

高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义*

杨启军 徐义刚 黄小龙 罗震宇

YANG QiJun, XU YiGang, HUANG XiaoLong and LUO ZhenYu

中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-12-20 收稿, 2006-02-24 改回。

Yang QJ, Xu YG, Huang XL and Luo ZY. 2006. Geochronology and geochemistry of granites in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan: Tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4):817-834

Abstract The origin and evolution of the Gaoligong tectonic belt, which is located on the east of eastern Himalaya syntaxis, is pivotal to understanding the genesis of the Gandese Block. For this purpose, studies have been carried out on the granitoids in the Gaoligong area with focus on the field relationship, crystallized ages, mineralogical and geochemical characteristics and their tectonic significance. The Gaoligong pluton complex, bounded by the Nujiang Fault in east and Sagain Fault in west, form an elongated ductile deformation zone. The granites are intensively deformed along the peripheries of the faults but show little deformation in the center. They are mainly composed of biotite monzogranite, biotite granite, two-mica granites. Geochemical analyses suggest that these peraluminous to strongly peraluminous granites were formed by anatexis of precambrian continental crust in a arc to post-collisional setting. The source rocks lie in the middle crust and are heterogeneous including both meta-sediments and meta-basalts. The SHRIMP U-Pb zircon dating indicates that they were emplaced during the early Cretaceous (118 to 126 Ma). The Gaoligong granites share geochemical and chronological similarities with the Gandese granites, suggesting that they represent eastern extension of the Gandese belt. It is proposed that the Gaoligong granites resulted from crustal melting during the southward subduction of the Meso-Tethys oceanic lithosphere underneath the Gandese Block.

Key words Gaoligong tectonic belt, Granite, Genesis, Geochronology, Geochemistry Meso-Tethys, Nujiang Ocean, Collision

摘要 产于高黎贡山脉的花岗岩(简称高黎贡花岗岩)记录中生代以来高黎贡构造带形成、演化的全部过程,高黎贡花岗岩的成因研究对于查明东喜马拉雅构造结的形成和演化乃至整个冈底斯地块的演化过程具有重要意义。高黎贡花岗岩为一套由黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、花岗岩组成的花岗质杂岩体,空间上构成一条南北向分布的挟持于怒江剪切带和龙川江剪切带之间狭长透镜体。地球化学特征研究揭示,高黎贡花岗岩为高钾钙碱性、过铝-强过铝花岗岩,其岩浆来源于中、下地壳前寒武纪变质岩的深熔作用。花岗岩源区成分不均一,以变质硬砂岩为主,并含有变质玄武岩,形成于岛弧-陆陆碰撞环境。SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明,高黎贡花岗岩形成于早白垩世晚期(126-118Ma),其年龄、地球化学特征与拉萨地块北缘花岗岩一致,说明它为冈底斯构造岩带东延部分,是中特提斯怒江洋壳向南俯冲和海洋闭合过程的岩浆响应,而与新特提斯雅鲁藏布江洋的演化无关。

关键词 高黎贡构造带;花岗岩;成因;地球化学;地质年代学;中特提斯;怒江洋;碰撞

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412603)资助。

第一作者简介:杨启军,男,1965年生,博士后,岩石学和构造地质学专业, E-mail: qijunyang@gig.ac.cn

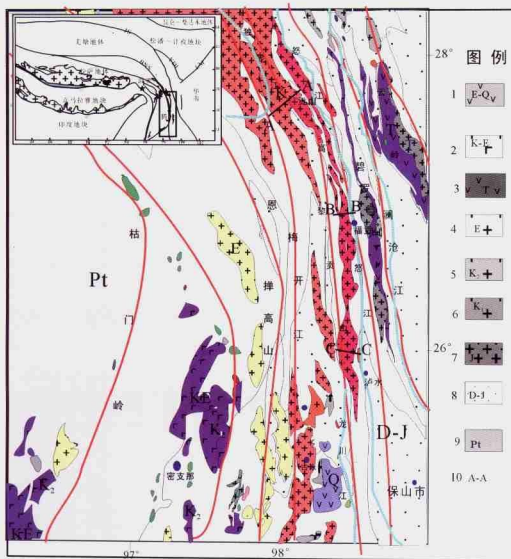


图1 滇西高黎贡地区地质简图及采样位置

1. 第四纪火山岩; 2. 三叠纪火山岩; 3. 白垩纪辉长岩; 4. 新生代花岗岩; 5. 晚白垩纪花岗岩; 6. 早白垩纪花岗岩; 7. 三叠纪花岗岩;
8. 泥盆-侏罗纪碎屑岩、碳酸盐系; 9. 前寒武纪结晶基底; 10. 采样剖面; 11. IYS-印度河-雅鲁藏布江缝合带; 12. BNS-班公湖-怒江缝合带;
13. JS-金沙江缝合带; 14. AKMS-阿尼玛卿-喀喇崑仑-木孜塔格缝合带; 15. JL-嘉黎断裂; 16. LM-龙门山断裂; 17. YDI-义敦岛弧。
A-A; B-B; C-C; 采样剖面位置

Fig. 1. Simplified geologic map of the Gaoligong area and sampling locations

1 前言

冈底斯地块位于雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间,其特殊的大地构造位置及其成矿作用专属性倍受地质学家的重视。由于它位于印度板块与亚洲板块俯冲带的前缘,发育大量与板块碰撞作用有关的火山岩,常被称作“冈底

斯弧”。位于冈底斯地块东侧的高黎贡构造带呈北西—南北—北东向弧形展布,与东西向展布的冈底斯地块在东喜马拉雅构造带相接,东侧以怒江深断裂与扬子地块西缘的昌都-思茅地块相接;西侧以恩梅开江深断裂与印度板块北缘的高喜马拉雅构造带相连(图1a)。由于东喜马拉雅构造带的成因尚有争议,查清高黎贡构造带的演化过程及其与冈底斯地块的关系,对探讨喜马拉雅构造演化的动力学背景尤为重要。



图2 高黎贡花岗岩的野外露头及镜下特征

a-花岗岩糜棱岩的S-C结构,斜长石斑晶旋转体现出右旋变形特征(贡山匹河),体现右行走滑;b-长英质糜棱岩中变形前基性脉体的揉皱,体现右行特征;c-花岗岩初始糜棱岩的镜下特征,新生基黑云母定向排列,长石、石英细粒化,动态重结晶;d-糜棱岩化花岗岩的镜下显微变形特征,石英具有拔丝构造,形成显微变形带

Fig.2 Structural and fabric characteristics of the Gaoligong granites

近年来的研究成果表明,产于高黎贡构造带中的花岗岩及火山岩属于冈底斯-腾冲火成岩带的东段。冈底斯火成岩带既是新特提斯雅鲁藏布江洋的岛弧(莫宣学,2003),也同样含有中特提斯怒江洋的岛弧型火成岩(潘柱荣等,2004),而且在冈底斯火成岩带东侧高黎贡地区,由印度板块与亚洲板块碰撞挤压所引起的拉萨地块顺时针旋转,造成怒江断裂的右旋走滑,在高黎贡花岗岩中都具有变形记录(Lee *et al.*, 2003)。因此,在特提斯演化过程中,高黎贡构造带可能经历了怒江中特提斯闭合碰撞、喜马拉雅新特提斯闭合碰撞的全部过程。研究高黎贡构造带中、新生代花岗岩,对于建立青藏高原完整的火成岩时空框架是不可缺少的,同时可以查明高黎贡地区中、新生代含锡花岗岩成矿作用的地质背景,指导找矿。本文报道了高黎贡构造带花岗岩的地球化学特征和 SHRIMP 定年结果,通过岩石成因分析揭示三江地区特提斯演化的岩浆响应,为藏东及三江地区地质演化的动力学过程提供约束。

2 区域地质背景

研究区位于高黎贡构造带中南部地区,主要由变形的前寒武纪变质基底、晚古生代碎屑岩—碳酸盐岩、中生代花

岗岩、沿着怒江分布的中新生代基性侵入岩和火山岩四部分组成(图1b)。东侧以怒江深断裂为界,与兰坪-思茅地块相连,西侧以龙川江断裂为界与腾冲-梁河地块相接。花岗岩早南北向展布,向北延伸到波密-察隅一带之后,向NW—W弧状延伸,属于著名的东喜马拉雅构造构造大转弯的物质组成。由于花岗岩沿着怒江西岸的高黎贡山产出,简称高黎贡花岗岩,出露面积大约8000km²。

高黎贡花岗岩的直接围岩为前寒武纪崇山群和高黎贡群变质岩,岩体的中部为块状构造,东西两侧产生糜棱岩化,构成挟持于怒江走滑深断裂带和龙川江走滑断裂带之间的一个狭长透镜体,体现明显的同构造侵位特征。

怒江走滑深断裂中发育大量糜棱岩和糜棱岩化岩石,宏观变形标志丰富,不对称褶皱,不对称眼球,线理构造,S-C等都指示怒江深断裂最新一期变形为右行平移剪切(图2a, b),与高黎贡花岗岩内部产生的局部韧性剪切带指示的平移方向是一致的,这也和整个高黎贡-腾冲-梁河构造构造线呈弧形展布所体现的宏观右旋特征是一致的。

3 岩相学特征

高黎贡花岗岩的岩石类型主要是黑云母二长花岗岩、二

云母二长花岗岩、少量伟晶花岗岩。矿物组成比较单一,主要矿物组合为钾长石(40%) + 斜长石(30%) + 石英(20% ~ 30%) + 黑云母(2% ~ 3%) ± 白云母 ± 绿泥石 ± 磷灰石 ± 角闪石,钾长石主要为微斜长石、正长石、条纹长石等,缺少高温、高压矿物和堇青石、蓝晶石等特征富铝矿物。除糜棱岩化岩石由于变形过程中暗色基质矿物增多外,其他岩石暗色矿物一般为2% ~ 3%,属于浅色花岗岩类。靠近岩体边部,花岗岩产生糜棱岩化,转变为糜棱岩化花岗岩、花岗质糜棱岩,有的遭受脆性剪切转变为花岗质片岩。岩石具有块状构造、麻状构造、眼球状构造、条带状构造等,结构类型包括似斑状结构、粒状结构、糜棱结构等。矿物变形特征明显,石英具有拔丝组构,正长石、斜长石具有核幔结构,长石石英共同组成流动构造,新生的基质黑云母沿着糜棱理分布,残斑黑云母透镜化,形成云母鱼等(图2c, d),显示出明显的韧性变形特征。

花岗岩都含有丰富的暗色包体,包体成分复杂,有闪长质、花岗闪长质等,结构有中细粒和细粒两种,其中以细粒为主,闪长质包体矿物组成为黑云母(20%) + 角闪石(50%) + 斜长石(30%);花岗闪长质包体的矿物组成为黑云母(10%) + 角闪石(5%) + 斜长石(50%) + 正长石(35%)。包体与花岗岩的界线清楚,没有烘烤边,在界线附近,常常可以看到靠花岗岩一侧大颗粒角闪石自形晶生长。这些包体的成因及其与花岗岩的关系还有待进一步研究。

