pseudophyritic biotite granite)

K_2O 、 P_2O_5 呈负相关。 Al_2O_3 含量较均一,分别为 $(11.47\%\sim 12.28\%, 11.3\%\sim 12.66\%)$ 。铝饱和指数(A/CNK)小于1.1,分别为 $0.98\sim 1.08$, $0.95\sim 0.98$,属于准铝质花岗岩(图7);与全球(A/CNK 为1.1)及南岭(A/CNK 为1.23)^[9]含锡花岗岩相比,铝饱和指数偏低。中细粒黑云母花岗岩的分异指数 $DI=92.16\sim 96.19$,平均为93.66;似斑状黑云母花岗岩分异指数 $DI=91.25\sim 94.13$,平均为92.74。两类花岗岩分异指数均很高,反映岩体经历了高度的分异演化作用。 TiO_2 在两类花岗岩中的含量有较大的差别,在中细粒黑云母花岗岩中只有 $0.017\%\sim 0.028\%$,而在似斑状黑云母花岗岩中含量为 $(0.11\%\sim 0.17\%)$,两者含量相差近10倍,可见中细粒黑云母花岗岩经历过更高分异演化作用。

4.2 稀土元素与微量元素特征

大金山两类花岗岩的微量元素与稀土元素分析结果列于表1。中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩稀土元素含量分别为 $203.36\times 10^{-6}\sim 248.42\times 10^{-6}$ 、 $243.76\times 10^{-6}\sim 255.08\times 10^{-6}$,似斑状黑云母花岗岩稀土元素含量略高,两者的轻重稀土含量不同,中细粒黑云母花岗岩轻重稀土含量相近(ΣLREE 为 $100.58\times 10^{-6}\sim 116.94\times 10^{-6}$, ΣHREE 为 $102.78\times 10^{-6}\sim 131.48\times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 $0.89\sim 1.00$),似斑状黑云母花岗岩轻重稀土元素含量差别较大(ΣLREE 为 $194.34\times 10^{-6}\sim 209.42\times 10^{-6}$, ΣHREE 为 36.81×10^{-6}

表 1 大金山花岗岩全岩地球化学数据(主要元素:%; 稀土和微量元素: 10⁻⁶)
Table 1 Geochemical data of Dajinshan granite (major elements: wt%; trace elements: 10⁻⁶)

样品	中细粒黑云母花岗岩					似斑状黑云母花岗岩				
	ZK4302-6	ZK4302-7	ZK4302-9	ZK4302-10	ZK4302-A2	ZK003-1	ZK003-5	ZK003-11	ZK001-5	ZK001-B1
SiO ₂	75.79	75.51	77.14	77.32	76.51	74.31	77.44	76.14	75.17	75.5
Al ₂ O ₃	12.26	12.1	11.47	11.78	12.28	12.66	11.3	11.31	12.04	11.97
Fe ₂ O ₃	0.11	0.26	0.25	0.21	0.13	0.19	0.18	0.21	0.23	0.21
FeO	0.6	1.5	1.4	1.2	0.75	1.05	1	1.2	1.3	1.2
MgO	0.026	0.011	0.02	0.028	0.01	0.18	0.083	0.14	0.2	0.21
CaO	0.4	0.47	0.47	0.42	0.45	0.91	0.71	0.78	0.91	0.91
Na ₂ O	4.25	3.58	3.69	3.9	4.14	3.39	3.46	3.12	3.11	3.32
K ₂ O	4.39	4.1	3.8	3.96	4.55	5.42	4.57	5	5.14	4.88
MnO	0.077	0.16	0.16	0.15	0.091	0.059	0.066	0.074	0.083	0.068
TiO ₂	0.017	0.028	0.024	0.018	0.023	0.15	0.11	0.14	0.17	0.17
P ₂ O ₅	0.01	0.011	0.013	0.011	0.008	0.034	0.019	0.027	0.033	0.037
LOI	1.79	2.11	1.42	0.77	0.82	1.3	0.8	1.37	1.1	1.21
TOTAL	99.93	99.87	99.85	99.86	100.00	99.88	99.91	99.81	99.83	99.93
FeO [†]	0.71	1.76	1.65	1.41	0.88	1.24	1.18	1.41	1.53	1.41
K ₂ O+Na ₂ O	8.64	7.68	7.49	7.86	8.69	8.81	8.03	8.12	8.25	8.2
K ₂ O/Na ₂ O*	1.03	1.15	1.03	1.02	1.10	1.60	1.32	1.60	1.65	1.47
A/CNK*	0.98	1.08	1.04	1.03	0.98	0.97	0.95	0.95	0.98	0.97
DI	95.7	93.53	93.77	94.54	94.9	93.24	91.4	94.11	92.22	92.75
Sc	7.79	9.56	9.32	7.75	7.09	5.6	6.53	6.78	5.85	5.93
V	2.2	2.14	2.74	2.54	2.55	9.78	5.33	7.76	9.7	11.2
Cr	5.66	5.12	5.65	6.03	5.44	6.99	5.65	6.55	9.87	7.52
Co	0.276	0.421	0.431	0.352	0.287	1.21	0.792	1.07	1.38	1.47
Ni	1.02	0.718	0.852	0.644	0.855	1.02	0.869	1.08	1.43	1.34
Cu	1.4	1.62	4.05	2.07	5.79	0.737	1.25	1.15	1.06	1.04
Zn	27.1	149	62.4	34.8	132	26	29	32.4	37.7	30.6
Ga	29.4	28.7	30.2	29.5	27.9	19.4	20.2	20	21.2	19.1
Rb	732	802	806	751	726	389	421	439	440	400
Sr	4.85	7.14	10.3	9.76	8.64	70.5	37.6	45.9	37.5	67.1
Y	203	177	187	190	178	60.3	100	82.3	62.6	77.7
Zr	108	102	108	89.7	106	128	179	156	155	147
Nb	26.1	33.5	27.8	21.8	28.8	34.7	49.6	37.4	35.2	28.1
Mo	4.74	9.2	7.38	0.525	9.56	0.403	0.745	1.17	0.988	4.04
Cs	13.8	20.2	24	20.1	16.5	7.41	8.11	8.42	12.3	7.76
Ba	5.9	10.8	13.3	15	14.8	280	84	162	251	279
Hf	9.54	7.43	8.78	8.3	7.86	5.41	7.9	6.36	5.93	5.66
Ta	18.8	16	17.5	16.1	15.4	6.85	7.13	5.17	5.58	4.18
Pb	65.6	269	123	91	75.4	38	34.9	33.7	36	34.5
Th	22.9	25.6	23.9	22	25.6	38.3	54.8	41.2	36.6	38.2
U	25.6	21.6	22.2	20.6	21.5	14.4	20.9	13.8	11.1	10.3
La	16.6	14.8	15.3	16.5	15.1	45.3	39.2	43.3	47.1	45.8

续表 1

样品	中细粒黑云母花岗岩					似斑状黑云母花岗岩				
	ZK4302-6	ZK4302-7	ZK4302-9	ZK4302-10	ZK4302-A2	ZK003-1	ZK003-5	ZK003-11	ZK001-5	ZK001-B1
Ce	46.2	40.8	41.4	45.8	42.4	93.3	86.6	90.3	91.5	95
Pr	7.02	5.95	6.23	6.99	6.07	11.7	11	11.4	11.8	11.8
Nd	31.3	26.9	27.8	31.5	27	45.5	44.6	43.3	45.1	45.6
Sm	15.8	12.1	13.2	14.5	12.2	10.8	12.7	10.8	10.5	10.8
Eu	0.02	0.034	0.032	0.034	0.038	0.425	0.235	0.335	0.387	0.423
Gd	17.3	14	15	16	14.5	9.21	11.7	9.88	8.76	9.61
Tb	4.93	3.92	4.15	4.52	4.01	1.77	2.64	2.14	1.74	2
Dy	33.3	26.7	27.8	30.1	27	9.85	16.2	13.3	10	12.1
Ho	6.78	5.51	5.75	6.11	5.59	1.85	3.31	2.68	1.9	2.39
Er	23.4	18.9	19.7	20.8	18.6	5.72	10.4	8.41	5.98	7.57
Tm	4.79	3.65	3.88	4.18	3.62	1.03	1.81	1.45	1.04	1.34
Yb	35.4	26	28.5	30.7	25.5	6.39	11.6	9.34	6.83	9.25
Lu	5.58	4.1	4.49	4.87	4.07	0.992	1.8	1.48	1.12	1.4
REE	248.42	203.36	213.23	232.60	205.70	243.84	253.80	248.12	243.76	255.08
LREE	116.94	100.58	103.96	115.32	102.81	207.03	194.34	199.44	206.39	209.42
HREE	131.48	102.78	109.27	117.28	102.89	36.81	59.46	48.68	37.37	45.66
(LREE/HREE) ^N	0.89	0.98	0.95	0.98	1.00	5.62	3.27	4.10	5.52	4.59
(La/Yb) ^N	0.32	0.38	0.36	0.36	0.40	4.78	2.28	3.13	4.65	3.34
δ^{Eu}	0.004	0.008	0.007	0.007	0.009	0.130	0.059	0.099	0.123	0.127
δ^{Ce}	1.030	1.046	1.021	1.026	1.066	0.975	1.004	0.978	0.934	0.984