4 地球化学特征

4.1 岩品采集及分析方法

本次分析的样品全部为高黎贡花岗岩,从北到南采自贡山—独龙江、福贡亚目河、丹珠口岸、泸水一片马四条剖面,这四条剖面近于东西向剖面横穿近于南北向的高黎贡花岗岩岩体(图1)。主、微量元素含量和 Sr, Nd 同位素的分析测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。主量元素分析是在 X 射线荧光光谱分析(XRF)上完成,微量元素的分析则在 PE Elan 6000 型电感耦合 11 合等离子体质谱(ICP-MS)完成。Sr, Nd 同位素分析的样品测定在 MicroMass Isoprobe 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS)上完成。测试方法详见梁细荣等(2003)。

4.2 常量元素组成

高黎贡花岗岩 SiO₂ 为 59.8% ~ 77.4%, 平均为 70.38%; Al₂O₃ 为 12.8% ~ 17.82%, 平均 14.78%; (K₂O + Na₂O) 为 6.2% ~ 8.5%; (K₂O/Na₂O) > 1(表1), 表现为高钾钙碱性特征(图3a, b)。根据常量元素化学成分计算的标准矿物进行岩石分类, 花岗岩类型主要为二长花岗岩、花岗岩, 少量为花岗闪长岩, 与薄片镜下鉴定结果一致。铝饱和指数 A/CNK [Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 的摩尔比值] 的

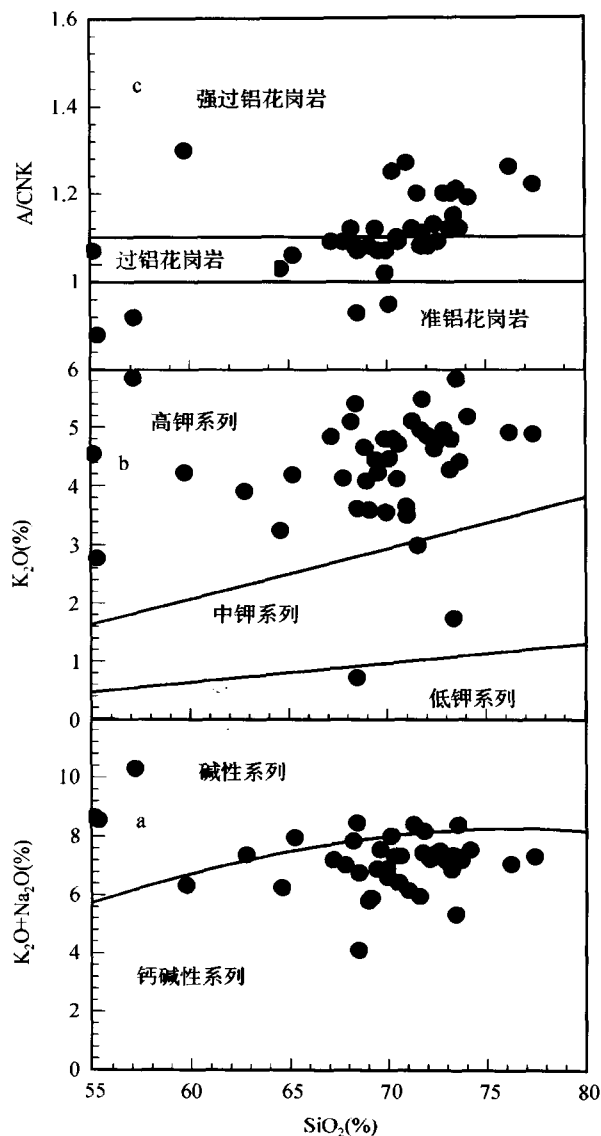


图3 高黎贡花岗岩 SiO₂ - A/CNK, K₂O, K₂O + Na₂O 图解
Fig. 3 Variations of A/CNK, K₂O, K₂O + Na₂O vs. SiO₂

为 0.93 ~ 1.30, 平均 1.12, 大部分大于 1, 半数以上大于 1.1 (图3c)。标准矿物计算结果中, 大多数样品含有标准刚玉分子(1% ~ 3%), 表明高黎贡花岗岩为高钾钙碱性过铝-强过铝。

常量与微量元素之间的含量关系, SiO₂ 与 TiO₂、Fe₂O₃^T、MgO、Al₂O₃、CaO、Sr、Ba、Eu 呈负相关, 而与 K₂O 和 Rb 大致呈正相关(图4)。良好的线性关系说明高黎贡花岗岩具有相似的成因和演化趋势。由于 Al、Ca、Eu、Sr、Ba 等元素主要赋存在斜长石中, TiO₂、Fe₂O₃ 主要在 Ti-Fe 氧化物中, 因此高黎贡花岗岩所展示的成分变化可能与斜长石和 Ti-Fe 氧化物的分离结晶有关。K₂O 和 Rb 含量随分异程度的增强而升高, 因此碱性长石的分离结晶的可能性不大。

表1 高黎贡花岗岩的主量元素(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 1 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) analyses of granites in Gaoligong Area

样号	GLS-1	GLS-2	GLS-4	GLS-7	GLS-8	GLS-9	GLS-10	GLS-11	GLS-12	GLS-13
SiO ₂	73.68	68.48	70.11	69.90	68.50	73.19	77.40	70.99	73.39	71.55
TiO ₂	0.24	0.60	0.34	0.44	0.43	0.27	0.06	0.33	0.26	0.27
Al ₂ O ₃	13.87	14.80	14.70	13.75	15.41	13.63	12.80	14.91	14.90	14.99
Fe ₂ O ₃	0.63	1.47	1.07	1.27	1.22	0.84	0.43	1.02	0.83	0.82
FeO	1.26	2.94	2.14	2.54	2.45	1.68	0.85	2.05	1.67	1.64
MnO	0.02	0.08	0.13	0.06	0.07	0.05	0.01	0.07	0.03	0.03
MgO	0.41	1.57	0.77	1.64	1.08	0.62	0.02	0.78	0.62	0.63
CaO	1.63	5.29	2.59	2.67	2.90	1.78	0.63	1.94	2.83	2.40
Na ₂ O	2.80	3.39	3.57	2.11	3.16	2.62	2.45	2.66	3.60	2.98
K ₂ O	4.40	0.71	4.46	4.80	3.61	4.27	4.88	3.50	1.74	2.99
P ₂ O ₅	0.10	0.15	0.10	0.07	0.12	0.07	0.02	0.10	0.08	0.08
总量	99.46	100.09	100.35	99.65	99.82	99.65	99.93	99.64	100.21	99.31
A/CNK	1.12	0.93	0.95	1.02	1.07	1.12	1.22	1.27	1.15	1.20
Cr	12.97	21.30	11.97	67.37	15.77	11.72	8.34	15.58	14.75	10.40
Mn	243.10	629.10	1080.80	469.70	564.10	402.70	135.10	503.20	278.80	327.20
Co	3.57	10.71	5.46	9.94	7.17	5.26	1.04	4.94	4.47	4.46
Ni	5.37	12.84	8.06	24.03	8.05	7.50	3.43	8.80	6.71	6.57
Ga	12.10	16.78	17.96	16.74	17.96	15.08	14.29	16.71	16.41	15.59
Rb	128.90	22.96	245.10	255.30	192.90	226.10	216.30	192.10	94.42	142.70
Sr	212.70	348.60	234.20	154.30	251.20	175.70	51.29	196.00	327.60	308.00
Zr	108.60	175.40	146.70	142.30	163.10	117.10	65.72	159.20	137.20	139.90
Nb	10.37	17.21	15.67	16.64	17.39	15.71	15.88	16.12	19.53	7.18
Ba	704.30	145.50	550.40	329.80	344.10	291.90	54.41	383.10	398.40	578.50
Hf	2.74	4.07	3.68	3.77	4.44	3.48	3.93	4.05	3.28	3.44
Ta	0.66	1.32	1.20	1.49	1.45	1.48	1.05	1.40	1.62	0.50
Th	16.05	17.42	20.51	29.72	21.14	24.18	31.03	22.38	9.72	15.93
U	3.98	3.55	4.03	4.21	6.83	4.90	6.24	3.96	2.72	3.52
La	12.53	35.83	37.83	51.02	24.95	21.18	12.19	30.08	20.08	22.47
Ce	23.08	68.68	70.97	99.28	49.13	41.32	26.63	54.84	33.91	37.39
Pr	2.64	8.02	8.17	11.15	5.80	4.89	3.19	6.31	3.54	4.02
Nd	9.37	29.03	28.11	37.32	21.43	17.21	10.92	20.96	11.92	13.21
Sm	1.79	5.35	4.85	6.56	4.22	3.33	2.18	3.93	1.92	2.01
Eu	0.66	1.15	0.95	0.74	0.92	0.69	0.28	0.80	0.53	0.56
Gd	1.92	4.87	4.20	5.79	4.10	3.03	1.57	3.53	1.61	1.51
Tb	0.29	0.75	0.68	0.88	0.63	0.50	0.28	0.57	0.27	0.26
Dy	1.84	4.46	3.93	5.17	3.84	3.16	1.91	3.34	1.37	1.38
Ho	0.39	0.92	0.81	1.05	0.82	0.68	0.45	0.71	0.28	0.27
Er	1.07	2.42	2.18	2.83	2.25	1.95	1.48	1.98	0.71	0.77
Tm	0.17	0.37	0.32	0.40	0.34	0.32	0.26	0.32	0.10	0.12
Yb	1.21	2.56	2.48	2.77	2.58	2.47	2.12	2.29	0.73	0.90
Lu	0.20	0.38	0.37	0.40	0.40	0.42	0.43	0.38	0.12	0.14
Y	11.87	26.66	23.70	30.53	23.05	20.47	12.56	20.17	7.62	7.72
Sr/Ba	0.30	2.40	0.43	0.47	0.73	0.60	0.94	0.51	0.82	0.53
Rb/Ba	0.18	0.16	0.45	0.77	0.56	0.77	3.98	0.50	0.24	0.25
Th/U	4.03	4.91	5.09	7.07	3.10	4.94	4.98	5.66	3.57	4.53
Rb/Sr	0.61	0.07	1.05	1.65	0.77	1.29	4.22	0.98	0.29	0.46
REE	69.03	191.45	189.54	255.90	144.45	121.61	76.45	150.20	84.71	92.73
Eu/Eu*	1.08	0.67	0.63	0.36	0.67	0.64	0.44	0.64	0.90	0.95
(La/Yb) _N	7.02	9.52	10.37	12.50	6.58	5.82	3.91	8.92	18.74	16.89

续表 1

Continued table 1

样号	GLS-15	GLS-17	GLS-19	GLS-20	GLS-35	GLS-36	GLS-37	GLS-38	GLS-39
SiO ₂	64.58	69.95	69.55	72.58	67.80	72.08	70.51	67.18	69.41
TiO ₂	0.70	0.39	0.36	0.33	0.29	0.19	0.25	0.25	0.26
Al ₂ O ₃	16.42	14.70	15.04	13.53	16.01	14.04	14.37	14.95	15.32
Fe ₂ O ₃	1.77	1.24	1.09	0.92	1.14	0.79	0.86	0.88	1.09
FeO	3.55	2.48	2.18	1.84	2.29	1.59	1.73	1.76	2.18
MnO	0.08	0.08	0.09	0.05	0.08	0.05	0.07	0.07	0.07
MgO	1.83	0.96	0.92	0.81	1.36	0.86	1.16	1.14	1.22
CaO	4.10	2.64	2.18	1.46	2.97	2.10	2.63	2.47	2.66
Na ₂ O	3.01	3.07	3.34	2.75	2.91	2.39	2.34	2.38	2.45
K ₂ O	3.24	3.55	4.22	4.78	4.13	4.85	4.11	4.84	4.44
P ₂ O ₅	0.20	0.13	0.10	0.09	0.11	0.07	0.09	0.07	0.07
总量	99.98	99.79	99.49	99.52	99.72	99.31	99.81	99.47	99.64
A/CNK	1.03	1.07	1.07	1.09	1.09	1.08	1.10	1.09	1.12
Cr	20.82	12.54	13.13	9.00	42.32	26.59	30.29	27.27	37.26
Mn	648.60	605.10	696.20	420.70	605.00	433.00	535.90	512.60	581.30
Co	10.99	5.84	6.14	5.18	7.35	5.64	6.15	4.73	5.44
Ni	10.78	6.00	9.64	5.64	16.96	12.11	14.06	12.16	13.62
Ga	19.83	17.99	16.47	12.95	17.98	14.25	16.18	17.68	16.39
Rb	154.80	170.10	258.20	188.40	213.20	189.70	181.90	226.30	212.40
Sr	350.60	265.50	243.40	189.60	364.70	286.30	315.40	285.70	333.30
Zr	237.70	179.50	146.00	144.10	164.00	108.20	121.60	145.80	127.60
Nb	15.57	19.26	14.13	13.88	21.90	11.48	14.78	22.28	15.19
Ba	811.50	487.20	493.50	532.10	842.10	553.20	584.90	552.00	669.70
Hf	5.82	4.55	4.05	3.96	4.28	3.11	3.51	4.13	3.73
Ta	0.85	1.23	1.23	1.36	1.80	1.30	1.33	1.45	1.34
Th	17.89	29.17	24.20	24.50	15.43	14.63	13.81	23.87	16.68
U	2.67	2.83	3.74	3.77	3.80	3.02	3.97	5.29	3.75
La	49.62	45.79	33.98	30.13	32.47	24.13	31.00	36.00	29.00
Ce	90.28	85.72	63.97	58.20	59.54	45.33	57.94	65.22	55.52
Pr	10.27	9.79	7.32	6.84	6.87	5.34	6.61	7.42	6.44
Nd	35.39	33.45	24.91	23.42	23.53	18.19	22.70	25.09	22.49
Sm	5.90	6.38	4.22	4.06	3.99	2.94	3.65	3.97	3.79
Eu	1.33	1.20	0.92	0.90	0.82	0.69	0.74	0.80	0.79
Gd	5.26	6.34	3.54	3.72	3.59	2.35	2.81	3.02	3.13
Tb	0.80	1.03	0.57	0.60	0.54	0.40	0.46	0.53	0.49
Dy	4.49	5.96	3.33	3.59	3.28	2.35	2.74	3.04	2.94
Ho	0.91	1.16	0.70	0.72	0.67	0.50	0.58	0.61	0.62
Er	2.38	2.87	1.96	1.97	1.87	1.34	1.54	1.74	1.72
Tm	0.35	0.36	0.31	0.29	0.28	0.21	0.25	0.27	0.27
Yb	2.34	2.32	2.22	2.10	2.11	1.53	1.82	2.06	1.98
Lu	0.36	0.32	0.37	0.31	0.32	0.24	0.30	0.32	0.30
Y	23.28	29.19	20.51	19.45	18.32	12.91	15.76	16.93	17.20
Sr/Ba	0.43	0.54	0.49	0.36	0.43	0.52	0.54	0.52	0.50
Rb/Ba	0.19	0.35	0.52	0.35	0.25	0.34	0.31	0.41	0.32
Th/U	6.70	10.31	6.48	6.51	4.06	4.84	3.48	4.51	4.45
Rb/Sr	0.44	0.64	1.06	0.99	0.58	0.66	0.58	0.79	0.64
REE	232.96	231.88	168.83	156.30	158.19	118.43	148.90	167.01	146.67
Eu/Eu*	0.71	0.57	0.71	0.69	0.65	0.77	0.68	0.68	0.68
(La/Yb) _N	14.38	13.43	10.41	9.74	10.44	10.73	11.56	11.87	9.95

续表 1

Continued Table 1

样号	GLS-45	GLS-46	GLS-47	GLS-48	GLS-49	GLS-50	GLS-51	GLS-52	GLS-53
SiO ₂	68.41	74.11	70.59	59.75	70.29	68.19	65.23	72.39	71.28
TiO ₂	0.37	0.28	0.33	0.89	0.42	0.44	0.62	0.37	0.23
Al ₂ O ₃	15.84	13.33	14.10	17.82	15.48	15.58	16.91	14.10	15.17
Fe ₂ O ₃	1.06	0.88	1.10	1.96	1.08	1.26	1.46	0.95	0.79
FeO	2.12	1.76	2.21	3.93	2.16	2.52	2.93	1.90	1.58
MnO	0.04	0.04	0.05	0.08	0.04	0.05	0.07	0.04	0.05
MgO	0.64	0.33	0.59	1.34	0.51	0.73	0.95	0.51	0.42
CaO	2.06	0.94	1.90	3.08	1.63	2.08	2.86	1.56	1.39
Na ₂ O	3.08	2.39	2.63	2.11	2.55	2.78	3.79	2.81	3.32
K ₂ O	5.40	5.17	4.71	4.22	4.80	5.09	4.18	4.63	5.10
P ₂ O ₅	0.18	0.08	0.12	0.30	0.12	0.17	0.23	0.11	0.07
总量	99.36	99.64	99.46	99.81	99.64	99.38	99.79	99.90	99.79
A/CNK	1.08	1.19	1.09	1.30	1.25	1.12	1.06	1.13	1.12
Cr	8.14	10.02	6.53	9.70	4.39	11.96	7.20	9.16	9.90
Mn	316.20	351.40	379.60	649.40	330.80	392.80	553.40	379.50	421.20
Co	3.34	2.49	2.95	8.68	3.46	4.15	7.09	4.12	2.93
Ni	6.26	4.64	4.74	7.22	3.28	8.31	6.06	4.18	5.65
Ga	20.59	17.22	19.03	25.69	18.11	20.21	20.03	17.64	18.13
Rb	262.40	343.50	237.30	313.00	219.20	220.80	164.50	213.70	300.10
Sr	128.40	71.62	168.40	193.90	185.70	206.20	275.70	165.70	146.20
Zr	254.40	194.60	287.80	443.30	251.40	277.80	378.50	203.10	169.20
Nb	25.81	27.22	26.72	30.15	21.69	22.31	27.87	22.56	18.98
Ba	388.70	253.00	442.90	972.90	614.80	815.30	698.20	352.90	344.10
Hf	7.09	5.79	7.05	10.39	6.56	7.36	9.03	5.73	5.20
Ta	2.37	3.07	2.60	1.75	1.45	1.27	1.65	1.92	1.36
Th	38.32	42.11	31.18	16.79	26.69	21.25	19.26	26.19	47.97
U	2.02	5.78	5.79	2.10	3.50	2.61	3.10	5.40	8.68
La	53.63	57.48	62.48	78.66	65.55	50.84	58.70	48.62	52.48
Ce	109.20	116.20	126.60	148.70	129.20	98.62	109.40	97.24	106.10
Pr	12.66	13.91	15.00	17.47	15.81	11.46	12.87	11.72	12.69
Nd	44.24	47.84	53.86	62.10	54.57	40.07	44.33	41.13	45.07
Sm	8.30	8.90	9.51	10.06	9.36	7.24	7.51	7.37	8.42
Eu	1.12	0.73	1.29	2.27	1.52	1.44	1.66	1.06	0.94
Gd	6.36	7.55	8.06	8.12	7.61	5.72	6.24	5.81	7.02
Tb	0.98	1.26	1.29	1.18	1.19	0.89	1.04	0.95	1.16
Dy	5.45	7.33	7.29	6.37	6.59	5.00	5.69	5.43	6.54
Ho	0.99	1.43	1.41	1.22	1.22	0.98	1.11	1.08	1.28
Er	2.52	3.78	3.67	3.14	3.19	2.54	2.92	2.78	3.37
Tm	0.31	0.59	0.52	0.42	0.46	0.35	0.42	0.38	0.52
Yb	2.05	3.93	3.54	2.86	2.90	2.28	2.85	2.57	3.48
Lu	0.32	0.60	0.53	0.41	0.42	0.35	0.45	0.40	0.52
Y	23.83	38.27	36.12	31.17	32.65	25.00	27.94	26.62	33.44
Sr/Ba	0.33	0.28	0.38	0.20	0.30	0.25	0.39	0.47	0.42
Rb/Ba	0.68	1.36	0.54	0.32	0.36	0.27	0.24	0.61	0.87
Th/U	18.94	7.29	5.39	7.99	7.62	8.15	6.21	4.85	5.53
Rb/Sr	2.04	4.80	1.41	1.61	1.18	1.07	0.60	1.29	2.05
REE	271.97	309.80	331.17	374.14	332.25	252.77	283.12	253.16	283.03
Eu/Eu*	0.45	0.26	0.44	0.74	0.53	0.66	0.72	0.48	0.36
(La/Yb) _N	17.78	9.93	11.99	18.69	15.36	15.13	13.98	12.84	10.25