注: * 单位为 1。

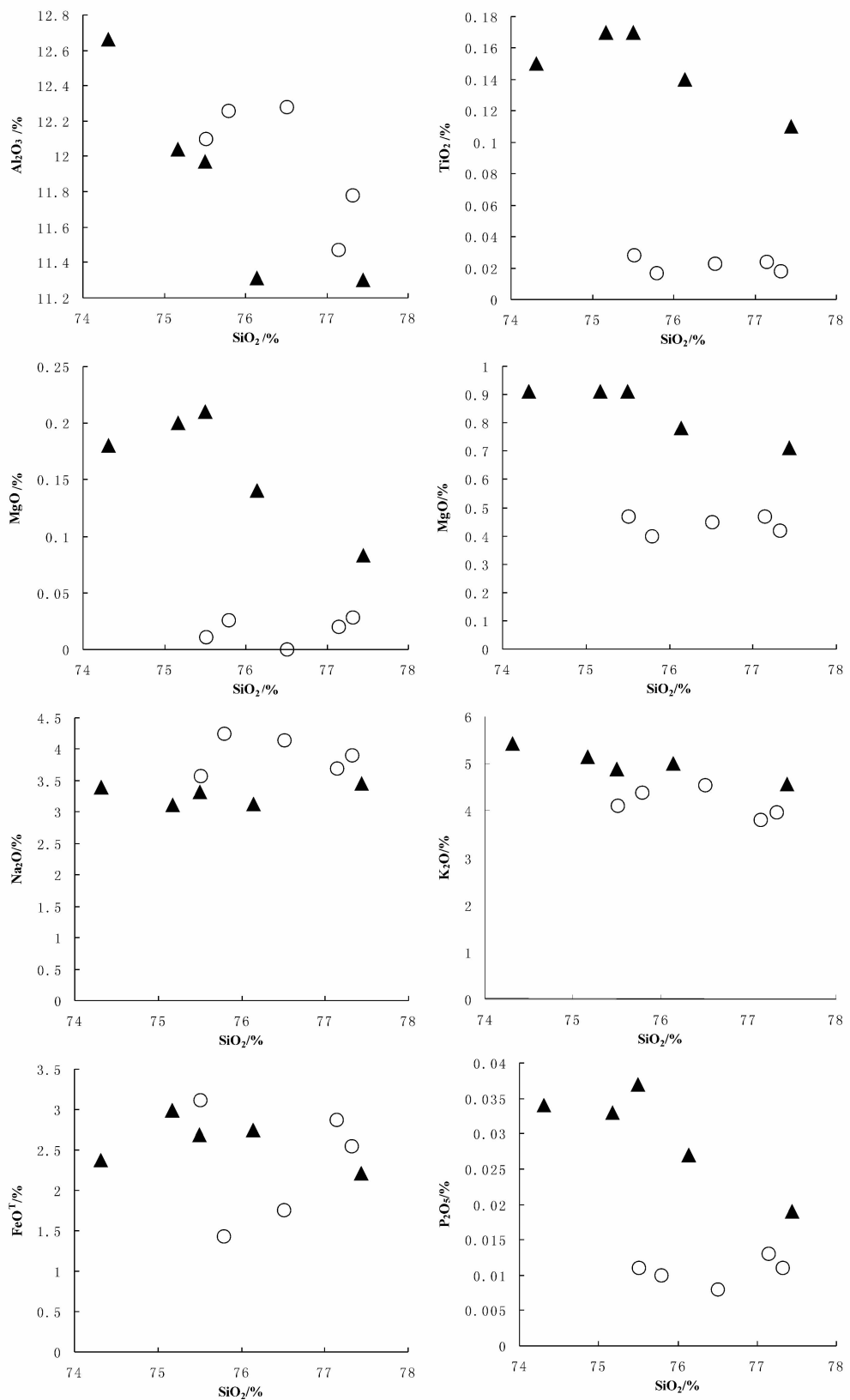


图 6 大金山花岗岩体的 Harker 图解(○-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩)
 Fig.6 Harker diagram of Dajinshan granite stock (○-Medium to fine grained biotite granite;
 ▲-Pseudoporphyritic biotite granite)

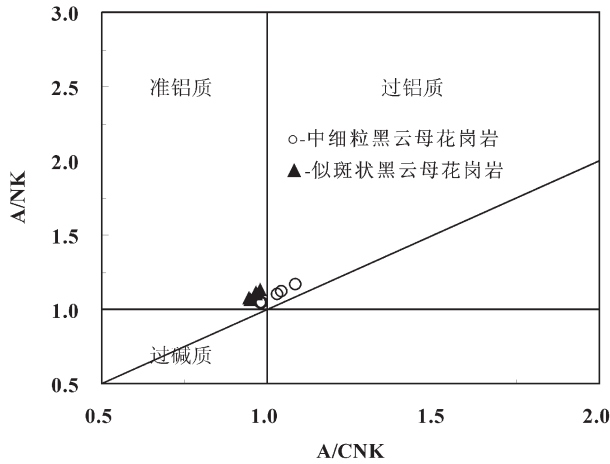


图7 大金山花岗岩体 A/NK-A/CNK 图解
Fig.7 A/NK versus A/CNK plot of Dajinshan granite stock

~ 59.46×10^{-6} , LREE/HREE 为 3.27 ~5.62)。两者(La/Yb)_N 分别为 0.32~0.40 和 2.28~4.78。两者都具有明显的 Eu 负异常 (图 8)^[10], δ Eu 分别为 0.004~0.009、0.059~0.13, 从中细粒黑云母花岗岩到似斑状黑云母花岗岩亏损减弱; 两类花岗岩均没有明显的 Ce 异常。稀土元素球粒陨石标准化图解(图 8)呈明显的“V”型, 并具有“M”型的四分组效应。强烈的负铕异常反映了初始的花岗质岩浆经历了高度的分离结晶作用, 即属于高演化岩浆体系, 而高演化岩浆体系中岩浆与富挥发分流体相互作用可能是形成稀土四分

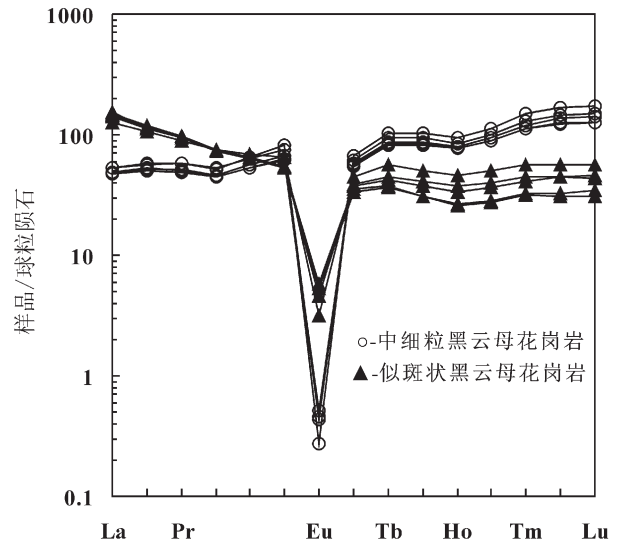


图8 大金山花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(据 Boynton,1984)
Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of Dajinshan granite stock in Yunfu area, Guangdong Province (after Boynton, 1984)

组的控制因素^[11,12]。

由微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 9)^[13]可知, 大金山岩体的微量元素整体表现出强烈富集 Rb、Th、U、Ta 等元素, 而亏损 Ba、Nb、Eu、Ti、Sr 等不相容元素。强不相容元素 Rb 在两类花岗岩中均富集

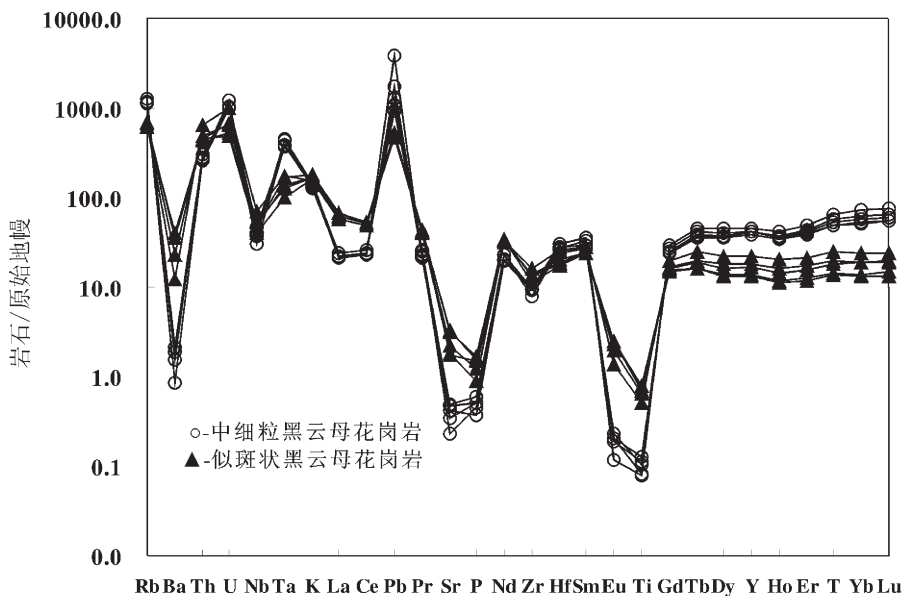


图9 大金山花岗岩体微量元素原始地幔标准化曲线(据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.9 Primitive mantle-normalized trace element patterns of Dajinshan granite stock in Yunfu area, Guangdong Province (after Sun and McDonough, 1989)

($726 \times 10^{-6} \sim 806 \times 10^{-6}$; $389 \times 10^{-6} \sim 440 \times 10^{-6}$), 表明花岗岩在形成过程中经历了高度的分异演化。

4.3 Sr-Nd-Pb 同位素

大金山花岗岩体 Sr、Nd、Pb 同位素分析结果见表 2。中细粒黑云母花岗岩、似斑状黑云母花岗岩 Rb/Sr 比值分别是 76.95~84.03、5.52~11.73; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值分别是 0.726 66~0.74 312, 0.70 523~0.71 660, 华南地区与钨锡多金属矿有关的花岗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值基本一致^[14]。两类花岗岩均具有较高的 Rb/Sr 和 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值, 高 Rb/Sr 值的产生可能有两种原因: 一是原始岩浆岩体系自身含有较高 Rb/Sr 值, 导致花岗岩体中的 Rb/Sr 值高; 二是花岗质岩浆高度分异演化, 从早到晚 Rb 越来越富集, 导致晚阶段的花岗岩体中的 Rb/Sr 值较高。对于高 Rb/Sr 比值的花岗岩来说, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值会存有很大的不确定性, 表 2 中经过年龄校正计算所得的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值显然是不合理的, 不适合用于讨论岩石成因^[15,16]。

中细粒黑云母花岗岩的 Sm/Nd 值介于 0.45~0.50, 远远高于地壳岩石正常值(0.16~0.24)范围; 似斑状黑云母花岗岩的 Sm/Nd 值为 0.23~0.28, 部分略高于地壳岩石正常值。两类花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -8.02~-9.22, 较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值反映其源区是以古老地壳物质为主。

两类花岗岩具有相似的铅同位素组成(表 2), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.773~19.166, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.711~15.737, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 39.085~39.412。两类花岗岩相同的铅同位素组成表明其具有相似的来源。在 Zartman 等^[17]提出的铅构造模式图上(图 10), 所有数据点都投影于上地壳演化线上。

4.4 Hf 同位素

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示中细粒黑云母花岗岩形成于 (82.89 ± 0.35)Ma~(85.6 ± 0.52)Ma, 似斑状黑云母花岗岩形成于 (75.01 ± 0.16)Ma~(84.17 ± 0.34)Ma(详细数据, 另文发表)。在锆石测年的基础上, 进行了 Hf 同位素原位分析, 结果列于表 3。岩体的 $f_{\text{Lw/Hf}}$ 值介于 -0.77~-0.97, 小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lw/Hf}}$ 值 -0.34^[18]和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lw/Hf}}$ 值 -0.72^[19], 因此两阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳的平均存留年龄)^[20]。本文采用硅铝质大陆地壳的 $f_{\text{Lw/Hf}}$ 计算岩体的初始 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 t_{DM1} 和 t_{DM2} , 具体计算过程见吴福元等^[21]。两类花岗岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282 486~

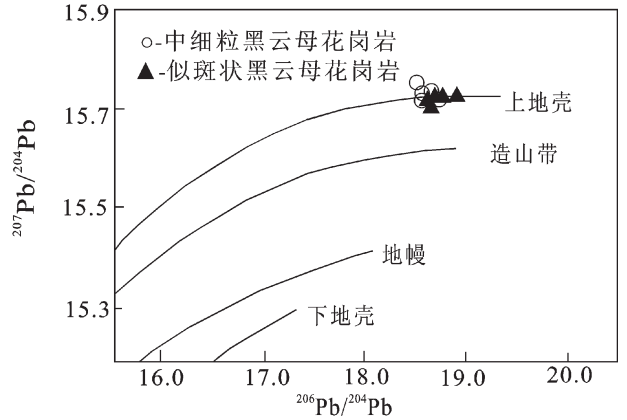


图 10 大金山花岗岩铅构造模式图

Fig.10 Plumbotectonics model of Dajinshan granite stock

0.282 698; 中细粒黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 比值分别是 -2.05~-8.64、-2.15~-6.57; 两阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM2} 变化于 1204~1692 Ma。

5 讨论

5.1 岩石类型及成因

Chappell and White(1974)^[22]根据岩石地球化学特征提出花岗岩的 ISAM 分类方案, 将花岗岩大致划分为四类。大金山花岗岩属于高钾钙碱性系列, 具有高硅富碱的特点, 这与由地幔岩浆衍生的 M 型花岗岩明显不同。另外, 大金山花岗岩 A/CNK 值为 0.95~1.08, 表现出准铝质特性; 贫磷, P_2O_5 含量均在 0.05% 以下; 基本不含刚玉、石榴子石等富铝矿物; 以上因素表明岩体基本不可能属于 S 型花岗岩。

大金山花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2=74.31\% \sim 77.44\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.49\% \sim 8.81\%$)、贫镁钙($\text{MgO}=0.01\% \sim 0.21\%$, $\text{CaO}=0.4\% \sim 0.91\%$)、准铝质($\text{A}/\text{CNK}=0.95 \sim 1.08$)的特点; 微量元素中 Ga($19 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$)含量和 10000Ga/Al 值(2.89~4.97)很高, Zr($90 \times 10^{-6} \sim 179 \times 10^{-6}$)、Rb ($389 \times 10^{-6} \sim 806 \times 10^{-6}$) 含量较高, Sr ($4.85 \times 10^{-6} \sim 70.5 \times 10^{-6}$)含量较低; 富集 Rb、Th、U、Ta 等元素而亏损 Ba、Nb、Eu、Ti、Sr 等不相容元素; 具有明显的负铕异常, 在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 8)上呈明显的“V”型, 并具有“M”型的四分组特征。以上这些特征与 A 型花岗岩类似^[23,24]。在花岗岩类型判别图上(图 11), 大金山花岗岩大部分都投到了 A 型区域。根据 Eby^[24,25]提出的 A 型花岗岩细分方案, 似斑状黑云母花岗岩都投到了 A 型花岗岩中的 A₂ 型区域(图 12), 而中细粒黑云母花岗岩都投

表 2 大金山花岗岩体 Sr、Nd、Pb 同位素分析结果
Table 2 Sr, Nd and Pb isotope composition of granites from Dajinshan granite stock in Yunfu area