续表 1

Continued table 1

样号	GLS-54	GLS-55	GLS-56	GLS-58	GLS-60	GLS-61	GLS-62	GLS-72
SiO ₂	73.26	72.89	71.72	62.78	73.53	76.20	71.78	68.96
TiO ₂	0.24	0.25	0.31	0.85	0.15	0.18	0.31	0.60
Al ₂ O ₃	13.99	13.76	13.82	17.51	14.33	13.18	14.36	15.64
Fe ₂ O ₃	0.88	0.94	1.03	2.00	0.57	0.65	0.90	1.79
FeO	1.77	1.88	2.06	4.01	1.13	1.30	1.80	3.59
MnO	0.05	0.04	0.06	0.08	0.02	0.04	0.05	0.08
MgO	0.55	0.79	0.69	1.68	0.21	0.17	0.43	1.48
CaO	1.21	1.34	1.80	4.05	0.69	0.85	1.35	0.91
Na ₂ O	2.59	2.26	2.51	3.47	2.59	2.18	2.73	1.72
K ₂ O	4.79	4.95	4.95	3.90	5.82	4.90	5.47	4.08
P ₂ O ₅	0.08	0.10	0.10	0.36	0.17	0.02	0.08	0.28
总量	100.02	99.55	99.49	99.77	99.84	99.79	99.65	100.07
A/CNK	1.20	1.20	1.08	1.01	1.21	1.26	1.11	1.75
Cr	14.06	9.27	22.25	15.31	3.39	7.12	8.69	36.35
Mn	391.30	423.00	324.80	613.40	227.50	313.80	453.40	621.50
Co	4.03	3.32	4.05	9.24	1.15	1.15	3.69	10.68
Ni	9.17	5.63	10.25	7.73	2.53	3.02	7.53	32.46
Ga	16.76	15.85	18.79	21.75	17.04	15.62	17.72	29.13
Rb	250.00	224.20	284.20	172.50	423.00	346.30	294.70	366.70
Sr	148.30	150.30	122.10	341.20	58.51	77.90	144.40	86.85
Zr	152.80	202.60	155.40	407.50	100.50	172.20	225.90	146.60
Nb	25.81	14.69	18.08	26.00	24.49	30.28	19.05	40.35
Ba	366.10	378.90	403.90	987.10	201.30	309.20	526.70	392.40
Hf	4.79	5.70	4.92	9.56	3.49	5.59	6.09	4.52
Ta	2.15	1.11	1.30	1.67	2.01	2.77	1.57	3.74
Th	39.15	32.47	28.23	18.59	28.04	40.19	32.39	11.75
U	8.85	3.27	8.41	2.56	5.94	9.39	3.77	6.05
La	48.73	57.81	47.99	76.95	31.83	54.34	69.65	29.21
Ce	96.28	113.80	95.54	142.40	66.99	103.90	130.30	59.48
Pr	11.34	12.85	10.67	15.22	8.15	11.84	13.98	7.51
Nd	39.92	43.91	36.34	53.07	29.36	38.69	45.24	27.89
Sm	7.62	7.53	6.64	8.68	6.32	6.70	7.23	5.53
Eu	0.91	0.98	0.94	1.75	0.59	0.64	0.98	0.67
Gd	7.24	5.26	5.24	6.87	5.58	5.62	4.50	5.16
Tb	1.27	0.79	0.83	1.03	0.85	0.97	0.78	0.87
Dy	7.93	4.52	4.63	6.00	4.15	5.91	4.51	4.77
Ho	1.66	0.85	0.82	1.14	0.68	1.23	0.90	0.89
Er	4.53	2.25	2.13	3.14	1.62	3.50	2.41	2.11
Tm	0.65	0.32	0.31	0.42	0.22	0.54	0.33	0.30
Yb	4.26	2.13	1.92	2.66	1.39	3.99	2.42	1.89
Lu	0.63	0.35	0.30	0.42	0.18	0.59	0.39	0.27
Y	44.23	21.18	21.27	28.42	18.23	33.47	22.51	22.26
Sr/Ba	0.41	0.40	0.30	0.35	0.29	0.25	0.27	0.22
Rb/Ba	0.68	0.59	0.70	0.17	2.10	1.12	0.56	0.93
Th/U	4.43	9.92	3.36	7.26	4.72	4.28	8.60	1.94
Rb/Sr	1.69	1.49	2.33	0.51	7.23	4.45	2.04	4.22
REE	277.17	274.53	235.56	348.17	176.13	271.92	306.12	168.78
Eu/Eu*	0.37	0.45	0.47	0.67	0.30	0.31	0.49	0.37
(La/Yb) _N	7.78	18.45	16.98	19.63	15.56	9.24	19.58	10.51

表2 高黎贡花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotopic composition for Gaoligong granites

样品号	年龄(Ga)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
GLS-9	0.1250	3.33	17.21	0.1170	0.512263	0.000014	0.512166989	-6.1	1.40	226.10	175.70	3.7273	0.718635	0.000013	0.712013	109
GLS-10	0.1250	2.18	10.92	0.1206	0.512291	0.000011	0.512192385	-5.6	1.41	216.30	51.29	12.2366	0.736816	0.000016	0.715077	152
GLS-11	0.1250	3.93	20.96	0.1132	0.512282	0.000011	0.512189551	-5.6	1.32	192.10	196.00	2.8374	0.713392	0.000016	0.708351	57
GLS-12	0.1250	1.92	11.92	0.0973	0.512712	0.000012	0.512632874	3.0	0.58	94.42	327.60	0.8339	0.707685	0.000014	0.706204	26
GLS-38	0.1250	3.97	25.09	0.0956	0.512131	0.000009	0.512053219	-8.3	1.32	226.30	285.70	2.2936	0.715630	0.000016	0.711555	102
GLS-39	0.1250	3.79	22.49	0.1019	0.512151	0.000009	0.512067661	-8.0	1.36	212.40	333.30	1.8452	0.715206	0.000017	0.711928	108
GLS-46	0.1250	8.90	47.84	0.1125	0.512253	0.000010	0.512160746	-6.2	1.35	343.50	71.62	13.9139	0.734906	0.000018	0.710187	83
GLS-52	0.1250	7.37	41.13	0.1084	0.512286	0.000012	0.512197632	-5.5	1.25	213.70	165.70	3.7355	0.718789	0.000013	0.712152	111
GLS-53	0.1250	8.42	45.07	0.1130	0.512222	0.000011	0.512129951	-6.8	1.40	300.10	146.20	5.9457	0.719027	0.000014	0.708464	58
GLS-54	0.1250	7.62	39.92	0.1153	0.512303	0.000011	0.512208654	-5.2	1.31	250.00	148.30	4.8848	0.722937	0.000016	0.714258	141
GLS-55	0.1250	6.64	36.34	0.1105	0.511966	0.000010	0.511875222	-11.7	1.75	284.20	122.10	6.7496	0.730585	0.000016	0.718594	202
Pch	1.2000	6.93	40.27	0.1040	0.512322	0.000008	0.511502042	8.1	1.15	197.90	367.30	1.5597	0.712976	0.000016	0.686171	-241

4.3 微量元素组成

高黎贡花岗岩的高场强元素含量相当于原始地幔的 10 倍, 低于典型 A 型花岗岩, 高于典型 I 型花岗岩, 与 S 型花岗岩接近。Th/U 比值为 0.3.1 ~ 19, 大多为 5 左右, 与地壳平均值和普通花岗岩一样, 远低于 A 型花岗岩、碱性岩 (Войткевич, 1970)。Sr/Ba 值为 0.2 ~ 2.4, 大多数小于 0.5。典型的藏南 I 型花岗岩相对富集 Sr, Sr/Ba 比值一般大于 0.5, S 型花岗岩相对富集 Ba, Sr/Ba 的比值小于 0.5 (刘振声等, 1994)。因此, 微量元素组成指示高黎贡花岗岩具有藏南 S 型花岗岩特征, 与主量元素组成给出的信息一致。

高黎贡花岗岩稀土元素总量为 $70 \times 10^{-6} \sim 374 \times 10^{-6}$, 大多数大于 150×10^{-6} , 具有明显的轻稀土富集, 重稀土亏损的特征, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 3.9 ~ 19.6, 球粒陨石标准化模式显示明显的负斜异常特征 (图 5a)。稀土元素的总体特征与冈底斯中生代 S 型黑云母花岗岩相似 (刘振声, 1994)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, Ce 以及左侧不相容性更强的元素强烈富集, 达到原始地幔丰度 10 ~ 100 倍, Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素具有明显的负异常, 而 Rb、La、Nd、Y、K 等大离子亲石元素具有明显的正异常 (图 5b)。Eu/Eu* 为 0.26 ~ 1.08, 平均 0.64, Sr、Ba 呈明显负异常, 表明花岗岩岩浆部分熔融或结晶分异过程中具有斜长石的分离。

4.4 Nd-Sr 同位素组成

高黎贡花岗岩的 Nd-Sr 同位素组成比较一致, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始值为 0.7062 ~ 0.7186, 多数大于 0.708, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 集中在 +26 ~ +202。0.5121 ~ 0.5122, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -5.7 ~ -12.3, Nd 同位素亏损地幔模式年龄集中在 1.3 ~ 1.4Ga, 这些特征体现花岗岩的壳源成因, 源岩具有较长的地壳存留时间。样品 GLS-12 的同位素组成接近原始地幔值, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始值为 0.7062, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的初始值为 0.51266, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 为较小的正值 (+26.36), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 也表现为 (+2.4) 正值, 在 $\epsilon_{\text{Sr}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图上处于第一象限 (图 6)。从野外产出看, 该样品采

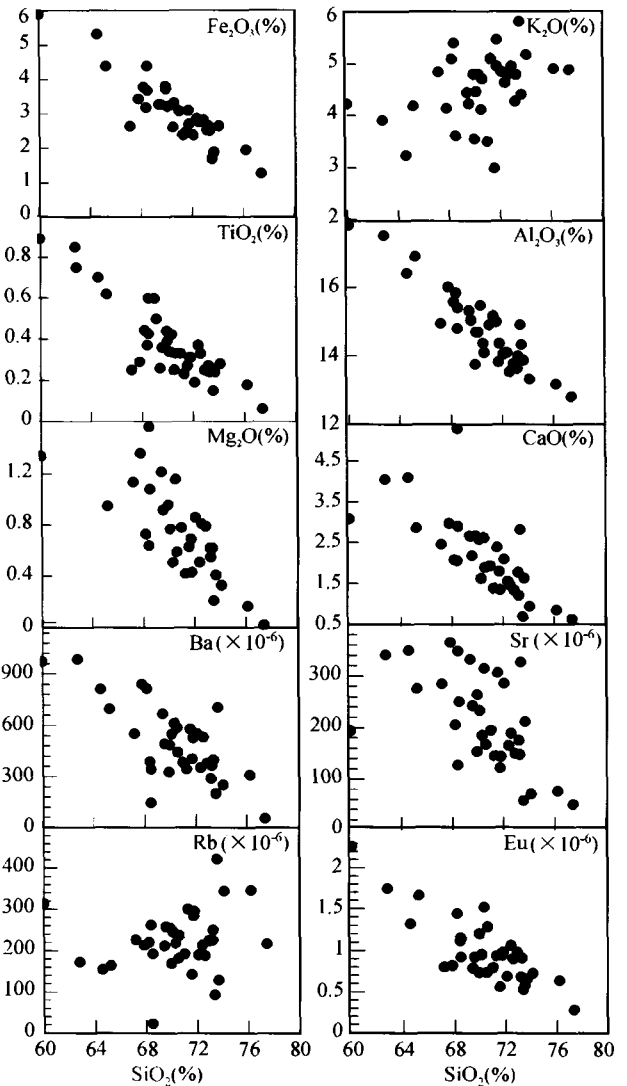


图4 高黎贡花岗岩主量元素、微量元素的 Hark 图解
Fig. 4 Variations of major and trace element with SiO_2 for the Gaoligong granites