岩石名称	中细粒黑云母花岗岩					似斑状黑云母花岗岩				
	ZK4302-9	ZK4302-10	ZK4302-A2	ZK003-1	ZK003-5	ZK003-11	ZK001-5	ZK001-B1		
Rb($\times 10^{-6}$)	806	751	726	389	421	439	440	400		
Sr($\times 10^{-6}$)	10.3	9.76	8.64	70.5	37.6	45.9	37.5	67.1		
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	226.36	222.58	243.07	15.96	32.39	27.67	33.94	17.24		
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1.009013	1.011938	1.013305	0.733302	0.755252	0.747499	0.741392	0.733524		
2 σ	0.000015	0.000012	0.00001	0.000009	0.00001	0.000009	0.00001	0.000008		
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.73563	0.74312	0.72666	0.71425	0.71660	0.71448	0.70523	0.71515		
Sm($\times 10^{-6}$)	13.2	14.5	12.2	10.8	12.7	10.8	10.5	10.8		
Nd($\times 10^{-6}$)	27.8	31.5	27	45.5	44.6	43.3	45.1	45.6		
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.28716	0.27839	0.27327	0.14355	0.17221	0.15085	0.14080	0.14324		
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512258	0.512269	0.512214	0.512166	0.512213	0.512172	0.512169	0.512139		
2 σ	0.000011	0.000007	0.000008	0.000008	0.00001	0.000009	0.000009	0.000006		
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.51210	0.51211	0.51207	0.51209	0.51212	0.51209	0.51210	0.51207		
$\epsilon_{\text{Nd}(t)}$	-8.39	-8.10	-9.09	-8.64	-8.02	-8.61	-8.61	-9.22		
T_{DM}/Ma	-	-	-	2135	3426	2368	2048	2183		
$T_{\text{DM}2}/\text{Ma}$	1569	1545	1627	1589	1540	1587	1580	1630		
Th($\times 10^{-6}$)	23.9	22	25.6	41.2	36.6	38.2	38.3	54.8		
U($\times 10^{-6}$)	22.2	20.6	21.5	13.8	11.1	10.3	14.4	20.9		
Pb($\times 10^{-6}$)	123	91	75.4	33.7	36	34.5	38	34.9		
U/Th	0.93	0.94	0.84	0.33	0.30	0.27	0.38	0.38		
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.773	18.788	18.867	18.893	19.166	18.967	18.860	18.837		
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.733	15.721	15.737	15.717	15.729	15.727	15.711	15.719		
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	39.120	39.085	39.159	39.189	39.412	39.29	39.164	39.225		
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	18.652	18.666	18.744	18.770	19.040	18.843	18.751	18.728		
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	15.728	15.716	15.732	15.712	15.724	15.722	15.706	15.714		
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	38.961	38.926	38.999	39.029	39.248	39.128	39.021	39.082		

注: - 敏感式年龄为负。

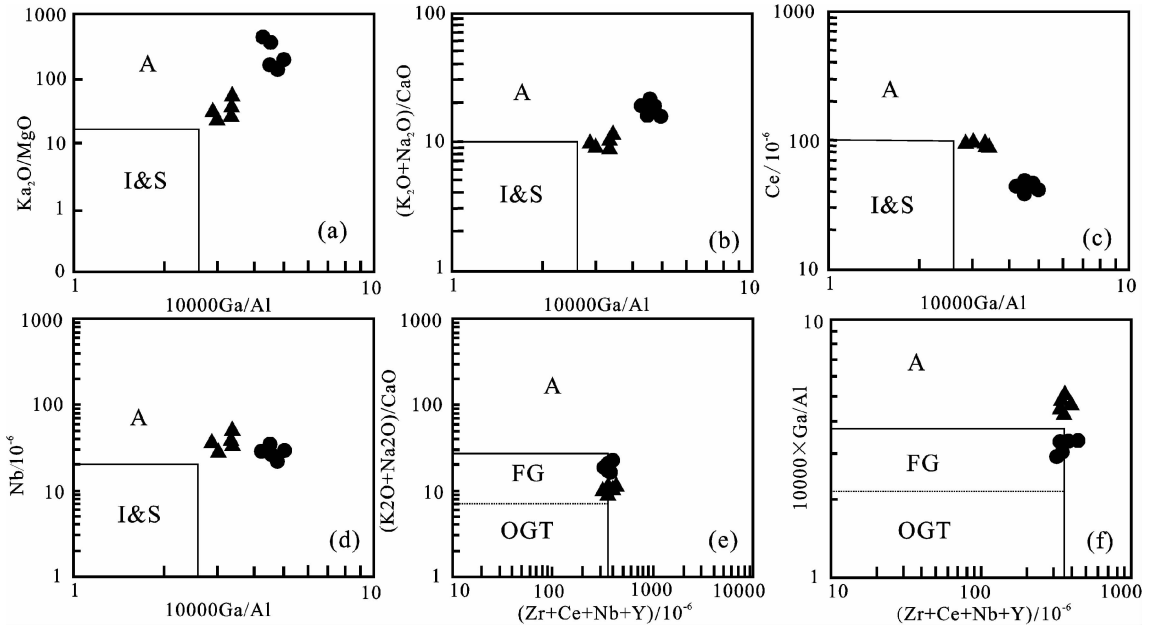


图 11 大金山花岗岩岩石类型判别图解(据 Whalen et al., 1987;Eby, 1990)

(●-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩)

Fig.11 Discrimination diagrams of Dajinshan granite (after Whalen et al., 1987;Eby, 1990)

(●- Medium to fine grained biotite granite; ▲-Pseudoporphyritic biotite granite)

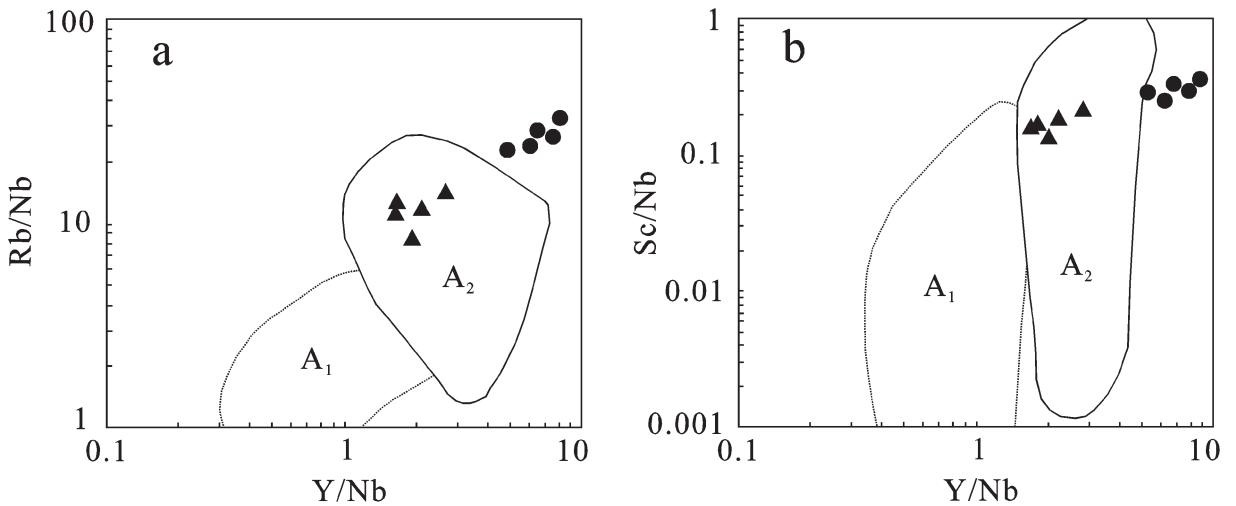


图 12 大金山花岗岩体 Rb/Nb-Y/Nb 图解(a)与 Sc/Nb-Y/Nb 图解(b)

(●-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩) (据 Eby, 1992)

Fig.12 Rb/Nb versus Y/Nb diagram (a) and Sc/Nb versus Y/Nb diagram (b)

(●- Medium to fine grained biotite granite; ▲-Pseudoporphyritic biotite granite) (after Eby, 1992)

在了 A₂ 型区域外,可能由于中细粒黑云母花岗岩经历了高度的分异演化,导致 Rb 的富集和 Nb 亏损更加明显。大金山花岗岩分异指数 (DI= 91.25~96.19)很高,也反映岩体经历了高度的分异演化。综合以上因素,本文认为大金山花岗岩属于高分异 A