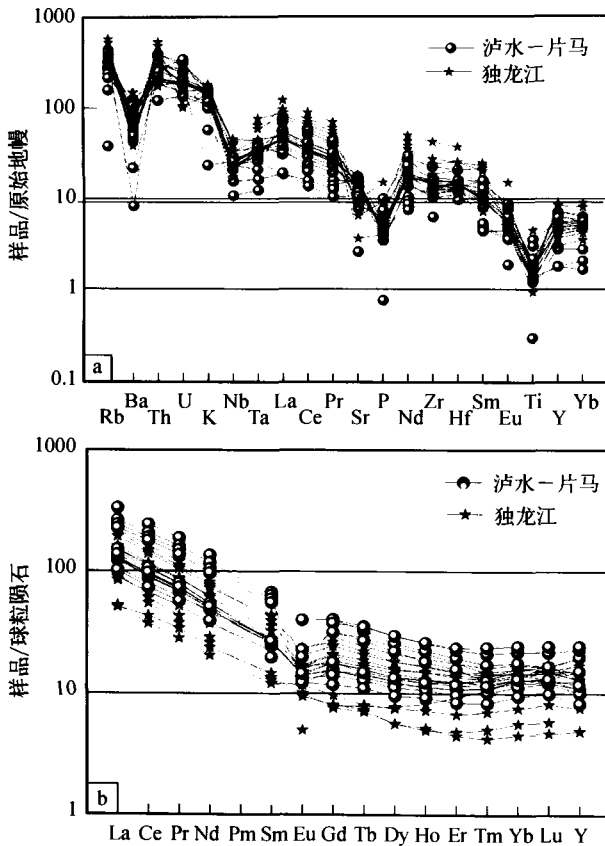


图5 高黎贡花岗岩稀土和微量元素成分特征(标准化数据据 Sun and McDonough, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Gaoligong granites

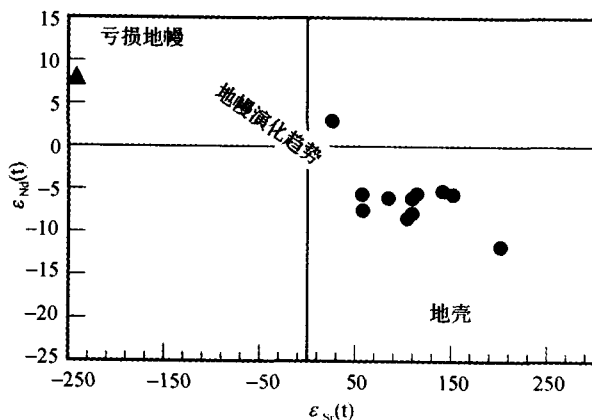


图6 高黎贡花岗岩 $\epsilon_{Sr}(t) - \epsilon_{Nd}(t)$ 图解

Fig. 6 $\epsilon_{Sr}(t)$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ diagram for Gaoligong granites

集剖面基性脉体发育,花岗岩中有些黑云母特别集中的团块,可能具有幔源岩浆的混合作用。从野外为了查清属于前寒武纪变质基底的崇山群与高黎贡花岗岩的关系,还分析了

崇山群灰色片麻岩(Ptch),结果显示其Nd-Sr同位素组成具有幔源特征(表2)。两者在同位素组成上的差别,表明高黎贡花岗岩不是起源于该区域出露的前寒武纪基底。

高黎贡花岗岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的初始值、 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 的初始值、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、Nd同位素亏损地幔模式年龄等同位素数值与冈底斯同时代的过铝花岗岩江巴岩体、丁青岩体、念青唐古拉岩体、嘎扎岩体的这些值(参见邱瑞照等,2003),非常一致,暗示它们可能具有相同或相似的成因过程。

5 年代学

本次研究选择独龙江、福贡、片马三个近于等距离剖面采集花岗岩样品4件,其中独龙江2件(GLS-36; GLS-38),福贡1件(GLS-58),片马1件(GLS-62)。样品包括未变形块状构造花岗岩、糜棱岩化花岗岩。剖面近于东西向横切南北走向的高黎贡花岗岩,从北到南控制岩体(图1)。分选出来的锆石全部为无色透明,长柱状自形晶体,晶体形态及大小一致。显微镜下及阴极发光照相显示,环带结构发育(图7a, b, c, d),Th/U比值大于0.5,属于典型的原生岩浆结晶锆石。锆石的U、Th和Pb同位素组成分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的SHRIMP II上完成。在分析过程中,我们选择锆石环带边部打点,每个样品分析点数14~17个,锆石的U、Th、Pb同位素成分数据及谐和年龄列于表3。

绝大多数分析结果具谐和年龄(表3),2倍方差=1.1%~2.7%,MSWD=0.75~1.7。对样品GLS-36的14颗锆石进行的14次分析,都位于谐和线或其附近,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 $124.1 \pm 2.7Ma$ (2)(图7e),代表了岩浆结晶年龄。样品GLS-58的情况与GLS-36十分相似(图7g),除一颗锆石的年龄为155 Ma年龄外,其余14颗锆石的年龄集中在 $122 \pm 1.1Ma$ 。样品GLS-38中锆石的 $^{207}Pb/^{235}U$ 相对比较分散(图7f),可能与 ^{207}Pb 的分析精度有关,但除一个点给出偏年轻的年龄外,其余12个锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄十分一致,加权平均值为 $126 \pm 2Ma$ 。GLS-62样品数据投点沿着谐和线线性分布(图7h),可能说明该样品记录了一个连续的岩浆结晶过程, $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 $118.4 \pm 1.3Ma$ 。

从4个样品测定的年龄结果可以确定高黎贡花岗岩结晶年龄为118~126Ma,即岩浆结晶时间为早白垩世。

6 讨论

6.1 岩石成因

如前所述,高黎贡花岗岩具有一致的主、微量元素演化趋势,说明这套岩石具有相似的成因并经历了相似的演化过程。Nd-Sr同位素指纹一致反映其壳源成因(图7)。以下讨论其源区特征和熔融条件。

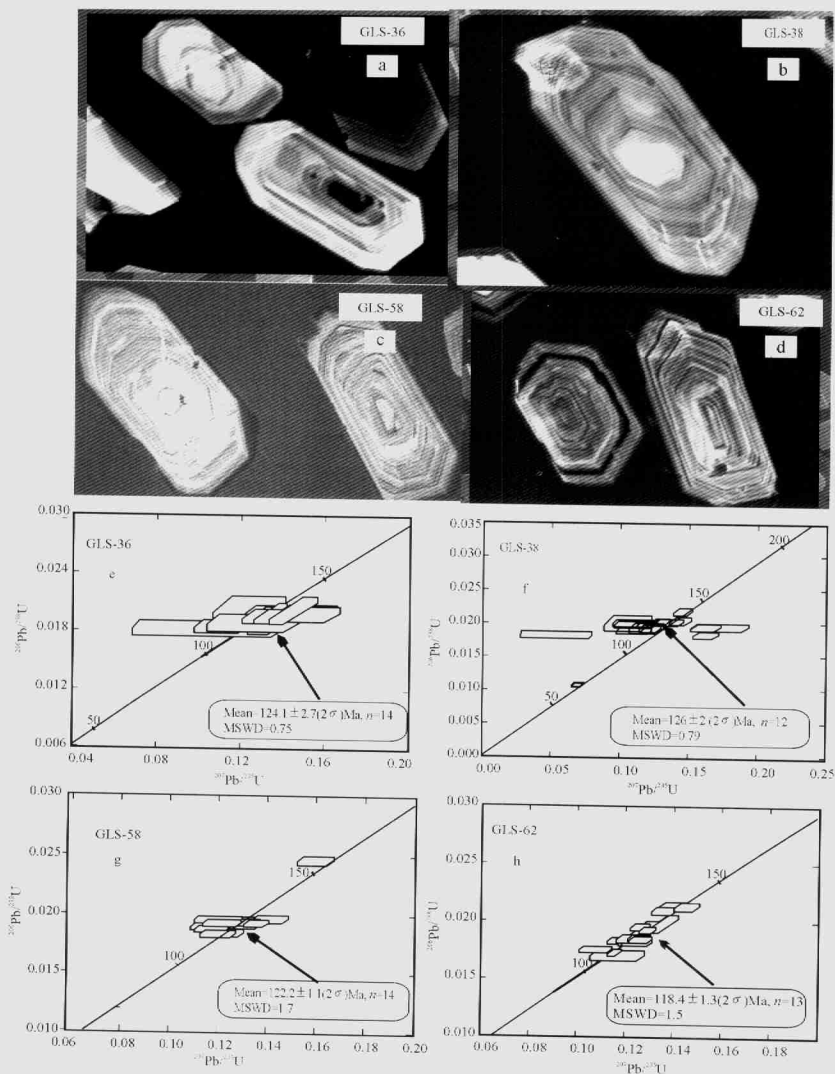


图7 高黎贡花岗岩中锆石的阴极发光图象(a,b,c,d); U-Pb 协和和年龄图(e,f,g,h)

Fig.7 Cathodoluminescence (CL) images(a,b,c,d) of zircons for Gaoligong granites and U-Pb zircon Concordia plots(e,f,g,h)

表3 高黎贡花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 3 SHRIMP U-Th-Pb data of the zircons for Gaoligong granites

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}_c$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Err (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Err (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ 年龄 (Ma)
GLS-36 谐和年龄: 124.1 \pm 2.7Ma									
1.1	269	235	0.901	3.55	0.071	4.0	0.051	5.5	117.8 \pm 4.8
2.1	272	185	0.702	2.10	0.061	4.8	0.048	1.5	130.5 \pm 8.4
3.1	614	527	0.887	1.89	0.059	2.9	0.051	2.0	119.1 \pm 4.5
4.1	678	412	0.629	0.33	0.054	2.9	0.056	3.5	117.5 \pm 4.4
5.1	846	711	0.868	0.52	0.054	3.3	0.049	0.9	123.9 \pm 4.7
6.1	1123	1456	1.339	0.77	0.053	2.1	0.060	3.4	127.9 \pm 4.8
7.1	477	361	0.782	0.99	0.057	3.3	0.048	1.7	126.7 \pm 4.9
8.1	245	213	0.901	2.42	0.068	5.7	0.051	2.0	120.9 \pm 5.7
9.1	458	524	1.182	1.38	0.066	3.1	0.052	2.4	126.9 \pm 4.8
10.1	1003	334	0.344	0.58	0.052	2.4	0.051	0.7	125.4 \pm 4.6
11.1	1695	1082	0.660	0.30	0.051	1.8	0.057	2.1	129.3 \pm 4.8
12.1	491	462	0.972	0.54	0.054	3.2	0.047	1.0	124.9 \pm 4.7
13.1	208	179	0.889	2.52	0.076	5.0	0.048	2.4	125.7 \pm 5.1
14.1	714	768	1.111	0.36	0.055	2.7	0.052	1.6	128.7 \pm 8.9
GLS-38 谐和年龄: 126 \pm 2Ma									
1	1262	559	0.458	0.51	0.056	2.4	0.042	2.6	129.5 \pm 3.7
2.1	1262	423	0.346	0.79	0.053	2.7	0.029	1.3	68.7 \pm 1.7
3.1	521	631	1.251	1.79	0.057	3.4	0.049	2.2	120.2 \pm 3.0
4.1	384	509	1.370	0.82	0.053	3.5	0.049	1.5	122.6 \pm 3.2
5.1	672	630	0.969	0.92	0.052	2.7	0.054	1.9	123.0 \pm 4.7
6.1	505	544	1.114	2.52	0.059	3.0	0.051	2.6	127.3 \pm 7.6
7.1	703	1089	1.600	0.95	0.056	2.8	0.045	1.0	128.7 \pm 3.2
8.1	1060	1138	1.109	0.65	0.052	2.3	0.050	2.5	129.3 \pm 3.1
9.1	484	527	1.125	2.09	0.058	3.2	0.047	1.1	126.0 \pm 3.2
10.1	632	535	0.875	0.52	0.048	3.1	0.045	1.0	126.0 \pm 3.1
11.1	360	395	1.133	1.68	0.054	3.8	0.049	1.6	127.7 \pm 3.5
12.1	339	343	1.045	1.06	0.073	3.5	0.050	2.5	117.0 \pm 3.1
13.1	188	197	1.083	2.15	0.082	7.7	0.052	2.0	124.1 \pm 3.5
14.1	343	364	1.096	5.66	0.069	5.4	0.053	2.4	115.9 \pm 3.5
15.1	177	167	0.976	0.00	0.061	6.1	0.051	1.8	123.9 \pm 3.5
16.1	934	780	0.863	0.45	0.052	2.4	0.056	1.1	138.5 \pm 3.3
GLS-58 谐和年龄: 122.2 \pm 1.1Ma									
1.1	1216	637	0.541	0.51	0.051	2.1	0.052	2.8	156.7 \pm 2.5
2.1	902	412	0.472	0.67	0.054	2.7	0.046	1.2	122.5 \pm 2.1
3.1	1160	581	0.518	0.46	0.054	2.4	0.044	3.4	122.6 \pm 2.5
4.1	1303	743	0.589	0.45	0.052	2.2	0.049	2.0	124.6 \pm 1.9
5.1	1070	745	0.719	0.11	0.053	2.5	0.048	2.2	124.6 \pm 2.0
6.1	1202	725	0.623	0.61	0.054	2.2	0.049	2.8	121.7 \pm 2.0
7.1	816	533	0.674	1.00	0.053	2.7	0.057	3.0	120.8 \pm 2.0
8.1	703	438	0.643	0.58	0.057	2.9	0.049	1.1	125.2 \pm 2.0
9.1	784	465	0.613	0.86	0.055	2.7	0.053	3.2	117.6 \pm 2.1
10.1	862	405	0.485	1.23	0.056	2.5	0.058	4.7	119.6 \pm 1.9
11.1	1117	587	0.543	0.25	0.052	2.4	0.054	2.6	123.2 \pm 1.9
12.1	1169	504	0.445	0.61	0.050	6.0	0.051	1.5	124.6 \pm 1.9
13.1	974	598	0.635	0.40	0.054	2.4	0.056	3.0	122.9 \pm 1.9
14.1	1391	902	0.670	0.95	0.054	2.2	0.051	2.3	122.9 \pm 1.9
15.1	803	458	0.589	1.27	0.058	2.9	0.049	2.1	117.1 \pm 2.0

续表 3
Continued table 3

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}_c$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Err (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Err (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)
谐和年龄: $118.4 \pm 1.3\text{Ma}$									
GLS-62									
1.1	1524	901	0.611	0.65	0.052	2.0	0.052	4.3	117.1 ± 1.8
2.1	4538	945	0.215	0.09	0.048	1.1	0.063	2.3	120.9 ± 3.3
3.1	2167	754	0.360	0.22	0.050	2.4	0.050	1.9	126.2 ± 1.8
4.1	657	404	0.636	0.46	0.053	3.1	0.051	1.6	116.1 ± 1.9
5.1	1523	1051	0.713	0.56	0.054	3.0	0.050	4.3	116.2 ± 1.8
6.1	2236	851	0.393	0.59	0.052	2.8	0.048	2.3	136.8 ± 2
7.1	1314	658	0.518	0.38	0.050	2.4	0.047	2.1	124.7 ± 1.9
8.1	989	639	0.668	0.90	0.057	5.1	0.053	1.0	109.0 ± 2.7
9.1	2581	778	0.311	0.29	0.050	1.9	0.059	4.4	133.7 ± 2.0
10.1	3381	2326	0.711	0.15	0.050	1.4	0.064	4.9	110.7 ± 1.9
11.1	1326	758	0.590	0.41	0.051	2.3	0.048	2.9	118.4 ± 2.2
12.1	1355	571	0.436	0.17	0.051	2.4	0.044	0.9	135.9 ± 2.2
13.1	1435	843	0.607	0.40	0.052	2.3	0.047	2.8	118.7 ± 1.8
14.1	3406	2144	0.650	0.13	0.051	1.9	0.051	3.0	126.7 ± 4.9
15.1	1419	622	0.453	0.44	0.048	4.6	0.053	4.7	112.3 ± 1.8
16.1	3150	1710	0.561	0.20	0.050	1.5	0.052	3.9	122.3 ± 1.7
17.1	2804	1492	0.550	0.31	0.051	1.5	0.057	2.3	123.0 ± 1.7
18.1	1684	796	0.488	0.60	0.055	1.9	0.051	4.5	117.8 ± 1.7

注: $^{206}\text{Pb}_c$ 为普通铅; $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的值为未加以校正的测定值。

6.1.1 源区特征

源岩识别是研究花岗岩的重要方面, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 可以作为源区的重要判别标志 (Sylvester, 1998)。实验揭示, 花岗岩中 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值主要受源区中斜长石/粘土比例的控制, 由贫斜长石、富粘土源产生的强过铝花岗岩比由富斜长石、贫粘土源产生的强过铝花岗岩具有更小的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (Patino Douce and Johnson, 1991)。具体而言, 贫斜长石的泥质岩生成的强过铝花岗岩, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$; 而由砂屑岩生成的强过铝花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$ 。由于花岗岩中 Rb、Sr、Ba 等元素主要赋存在长石和黑云母中, 因此 Rb/Ba 和 Rb/Sr 比值也直接反映了强过铝花岗岩的源区特征。图 8a 和 b 分别展示了高黎贡花岗岩与部分熔融实验结果和理论模拟计算结果的对比。两种方法结果一致表明, 高黎贡花岗岩的源岩为由硬砂岩—含少量粘土硬砂岩经变质作用形成的副片麻岩系 (图 8)。

6.1.2 熔融条件

Sylvester (1998) 通过对世界典型构造带: 喜马拉雅构造带、阿尔卑斯构造带、澳大利亚 Lachlan 构造带、海西构造带产出的典型强过铝花岗岩的详细研究, 以特征常量元素比值 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 为判别参数, 把强过铝花岗岩分为两种: Alps-Himalayas 高压型强过铝花岗岩和 Caledonides-Lachlan 高温型强过铝花岗岩。前者产在高压型碰撞带厚地壳 ($> 50\text{km}$) 环境, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值低, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值高, 花岗岩熔体温度较低 ($< 875^\circ\text{C}$), 导

致地壳熔融的热源主要来自元素的放射性衰变热; 后者产在高温型碰撞带“薄”地壳 ($< 50\text{km}$) 环境, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值高, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值低, 花岗岩熔体温度较高 ($875^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$), 导致地壳熔融的热源主要来自于上涌软流圈对上覆岩石圈的热传导。

与上述两类典型花岗岩相比, 高黎贡花岗岩的常量元素、微量元素组成特征与 Lachlan 高温型强过铝花岗岩类较为接近, 而与 Himalayas 高压型强过铝花岗岩的成分差别较大, 并具有长石分离结晶的演化趋势 (图 9)。同样, 将花岗岩地球化学组成与岩石部分熔融实验研究结果的温压条件进行对照, 推测高黎贡花岗岩的形成温度大致为 $875^\circ\text{C} \sim 975^\circ\text{C}$, 压力 $5 \sim 10\text{kbar}$, 部分熔融程度 $20\% \sim 60\%$ (图 9)。熔融深度相当于中下地壳。相对较高的花岗岩熔体温度与根据主量元素组成鉴定的高黎贡花岗岩属于 Lachlan 高温型花岗岩的认识是一致的, 因为后者的形成与底侵作用有关 (Sylvester, 1998)。值得注意的是, 在高黎贡花岗岩带中及其西侧的腾梁地区, 出露大量基性、超基性侵入岩 (图 1), 可能代表了这一地区底侵作用的产物。虽然这些基性岩浆作用的年代学和地球化学工作尚在进行中, 但与高黎贡花岗岩之间密切的空间联系暗示它可能提供了引发地壳熔融的热源。

高黎贡花岗岩所表现出的高温型过铝-强过铝花岗岩特征, 也可能暗示白垩纪时期, 拉萨地块的地壳厚度没有现在那么大, 而幔源火山相对发育。从青藏高原演化来看, 印度板块与亚洲板块碰撞始于 65Ma (莫宜学, 2003), 碰撞高峰

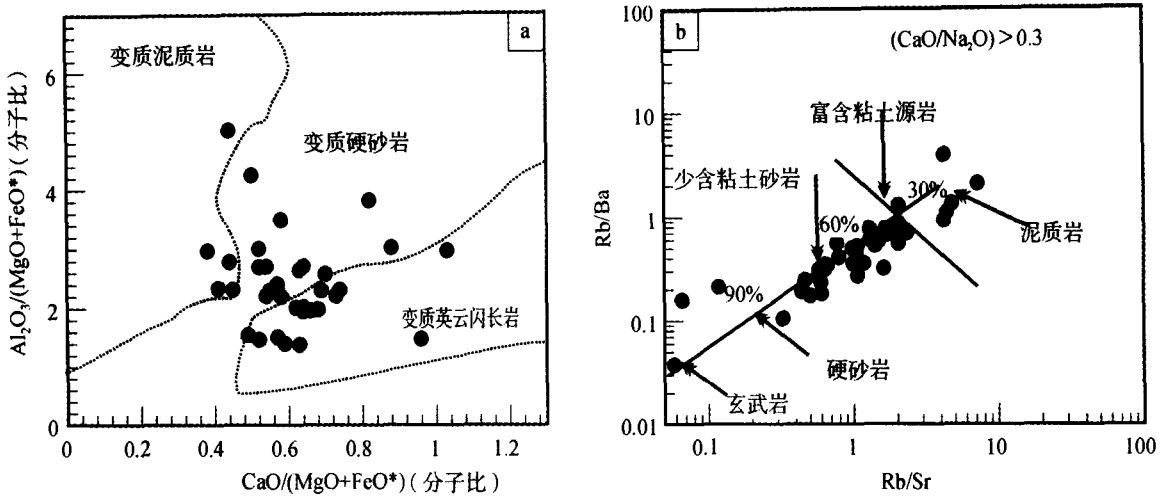


图 8 高黎贡花岗岩主要元素、微量元素源岩判别图解

a. 部分熔融实验所揭示的不同源岩部分熔融产生的花岗岩成分范围, 阴影部分为变质硬砂岩部分熔融产生花岗岩的成分范围(据 Altherr, 2000), 实点为高黎贡花岗岩的成分投点; b. 展示了根据不同岩石部分熔融实验及部分熔融的微量元素模型计算结果反推高黎贡花岗岩的源岩成分(据 Sylvester, 1998), 百分比表示变质表壳岩在粘土和碎屑二元组成中碎屑的相对重量百分含量

Fig. 8 Discrimination diagram for the source of Gaoligong granites in terms of major and trace element composition.