型花岗岩。

A 型花岗岩的成因主要有 3 类:富 F 麻粒岩相下地壳部分熔融^[23]、长英质和镁铁质源岩部分熔融^[24]和幔源的碱性基性岩-中性岩分异演化^[27]。

大金山花岗岩体 Sr-Nd 同位素分析结果表明,

岩体具有较高的 Rb/Sr 比值,表明岩浆形成后曾发生较强的斜长石、磷灰石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用。高 Rb/Sr 比值的花岗岩经过年龄校正计算出来的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值会出现不合理的误差,从而造成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值不具有明确的成岩指示作用^[16,28,29]。但是 Sm、Nd 的活动性较小,Nd 的同位素初始比值在岩浆分异过程中不会发生明显改变,能有效地示踪岩浆源区性质。大金山花岗岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值,变化于-9.22~-8.02,说明其源区的贡献应以地壳物质为主。大金山花岗岩体全岩铅同位素具有较一致的组成, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.773\sim 19.166$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.711\sim 15.737$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.085\sim 39.412$ 。在 Zartman 等^[17]提出的铅构造模式图上,所有数据点都投影于地壳演化线上(图 10),表明大金山花岗岩体主要来源于地壳。此外,Hf 同位素示踪可以有效地判别一些重要的地球化学储库的源区^[20,30-32]。大金山花岗岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值都小于 0.282 772, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值,变化于-0.92~-8.64,表明其为壳源成因(图 13),与全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果一致。综上分析,可以认为大金山 A 型花岗岩是地壳部分熔融的产物。

5.2 岩浆演化特征

花岗质岩浆在演化过程中,会伴随有不同矿物的分离结晶,表现为元素的富集和亏损。大金山花岗岩体的 MgO、TiO₂ 等氧化物含量很低,且与 SiO₂ 呈

负相关,表明大金山花岗岩体经历了镁铁质矿物的分离结晶。由图 8 可知,大金山花岗岩体具有明显的负钨异常,而钨异常可以指示斜长石的分离结晶程度^[33],明显的负钨异常则反映大金山花岗岩体存在斜长石的分离结晶。利用花岗岩的 La/Sm-La 关系图解,可以较好的判别花岗岩的成岩方式^[20,34,35]。将本文所研究的大金山花岗岩体稀土元素数据投在 La-La/Sm 关系图解(图 14)上,所有数据点基本落在部分熔融曲线附近,说明大金山花岗岩体为部分熔融的产物。由于大金山花岗岩体由地壳部分熔融形成,因此可以采用两阶段 Nd 模式年龄^[36,37]。结果表明(表 2),大金山花岗岩体 Nd 模式年龄为 1 540~1 630 Ma,与 Hf 同位素两阶段模式年龄(1 204~1 692 Ma)基本一致,表明大金山花岗岩体来源于中元古代地壳的部分熔融。

在同一套花岗质岩浆分异演化过程中,从早到晚 Rb、Sm 越来越富集,使得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、Sm/Nd 值趋于增高。因此,在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对 Sm/Nd 图解中投影可以分析岩浆的演化特点和判别不同阶段岩浆是否为同源产物^[38]。从图 15 中可以看出,大金山花岗岩体从中细粒黑云母花岗岩到似斑状黑云母花岗岩, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 Sm/Nd 比值均下降,并且在图中两者明显分布于不同的区域,表明两者具有不同的岩浆来源。

5.3 构造背景

A 型花岗岩与拉张的构造背景有关^[23],Eby (1990, 1992)^[24,25]指出,A₂ 型花岗岩是后造山的,代表

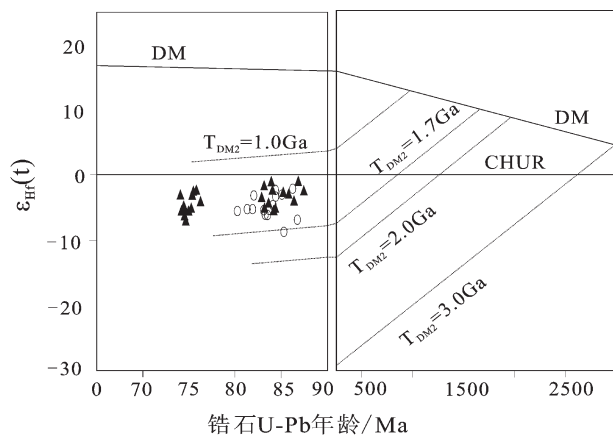


图 13 大金山花岗岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对 U-Pb 年龄图解
(○-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩)
Fig.13 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus U-Pb ages of zircon from Dajinshan granite stock
(○-Medium to fine grained biotite granite; ▲-Pseudoporphyritic biotite granite)

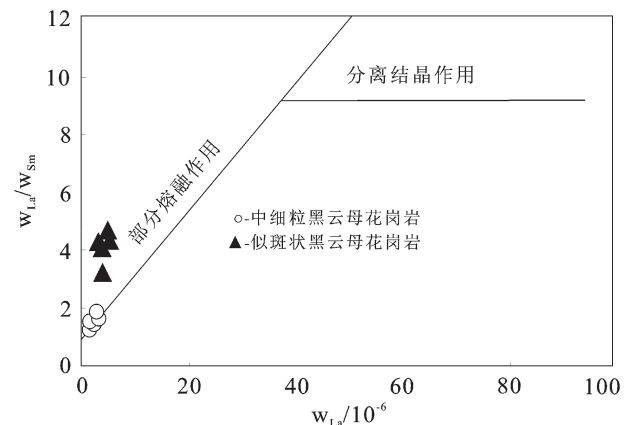


图 14 大金山花岗岩 $w_{\text{La}}/w_{\text{Sm}}-w_{\text{La}}$ 关系图
(○-中细粒黑云母花岗岩;▲-似斑状黑云母花岗岩)
(底图据 Treuil and Joron,1975)
Fig.14 La/Sm versus La plot of Dajinshan granite porphyry (after Treuil and Joron,1975)

表 3 大金山花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果
Table 3 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of Dajinshan granite stock in Yunfu area

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DM1}	T_{DM2}
中细粒黑云母花岗岩										
4302-10-2	0.321 564	0.007 119	0.282 486	0.000 048	85.3	-10.10	-8.64	-0.785 6	1 291.99	1 692.35
4302-10-4	0.141 770	0.002 364	0.282 644	0.000 019	85.0	-4.53	-2.80	-0.928 8	893.56	1 324.98
4302-10-6	0.350 775	0.007 588	0.282 673	0.000 036	86.2	-3.51	-2.05	-0.771 4	994.27	1 277.48
4302-10-9	0.217 483	0.004 479	0.282 540	0.000 029	86.7	-8.22	-6.57	-0.865 1	1 109.99	1 564.11
4302-A2-1	0.182 243	0.003 093	0.282 641	0.000 025	82.0	-4.64	-3.00	-0.906 8	916.12	1 335.33
4302-A2-10	0.097 451	0.001 867	0.282 632	0.000 021	84.3	-4.95	-3.20	-0.943 8	898.26	1 349.66
4302-A2-11	0.175 934	0.003 803	0.282 657	0.000 021	84.4	-4.06	-2.42	-0.885 4	909.97	1 300.05
4302-A2-13	0.092 213	0.001 624	0.282 566	0.000 021	83.2	-7.27	-5.54	-0.951 1	986.40	1 496.66
4302-A2-14	0.113 469	0.002 372	0.282 571	0.000 026	83.1	-7.10	-5.40	-0.928 6	999.52	1 488.12
4302-A2-16	0.262 901	0.005 923	0.282 586	0.000 029	81.4	-6.57	-5.10	-0.821 6	1 083.48	1 466.81
4302-A2-18	0.175 975	0.003 737	0.282 580	0.000 026	80.3	-6.80	-5.23	-0.887 4	1 025.68	1 475.00
4302-A2-5	0.076 480	0.001 362	0.282 556	0.000 023	83.4	-7.65	-5.89	-0.959 0	994.67	1 519.56
4302-A2-7	0.045 094	0.000 840	0.282 592	0.000 026	84.0	-6.38	-4.59	-0.974 7	930.88	1 437.44
4302-A2-8	0.061 855	0.001 132	0.282 579	0.000 024	81.8	-6.84	-5.10	-0.965 9	956.22	1 468.39
4302-A2-9	0.086 908	0.001 549	0.282 576	0.000 020	83.7	-6.95	-5.20	-0.953 3	971.36	1 475.61
似斑状黑云母花岗岩										
003-11-1	0.095 272	0.001 884	0.282 662	0.000 017	83.2	-3.90	-2.18	-0.943 2	856.00	1 284.05
003-11-11	0.174 361	0.003 464	0.282 646	0.000 032	87.5	-4.45	-2.74	-0.895 7	918.07	1 322.41
003-11-12	0.111 158	0.002 294	0.282 612	0.000 027	86.4	-5.67	-3.90	-0.930 9	938.61	1 395.80
003-11-13	0.159 888	0.003 091	0.282 690	0.000 025	86.8	-2.92	-1.19	-0.906 9	843.47	1 223.81
003-11-14	0.066 568	0.001 138	0.282 628	0.000 017	84.7	-5.10	-3.31	-0.965 7	887.11	1 356.93
003-11-15	0.066 205	0.001 130	0.282 564	0.000 017	84.2	-7.37	-5.59	-0.966 0	977.59	1 500.98