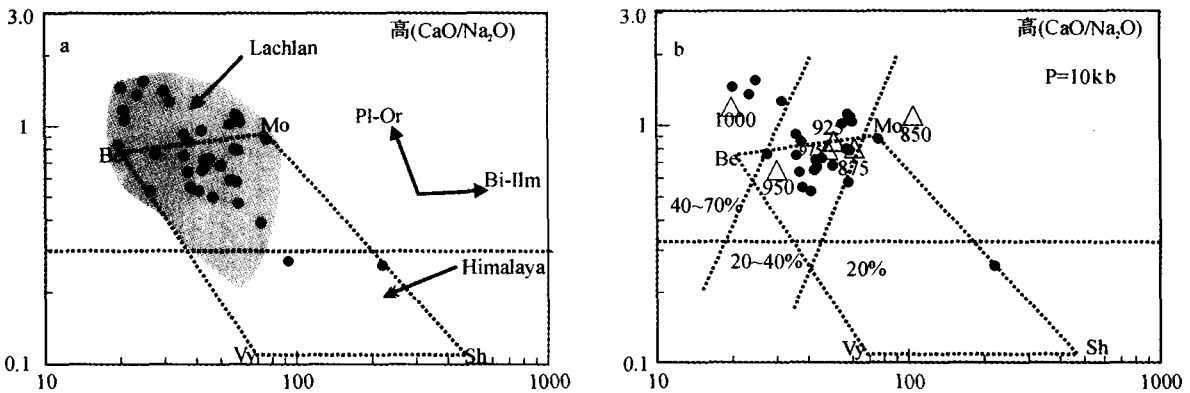


图 9 高黎贡花岗岩与澳大利亚 Lachlan 花岗岩常量元素比值变异图解特征(据 Sylvester, 1998)

两图中方框为 4 个典型强过滤花岗岩成分为端元组分的连线范围, 其中 Be-Bethanga 岩体; Mo-Moschumandl 岩体; Vy-Vysoky - Kamen 岩体; SH-Shisha Pangma 岩体; Be, Mo 属于高温性强过铝花岗岩; Vy, Sh 属于典型高压型强过铝花岗岩。图 a 中上部阴影部分是 Lachlan 强过铝花岗岩的投点范围, 下部阴影为喜马拉雅强过铝花岗岩的投点范围, 实点是高黎贡花岗岩的成分投点。两个箭头分别代表斜长石-钾长石(Pl-Or)和黑云母-钛铁矿(Bi-ilmm)分离结晶造成的岩浆成分不同演化趋势。图 b 中为 10kbar 下部分熔融实验产生不同温度、不同部分熔融程度产生的花岗质熔体成分范围, 实点为高黎贡花岗岩的成分投点。

Fig. 9 CaO/Na_2O vs. Al_2O_3/TiO_2 diagram for Gaoligong granites, Western Yunnan, and Lachlan granites, Australia

为 45 ~ 38Ma(钟大赉, 1999), 拉萨地块处于高压环境应该是在印度板块与亚洲板块“硬”碰撞之后, 即 38Ma 之后, 尤其是中新世之后。在喜马拉雅地块, 广泛发育的中新世淡色花岗岩(17 ~ 20Ma)就属于强过铝 S 型花岗岩(Searle, 1997), 与这些淡色花岗岩同期发育的拉萨地块边缘走滑构造说明了当时的挤压环境特征(Lee, 2002; 钟大赉, 1996)。因此, 高黎贡过铝花岗岩的形成环境不同于喜马拉雅强过铝花岗岩。

6.2 环境判别

强过铝花岗岩成因往往与碰撞、深俯冲作用有关(Barbarin, 1999; Sylvester, 1998), 但由于 S 型花岗岩的地球化学信息来源比较广泛, 加上具有壳幔岩浆的混合作用, 造成具体构造演化阶段识别困难, 传统地球化学环境判别专家系统效果不理想, 具有多解性。如图 10a, b 所示, 不同的 Pearce 图解给出了不一致的环境判别结果(包括弧、同碰撞,

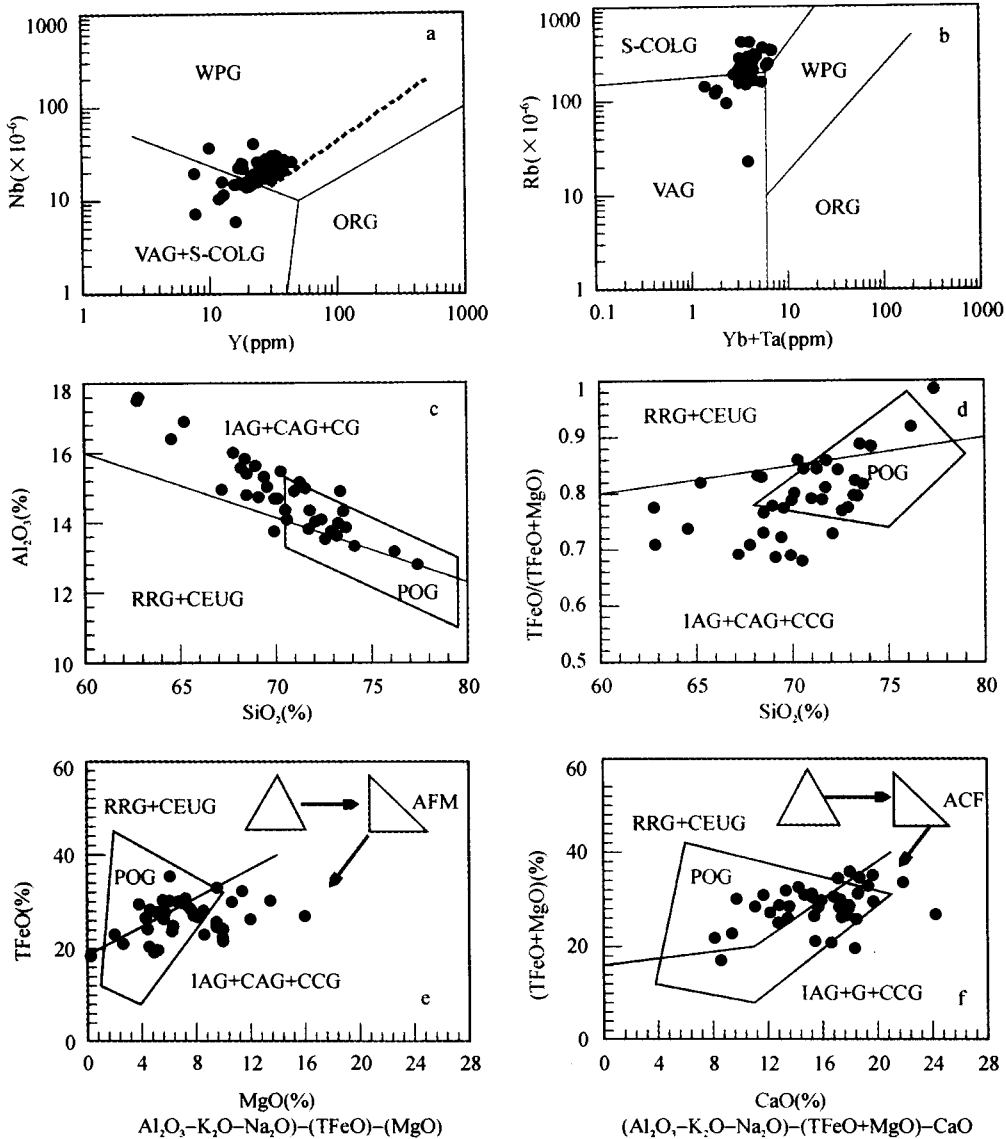


图 10 高黎贡花岗岩成因环境的微量元素、主量判别图解

图 a, b 为花岗岩微量元素 Pearce 图解 (Pearce, 1984), VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋中脊花岗岩; S-COLG 同碰撞花岗岩。图 c, d, e, f 为 Maniar-Piccoliaul 主量元素环境判别专家系统, 用特征主量元素, 按 c→d→e→f 顺序依次判别花岗岩形成的地构造环境, 详细方法参见 Maniar et al (1989), IAG-岛弧花岗岩; CAG-陆弧花岗岩; CCG-大陆碰撞花岗岩; POG-后造山花岗岩; RRG-与裂谷有关的花岗岩; CEUG-大陆抬升有关的花岗岩; OP-大洋斜长花岗岩。

Fig. 10 Setting distinguished diagram of granites for Gaoligong area by major and trace elements

板内)。Maniar et al. (1989) 提出了另外一种用主量元素判别花岗岩构造环境的方法, 即根据主量元素含量、比值等参数分步骤一次筛选进行判别的专家系统, 该方法揭示高黎贡花岗岩主体为陆-陆碰撞型花岗岩, 部分具有弧花岗岩特征 (图 10a, b, c, d), 可能代表了构造体制转换动力学环境的产物。

6.3 构造意义

高黎贡构造带位于东喜马拉雅构造结附近, 其物质组成

和隐含的动力学信息对探讨喜马拉雅构造演化意义重大, 涉及的内容广泛。这里仅讨论以下两个问题: (1) 高黎贡花岗岩与冈底斯带的关系; (2) 高黎贡花岗岩形成的地构造背景。在 2004 版 1:150 万《青藏高原及邻区地质图》上, 高黎贡花岗岩的时代被定为侏罗纪—白垩纪。本次 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明, 高黎贡花岗岩结晶年龄为 116 ~ 126Ma, 相当于早白垩世晚期。波密—察隅花岗岩 U-Pb 定年结果为 116Ma (Lee et al., 2003), 因此, 沿着波密—察隅—贡山—福贡—片马分布的弧形花岗岩带都是早白垩世同期形

成的,具有相同或者相似的演化过程。

从大范围上看,高黎贡地区花岗岩在形成时代上具有分带性。从北东向南西,形成时代依次为三叠纪、早白垩世、晚白垩世、新生代(作者未刊资料)。这和冈底斯花岗岩总体上由北向南逐步变新的总体规律可以类比。Nd 同位素亏损地幔模式年龄比高黎贡地区出露最古老的高黎贡群、崇山群年龄还要老,在大区域上相当于华夏地块古老基底的年龄,与冈底斯中带、北带燕山期花岗岩在 Sr、Nd 同位素组成和亏损地幔模式年龄完全一致(表 2),暗示它们可能形成于相同的构造环境和来源于源岩和时代相近的结晶基底,进一步支持高黎贡构造带属于冈底斯构造带的东延部分。