续表 3

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DMI}	T_{DM2}
003-11-16	0.058 798	0.001 001	0.282 593	0.000 019	83.9	-6.34	-4.56	-0.969 8	933.23	1 435.49
003-11-17	0.085 785	0.001 463	0.282 584	0.000 018	83.7	-6.66	-4.90	-0.955 9	957.55	1 457.18
003-11-18	0.071 120	0.001 214	0.282 573	0.000 020	83.2	-7.03	-5.28	-0.963 4	966.23	1 480.43
003-11-19	0.085 042	0.001 493	0.282 567	0.000 017	84.2	-7.26	-5.49	-0.955 0	982.45	1 494.88
003-11-20	0.119 574	0.002 072	0.282 642	0.000 020	85.1	-4.61	-2.86	-0.937 6	889.37	1 328.42
003-11-3	0.082 016	0.001 355	0.282 666	0.000 022	83.1	-3.73	-1.98	-0.959 2	837.16	1 271.74
003-11-4	0.181 529	0.003 699	0.282 650	0.000 027	84.2	-4.30	-2.66	-0.888 6	917.58	1 315.01
003-11-5	0.133 209	0.002 498	0.282 698	0.000 026	84.0	-2.62	-0.92	-0.924 8	817.31	1 204.41
003-11-6	0.056 474	0.001 002	0.282 575	0.000 019	83.9	-6.98	-5.19	-0.969 8	958.53	1 475.69
003-11-7	0.114 264	0.001 790	0.282 618	0.000 016	83.0	-5.45	-3.73	-0.946 1	916.91	1 382.11
003-11-9	0.080 592	0.001 355	0.282 629	0.000 021	85.7	-5.07	-3.27	-0.959 2	891.09	1 355.24
001-B1-1	0.059 275	0.000 974	0.282 544	0.000 020	74.6	-8.06	-6.48	-0.970 7	1 001.00	1 549.89
001-B1-10	0.058 532	0.001 030	0.282 623	0.000 020	76.2	-5.26	-3.64	-0.969 0	890.89	1 371.62
001-B1-11	0.050 810	0.000 906	0.282 584	0.000 021	75.2	-6.63	-5.03	-0.972 7	942.41	1 458.75
001-B1-12	0.119 132	0.002 089	0.282 575	0.000 019	75.0	-6.96	-5.42	-0.937 1	986.27	1 483.05
001-B1-13	0.049 690	0.000 902	0.282 541	0.000 020	74.5	-8.16	-6.57	-0.972 8	1 002.74	1 555.52
001-B1-2	0.195 746	0.003 527	0.282 648	0.000 022	75.6	-4.38	-2.89	-0.893 8	916.29	1 323.35
001-B1-3	0.054 990	0.000 932	0.282 574	0.000 019	74.4	-6.99	-5.41	-0.971 9	957.40	1 482.13
001-B1-4	0.058 825	0.000 983	0.282 641	0.000 018	74.2	-4.62	-3.04	-0.970 4	864.26	1 332.04
001-B1-5	0.120 956	0.001 978	0.282 640	0.000 019	75.4	-4.65	-3.10	-0.940 4	889.02	1 336.44
001-B1-6	0.078 669	0.001 282	0.282 588	0.000 021	74.6	-6.51	-4.94	-0.961 4	947.15	1 452.73
001-B1-7	0.084 097	0.001 443	0.282 645	0.000 019	75.5	-4.49	-2.91	-0.956 5	869.62	1 324.34
001-B1-8	0.052 242	0.000 902	0.282 573	0.000 019	74.7	-7.03	-5.44	-0.972 8	958.13	1 484.28
001-B1-9	0.190 437	0.003 345	0.282 669	0.000 017	75.7	-3.64	-2.15	-0.899 2	880.39	1 276.20

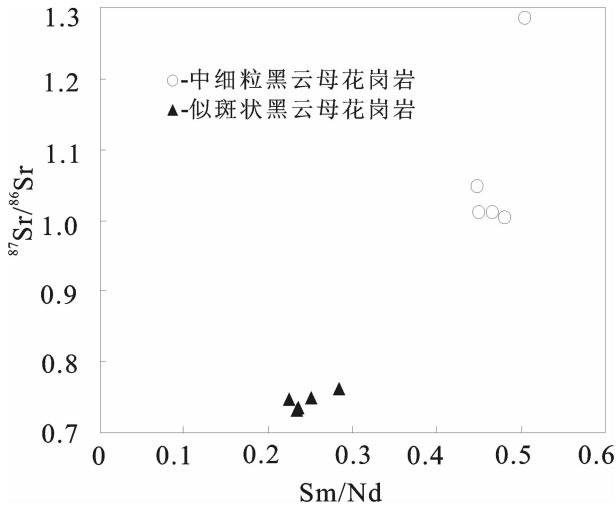


图 15 大金山花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对 Sm/Nd 图解
 Fig.15 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus Sm/Nd diagram of Dajinshan granite stock

一种伸展环境。这一结论与大金山花岗岩主、微量元素构造图解(图 16)^[39,40]中显示的结果一致,表明大金山花岗岩形成于伸展环境中。

对华南地区晚中生代的成岩成矿构造背景已有大量的研究成果^[41-57],普遍认为晚中生代华南地区处于拉张伸展的构造背景。谢桂青^[52]提出华南地区的岩石圈伸展出现于 6 个阶段,但主要可以归并为 155~180 Ma、125~145 Ma 和 75~110 Ma 3 个阶段;李献华^[57]认为中生代华南岩石圈出现过多次的伸展作用,并划分出 5 次花岗岩侵位事件;毛景文等^[55]认为 80~110 Ma 是华南一次影响全区的大规模伸展阶段。晚中生代华南地区处于大规模伸展阶段是一个不争的地质事实,其原因多归属于太平洋板块运动方向发生转向,由原来的斜俯冲转向几乎平行大陆边缘运动^[56,58-61]。

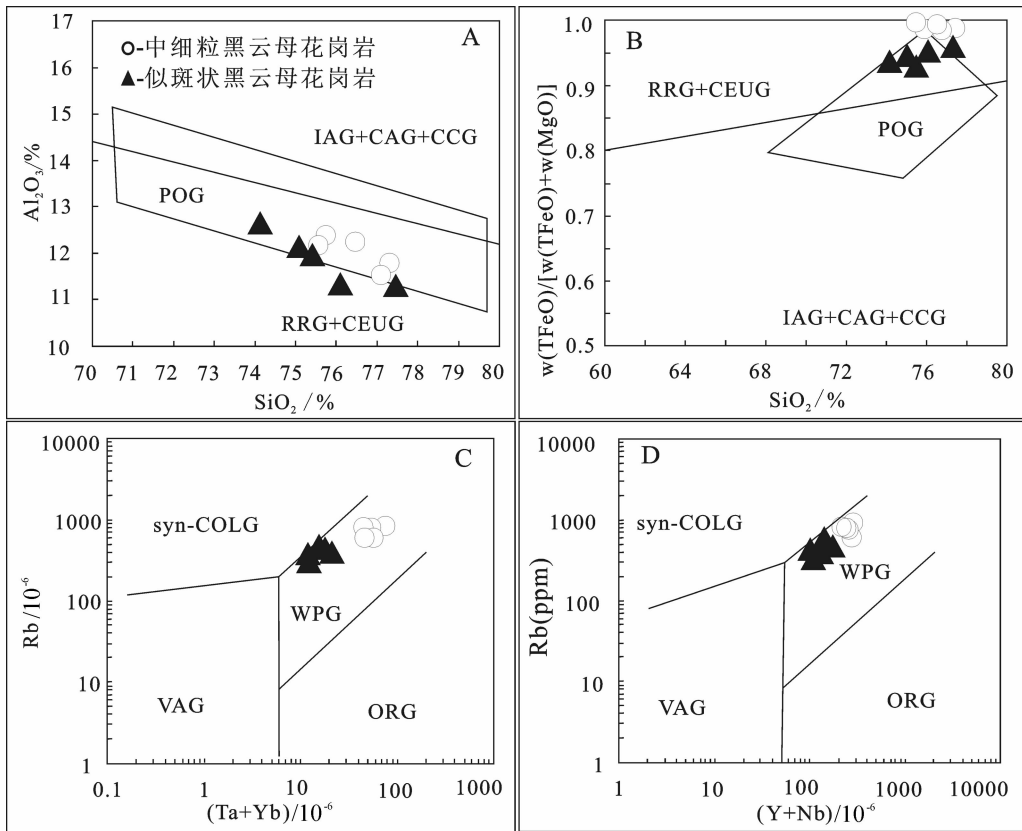


图 16 花岗岩形成的构造环境判别图(底图据 Pearce 等,1984;Maniar 等,1989)

IAG—岛弧花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后碰撞造山花岗岩类;RRG—与裂谷有关的花岗岩;CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类;syn—CLOG—同碰撞带花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩

Fig.16 Diagrams for discrimination of structural environments of granites (after Pearce et al., 1984; Maniar et al., 1989)

IAG—Island-arc granitoids; CAG—Continental arc; CCG—Continental collision granite; POG—Post orogenic granite; RRG—Rift-related granite; CEUG—Continental epirogenetic uplift granite; syn—CLOG—Syn-collisional granite; WPG—Intraplate granites; VAG—Volcanic arc granitoid; ORG—Ocean rift granite

已有的研究表明,大金山地区经历了自二叠纪到三叠纪的碰撞挤压、三叠纪的构造转换、白垩纪的拉张伸展;在燕山晚期,本区属于板块内部拉张环境^[62]。陈炳辉等^[63]对云开隆起中段信宜—罗定地区含锡花岗岩的研究结果表明,晚白垩世区域内岩石圈处于拉张伸展状态。结合区内地质背景,本文认为大金山花岗岩形成于伸展构造背景下。

6 结 论

大金山花岗岩体属于高钾钙碱性系列,岩石具有高硅、富碱、贫镁钙、准铝质的特点;分异指数高,表明岩石经历了高度分异演化。具有强烈的 Eu 负异常,富集 Rb、Th、U 等元素而亏损 Nb、Eu、Ti 等不相容元素。

大金山花岗岩具有 A₂ 型花岗岩的特征,形成于晚中生代华南岩石圈大规模拉张伸展的构造背景下,可能是地壳部分熔融的产物。

致谢:野外工作得到广东省地质调查院领导和技术人员的支持;成文过程中得到毛景文教授的悉心指导;审稿老师和编辑老师提出了十分宝贵的建议,在此一并表示感谢!

参考文献(Referencs):

- [1] 广东省地质矿产局.广东省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988:811-826.
Bureau of Geology of Guangdong Province. Regional Geology of Guangdong Province, People's Republic of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:811-826(in Chinese).
- [2] 傅良刚, 海涛. 粤西罗定盆地周边成矿地质环境与找矿研究[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(5):25-30.
Fu Lianggang, Hai Tao. The study on metallogenic geological environment and prospecting in the surrounding of Luoding basin, western Guangdong Province[J]. Gold Science & Technology, 2010, 18(5):25-30(in Chinese with English abstract).
- [3] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (10):2595-2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007;23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [4] Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, et al. Hafnium isotope characterization of the GT-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICP-MS [J]. Chemical Geology, 2008, 255: 231-235.
- [5] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5):459-464.
Lu Yuanfa. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33 (5):459-464 (in Chinese with English abstract).
- [6] Le Maitre R.W. The chemical variability of some common igneous rocks[J]. Petrology, 1976, 17(4):589-637.
- [7] 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比研究[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(1):24-29.
Li Tong, Yuan Huaiyu, Wu Shengxi. On the average chemical composition of granitoids in China and the world [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22 (1):24-29 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李家和. 个旧花岗岩特征及成因研究 [J]. 云南地质, 1985, 4(4): 327-352.
Li Jiaye. Study of the origin and characteristics of the granite in Gejiu Sn deposits [J]. Yunnan Geology, 1985, 4 (4):327-352(in Chinese with English abstract).
- [9] 庄永秋, 王任重, 杨树培. 云南个旧锡铜多金属矿床[M]. 北京:地震出版社, 1996:38-101.
Zhuang Yongqiu, Wang Renzhong, Yang Shupe. Gejiu Tin(Cu) Polymetallic Ore Deposits in Yunnan [M]. Beijing:Seismological Press, 1996:38-101(in Chinese).
- [10] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studied [C]//Henderson P, (ed.). Rare Earth Elements Geochemistry. New York:Elsevier, 1984:63-114.
- [11] 赵振华, 增田彰正, Shabani M B. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 1992, (3):221-233.
Zhao Zhenhua, Akimasa Masuda, Shabani M B. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites [J]. Geochimica, 1992, (3):221-233(in Chinese with English abstract).
- [12] 赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应:以水泉沟碱性正长岩为例 [J]. 科学通报, 2010, 55(15):1474-1488.
Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Qiao Yulou. A peculiar composite M - and W -type REE tetrad effect: Evidence from the Shuiquangou alkaline syenite complex, Hebei Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15):1474-1488(in Chinese).
- [13] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts, Implication for mantle composition and processes[J]. Geological Society, Special Publication, 1989, 42:313-345.
- [14] Hong D W, Xie X L, Zhang J S. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny [J]. Resource Geology, 1998, 48:251-263.
- [15] Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountain in NE China[J]. Lithos, 2001, 59: 171-198.
- [16] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China:age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187:143-173.

- [17] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75:135–162.
- [18] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early–Middle Archean crustal evolution deduced from Lu–Hf and U–Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64:4205–4225.
- [19] Vervoort J D, Pachelt P J, Gehrels G E, et al. Constraints on earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379:624–627.
- [20] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钨矿相关花岗岩斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U–Pb 年龄及 Hf 同位素制约 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(1):143–157.
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, et al. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shannxi Province: Constrains from zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic compositions [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29 (1):143–157 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):185–220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):185–220(in Chinese with English abstract).
- [22] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite type [J]. *Pacific Geology*, 1974, 8:173–174.
- [23] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A–type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95:407–419.
- [24] Eby G N. Chemical subdivision of the A–type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20:641–644.
- [25] Eby G N. The A–type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 1990, 26:115–134.
- [26] Landenberger B, Collins W J. Derivation of A–type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1):145–170.
- [27] Bonin B. A–type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 2007, 97:1–29.
- [28] King P L, White A J R, Chappell B W. Characterization and origin of aluminous A type granites of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 36:371–391.
- [29] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因 [J]. *地球化学*, 2000, 29(4):313–319.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi K, et al. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A–type granites in the coastal area of Fujian Province [J]. *Geochimica*, 2000, 29(4):313–319 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U–Pb 年龄和 Hf 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):263–276.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Xie Liewen, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from in situ zircon U–Pb ages and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (2):263–276(in Chinese with English abstract).
- [31] 陈懋弘, 章伟, 杨宗喜, 等. 黔西南白层超基性岩墙锆石 SHRIMP U–Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究 [J]. *矿床地质*, 2009, 28(3):240–250.
- Chen Maohong, Zhang Wei, Yang Zongxi, et al. Zircon SHRIMP U–Pb age and Hf isotopic composition of Baiceng ultrabasic dykes in Zhengfeng Country, southwestern Guizhou Province [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28 (3):240–250 (in Chinese with English abstract).
- [32] 高一鸣, 陈毓川, 王成辉, 等. 亚贵拉—沙让—洞中拉矿集区中新世代岩浆岩 Hf 同位素特征与岩浆源区示踪 [J]. *矿床地质*, 2011, 30(2):279–291.
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Wang Chenghui, et al. Zircon Hf isotopic characteristics and constraints on petrogenesis of Mesozoic–Cenozoic magmatic rocks in Nyainqentanglha region, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(2):279–291 (in Chinese with English abstract).
- [33] Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation [M]. Harlow: Longman Scientific & Technical Limited, 1993:1–352.
- [34] Treuil M and Joron J M. Utilisation des elements hydromagatophiles pour la simplification de la modelisation quantitative des processus magamiques, exemples de l’afar et de la dorsade medioatlantique Soc [J]. *It. Mine.Petro*, 1975, 31:125.
- [35] Allege C J, Treuil M, Minster J F, et al. Systematic use of trace element in igneous process: Part I, fractional crystallization processes in volcanic suites [J]. *Contri. Mineral. & Petrol.*, 1977, 60 (1):57–75.
- [36] Liew T C, Hofmann A W. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of Hereynian fold belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98:129–138.
- [37] 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1999a, 35(6):649–658.
- Chen Jiangfeng, Guo Xincheng, Tang Jiafu, et al. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of southeastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1999, 35(6): 649–658(in Chinese with English abstract).
- [38] 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 湖南千里山花岗岩体的 Nd–Sr 同位素及岩石成因研究 [J]. *矿床地质*, 1995, 14(3):235–241.
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Pei Rongfu. Nd–Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan Province [J]. *Mineral Deposits*, 1995, 14 (3):235–241 (in Chinese with English abstract).
- [39] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J].

- Geological Society of America Bulletin, 1989, 101:635-643.
- [40] 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.
- [41] 高剑锋, 凌洪飞, 沈渭州, 等. 粤西连阳复式岩体的地球化学特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(6):1645-1656.
Gao Jianfeng, Ling Hongfei, Sheng Weizhou, et al. Geochemistry and petrogenesis of Lianyang granite composite, west Guangdong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (6):1645-1656 (in Chinese with English abstract).
- [42] 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 等. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(3):163-173.
Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, et al. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaipei A-type granitic intrusives in south Jiangxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(3):163-173(in Chinese with English abstract).
- [43] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景 [J]. 中国科学 (D 辑), 2002, 32(4): 279-289.
Chen Peirong, Hua Renming, Zhang Bangtong, et al. Early Yanshanian post-orogeme granitoids in the Nanling region petrological constraints and geodynamic setting[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(4): 279-289(in Chinese).
- [44] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征[J]. 科学通报, 1999, 44(18):1992-1998.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, et al. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: petrology and geochemistry [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(18):1992-1998(in Chinese).
- [45] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China[J]. Journal of Asian Earth Science, 2000, 18: 293-305.
- [46] 郭新生, 陈江峰, 张巽, 等. 桂东南富钾岩浆杂岩的 Nd 同位素组成: 华南中生代地幔物质上涌事件[J]. 2001, 岩石学报, 17(1): 19-27.
Guo Xinsheng, Chen Jiangfeng, Zhang Xun, et al. Nd isotopic ratios of K-enriched magmatic complexes from southeastern Guangxi province: Implications for upwelling of the mantle in southeastern China during the Mesozoic[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1):19-27(in Chinese with English abstract).
- [47] 孙涛, 周新民. 中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002, 38(6):737-746.
Sun Tao, Zhou Xinming. Late Mesozoic extension in Southeast China?: petrologic symbols [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2002, 38(6):737-746(in Chinese with English abstract).
- [48] 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 南岭东段中生代强过铝质花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(D 辑). 2003, 33(12):1209-1218.
Sun Tao, Zhou Xinming, Chen Peirong, et al. Strongly peraluminous granites in Mesozoic, Eastern Nanling Range of Southern China: petrogenesis and implications for tectonics [J]. Science in China (Series D), 2003, 33 (12):1209-1218 (in Chinese).
- [49] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4):556-565.
Zhou Xinming. My thinking about granite genesis of South China [J]. Geological Journal of China University, 2003, 9(4):556-565(in Chinese with English abstract).
- [50] Wang Y J, Fan W M, Guo F. Southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Geochemical Journal, 2003, 37:427-448.
- [51] Wang Y J, Fan W M, Peng T P, et al. Elemental and Sr-Nd isotopic systematics of the early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiangxi Province, South China: petrogenesis and tectonic implications [J]. International Journal of Earth Science, 2005, 94: 53-65.
- [52] 谢桂青. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2003: 1-128.
Xie GQ. Late Mesozoic Mafic Dikes (Body) from Southeastern China: Geological and Geochemical Characteristics and Its Geodynamics——A Case of Jiangxi Province[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2003: 1-128 (in Chinese).
- [53] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3):291-304.
Hua Renming, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Metallogenesis and their geodynamic setting related to Mesozoic granitoids in the Nanling range [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11 (3):291-304 (in Chinese with English abstract).
- [54] 王强, 赵振华, 简平, 等. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2005, 21(3):795-802.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, et al. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: constraints for late-Mesozoic tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (3):795-802 (in Chinese with English abstract).
- [55] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 2004, 11(1):45-55.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 45-55(in Chinese with English abstract).
- [56] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属矿成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2329-2338.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale

- tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (10):2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- [57] 李献华. 华南白垩纪岩浆活动与岩石圈伸展-地质年代学与地球化学限制. 见:中国科学院地球化学研究所等编,资源环境与可持续发展[M]. 北京:科学出版社, 1999:264-275.
- Li Xianhua. Cretaceous Magmatism and Lithosphere Extension in South China: The Geochronology and Geochemistry Constraints [C]//Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Resource Environment and Sustaining Development. Beijing: Science Press House, 1999, 264-275(in Chinese).
- [58] Goldfarb R J, Hart C, Davis G, et al. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons[J]. *Economic Geology*, 2007, 102(3):341-345.
- [59] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. *高校地质学报*, 2008, 14:510-526.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14:510-526(in Chinese with English abstract).
- [60] Mao J W, Wang Y T, Li H M, et al. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33:361-381.
- [61] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008a, 72:4607-4626.
- [62] 蔡明海, 占国民, 彭松柏, 等. 云开地区中生代成矿地质背景及成矿动力学机制研究[J]. *矿床地质*, 2002, 21(3):264-269.
- Cai Minghai, Zhan Guoming, Peng Songbai, et al. Study of mesozoic metallogenic geological setting and dynamic mechanism in Yunkai area [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21 (3):264-269 (in Chinese with English abstract).
- [63] 陈炳辉, 黄志国, 俞受鋈, 等. 广东信宜-罗定地区含锡花岗岩类的稀土元素地球化学特征和成因 [J]. *矿产与地质*, 2005, 5 (19):465-468.
- Chen Binghui, Huang Zhiguo, Yu Shoujun, et al. Characteristics of rare earth elements and origin of tin-bearing granites in Xinyi-Luoding area, Guangdong [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2005, 5(19):465-468.

Geochemical features and petrogenesis of the Dajinshan granites in west Guangdong Province

YU Zhang-fa¹, ZHAO Hai-jie², CHEN Mao-hong², LUO Da-lue³, GUO Min³, WANG Zhi-hua¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract: This paper aims at reporting the petrology and the geochemistry of the buried granite stock in Dajinshan area, which is composed mainly of medium to fine grained biotitic granitic rock and porphyritic biotitic granitic rock. These granites are characterized by richness of silica and alkali and depletion of magnesium and calcium. In this study, all samples from Dajinshan are high-K calc-alkaline rocks, which are enriched in Rb, Th, U and depleted in Nb, Eu, Ti in the primitive mantle-normalized spidergrams. The REE values of medium to fine grained biotite granite and porphyritic biotite granite are $203.36 \times 10^{-6} \sim 248.42 \times 10^{-6}$ and $243.76 \times 10^{-6} \sim 255.08 \times 10^{-6}$ respectively. The medium to fine grained biotite granite body is slightly enriched in HREE whereas the porphyritic biotite granite is enriched in LREE. They all show prominent negative Eu anomalies with δEu values being 0.004~0.009 and 0.059~0.13. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and two-stage Hf model ages of medium to fine grained biotite granite and porphyritic biotite granite are -2.05~-8.64, -0.92~-6.57 and 1277~1692Ma, 1204~1556Ma, respectively. Based on regional geological and granite geochemical data, it can be concluded that the Dajinshan granites were derived from the partial melting of the Mesoproterozoic continental crust under a crustal extension geodynamic setting during the Late Yanshanian period.

Key words: geochemistry; Sr-Nd-Pb-Hf isotope; petrogenesis; Dajinshan granite

About the first author: YU Zhang-fa, male, born in 1986, master candidate, majors in mineralogy, petrology and ore geology; E-mail: yuzhangfa188@sina.com.