从晚期变形来看,发育于冈底斯与剪切变形有关的淡色花岗岩年龄为 24 ~ 22Ma (Scharer, 1986); 冈底斯含铜花岗岩斑岩年龄为 17 ~ 14Ma (侯增谦等, 2003), 沿着冈底斯南北向展布的裂谷发育的高峰期是 14Ma (许继锋等, 2003); 哀牢山-红河断裂带的走滑峰期时间为 26 ~ 22Ma; 鲜水河断裂雅鲁藏布江以南与剪切作用有关的淡色花岗岩年龄为 27 ~ 21Ma (Zhang *et al.*, 1998); 高黎贡构造带走滑年龄为 18 ~ 14Ma (作者未发表数据), 嘉黎深断裂剪切带走滑年龄 18 ~ 12Ma (Lee *et al.*, 2003)。这些年龄数据说明, 藏南地区进入中新世以来, 印度地块与亚洲地块发生硬碰撞后期, 在印度大陆持续向北东挤压的环境下, 特提斯封闭后已经失去压缩空间的拉萨地块, 只能通过地壳加厚、块体旋转、边界走滑、岩浆作用来释放、消解应力, 造成拉萨地块及其边缘在裂谷、火山岩、花岗岩、韧性变形等方面都有强烈的响应。因此, 高黎贡花岗岩的地球化学特征、年龄、构造变形与冈底斯花岗岩质基具有可比性, 说明高黎贡构造带可能是冈底斯地块的东延部分。

对于冈底斯花岗岩成因的地球动力学背景存在三种看法, 一种认为它是新特提斯洋壳沿雅鲁藏布缝合线位置向北侧的拉萨地块俯冲有关, 属于岛弧型花岗岩, (Scharer, 1984, 涂光炽, 1982, Coulon, 1986); 另一种看法认为, 它与中特提斯洋壳沿怒江-班公湖缝合线位置向南侧拉萨地块的俯冲有关 (Pearce and Mei 1986), 拉萨地块是一个双向岛弧的叠加 (潘桂棠等, 2002); 也有人主张中特提斯的闭合过程根本没有发生过大规模的洋壳俯冲 (雍用源, 2000)。上述看法中, 第一种是主流, 他们的共同特点都认为冈底斯花岗岩的形成与特提斯洋壳俯冲和印度和亚洲大陆的碰撞有关。

高黎贡花岗岩属于后碰撞强过铝花岗岩, 少量为岛弧型花岗岩, 结晶年龄为 118 ~ 124Ma, 远远早于新特提斯洋壳沿雅鲁藏布江缝合线位置向北冲时间 (75Ma) (钟大赉, 1999) 和印度板块与亚洲板块开始碰撞时间 (65Ma) (莫宣学, 2003), 更加早于 45 ~ 38Ma 的碰撞峰期时间 (莫宣学等, 2003; 钟大赉, 1999)。此外, 冈底斯带还存在年龄为 227 ~ 195Ma 的岛弧型花岗岩 (王立全等, 2004), 因此, 冈底斯带岩浆作用不可能全部归因于新特提斯洋的俯冲。

从全球大地构造背景分析, 中新特提斯的打开与三叠系

形成的 Pangea 超大陆的解体相关联 (李兴振等, 1999)。总体来说, 中特提斯洋打开于中一晚三叠世, 封闭于早白垩世 (卫万顺, 2003; 李兴振等, 1999; 侯增谦等, 1999; 雍用源, 2000); 中特提斯沿怒江位置闭合于早白垩世, 自 75Ma 起拉萨地块北部火山活动已停止 (Chung *et al.*, 2005), 这些资料都说明中特提斯洋壳沿怒江带在早白垩世晚期已经俯冲闭合。高黎贡带花岗岩在空间上位于班公-怒江缝合带的南缘, 其形成时代 (118 ~ 124Ma) 与中特提斯沿怒江带的俯冲、闭合过程基本同时, 其地球化学性质显示 (后) 碰撞-岛弧花岗岩的特征, 所有这些充分说明高黎贡带花岗岩的形成与中新特提斯的演化关系密切, 很可能代表了它沿怒江带俯冲-闭合这一构造转换过程的岩浆响应。拉萨地块北缘 110 ~ 80Ma 火山岩也具有同样的构造意义 (Coulon *et al.*, 1986)。因此, 本文的资料支持冈底斯岩浆岩带为双向多期叠加的复杂岛弧的观点。当然, 这一认识的确认尚待整个冈底斯带岩浆作用年代学框架的建立。

7 结论

(1) 高黎贡花岗岩带位于东喜马拉雅构造结东部大转弯地区, 是挟持于怒江剪切带和龙川江剪切带之间的花岗岩杂岩体, 主要由黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、花岗岩组成。

(2) 地球化学分析揭示, 高黎贡花岗岩属于后碰撞、“高温型”强过铝花岗岩, 由中下地壳含粘土的变质灰瓦克部分熔融形成。同位素组成特征及示踪结果表明, 高黎贡花岗岩与冈底斯花岗岩具有可比性, 可能属于冈底斯花岗岩带的东延部分。

(3) SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明其形成于早白垩纪 (118 ~ 126Ma)。其时空分布和地球化学特征表明它代表了中特提斯怒江洋向南俯冲、闭合过程中的岩浆响应, 而与新特提斯雅鲁藏布江的演化无关。导致地壳部分熔融形成高黎贡花岗岩的直接因素是与中特提斯洋壳俯冲有关的基性岩浆底侵作用和大洋闭合导致的地壳加厚。中新世, 印度地块向亚洲地块的强烈挤压, 造成拉萨地块沿怒江深断裂、嘉黎深断裂、红河深断裂等边界旋转, 并最终使花岗岩出露地表。

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51 - 73
- Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, *et al.* 2005. Tibet tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Sci. Rev.*, 68: 173 - 196
- Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-

- resolution ion microprobe. *J. Geophys. Res.*, 89(Suppl):B525 - B534
- Coulon C, Maluski H and Bollinger C. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet; ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth Planet Sci. Lett.*, 79: 281 - 302
- Foulger GR. 2002. Plumes, or plate tectonic processes? *A&G*, 43: 619 - 623
- Geng QR, Pang GT, Zheng LL, *et al.* 2001. The Gangdese island-arc granite zone along the Yarlung Zangbo Grand Canyon, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*. 21(2): 16 - 22 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Lu JR, Li HY, *et al.* 1996. Tectonic evolution of the tethyas in Southwestern China: is controlled by plume tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 17: 439 - 453
- Ji JQ, Zhong DL, Ding L and Han XL. 1998. Study on metamorphism of granulite-facies metamorphic rocks discovered in the Nabang area on the border between China and Burma. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 164 - 175 (in Chinese with English abstract)
- Jiang W, MO XX and Zhao CH. 1999. Geochemistry of granitoid and its mafic microgranular enclave in Gandese belt, Qinghai-Xizang plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 89 - 97 (in Chinese with English abstract)
- Lacassin R, Valli F, Arnaud N, *et al.* 2004. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakorum fault, Tibet. *Earth Planet Sci. Lett.*, 219: 255 - 269
- Li XH, Liu Y, Tu XL, *et al.* 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks ICP-AES and ICPMS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochemica*, 31(3): 289 - 294 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH, *et al.* 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochemica*, 32(1): 91 - 96 (in Chinese with English abstract)
- Lee HY, Chung SL, Wang JR, *et al.* 2002. Miocene Jiali faulting and implications for Tibet tectonic evolution. *Earth Planet Sci. Lett.*, 205: 185 - 194
- Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P. *et al.* 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3 - 84
- Liao ZL, Mo XX, Pan GT, *et al.* 2004. Peraluminous granites: insights from recent developments with discussions on the peraluminous granites in Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(2): 22 - 29 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y and Zhong DL. 1998. Tectonic frame for eastern Himalaya Syntaxis. *Progress in Natural Science*, 8: 506 - 509 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZS and Wang JM. 1994. Geological characteristics of granites from Southern Tibet. Chengdu: Sichuan Science Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Lombardo B and Visona Dario. 2002. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal-Tibet): Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating?. *Lithos*, 62: 125 - 150
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia Collision. *Earth Science Frontiers*, 10: 135 - 148 (in Chinese with English abstract)
- Miniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granites. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101: 635 - 643
- Pan GT, Ding J, *et al.* 2004. Geological map of Tibet and neighboring area (1:1500000). Chengdu: Chengdu map Publishing House (in Chinese)
- Qiu RZ, Deng JF and Zhou S. 2003. Sr-Nd isotope studies of Mesozoic-Cenozoic granites in Qinghai-Tibet plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 24: 611 - 617 (in Chinese with English abstract)
- Patino Douce AE and Johnson AD. 1991. Phase equilibria and melting productivity in the pelitic system: Implication for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contrib. Mineral. Petro.* 107: 202 - 218
- Scharer U, Xu RH and Allegre CJ. 1984. U-Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) Plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet. *Earth Planet Sci. Lett.*, 69: 311 - 320
- Searle M, Parrish R, Hodges K, *et al.* 1997. Shisha Pangma leucogranite, South Tibet Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement. *J. Geol.*, 105: 295 - 317
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29 - 44
- Visona D and Lombardo B. 2002. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal-Tibet): Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating?. *Lithos*, 62: 125 - 150
- Whalen JB, Currie KL and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407 - 419
- Wei WS, Zhang YH, Lu YM, *et al.* 2003. Magmatic evolution and metallogenic model of gold deposits in the middle part of Banggonghu-Nujiang metallogenic belt, Tibet. *Gold Science and Technology*, 11(3): 1 - 10 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, McDermott, Xu JF, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet. *Geology*, 33: 465 - 468
- Wei GJ, Liang XR, Li XH, *et al.* 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. *Geochemica*, 31: 295 - 299
- Williams IS. 1998a. Chapter 1: U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben MA, Shanks III, WC and Ridley WI (eds). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding, Mineralizing Processes*. *Rev. Econ. Geol.* 7: 1 - 35
- Xiao QH, Deng JF and Ma DQ. 2002. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Yong YY and Jia BJ. 2000. Shear convergence of plates and suturing of terranes: a new model for the consumption of the Meo-Tethys. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20: 85 - 89 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C and Wang TW. *et al.* 2004. The geochemistry and tectonic settings of two-mica granite in Zhewu area, Tibet. *Journal of Jilin University*, 34: 27 - 31 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LS and Scharer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 67 - 85
- Zhong DL, Ji JQ, and Hu SL. 1999. The subduction age of Tethyan oceanic crust: The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ microarea dating of metamorphic residual oceanic crust. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1782 - 1785 (in Chinese)

附中文参考文献

- 耿全如, 潘桂棠, 郑来林等. 2001. 论雅鲁藏布大峡谷地区冈底斯岛弧花岗岩带. 沉积与特提斯地质, 21(2): 16 - 22
- 侯增谦, 卢仁, 李红阳等. 1996. 中国西南特提斯构造演化: 幔柱构造控制. 地球学报, 17(4): 439 - 453
- 江万, 莫宣学, 赵崇贺. 1999. 青藏高原冈底斯中段花岗岩类及其中铁镁质微粒包体地球化学特征. 岩石学报, 15(01): 89 - 97
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华等. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91 - 96
- 刘振声, 王洁明. 1994. 青藏高原南部花岗岩地质地球化学特征. 成

- 都: 四川科技出版社
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠等. 2003. 过铝花岗岩的研究近况. 地学前沿, 10: 22 - 29
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠等. 2004. 过铝花岗岩的研究方向和进展: 兼论西藏过铝花岗岩. 沉积与特提斯地质, 24(2): 22 - 29
- 李兴振, 刘文均, 王义昭等. 1999. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论). 北京: 地质出版社
- 李献华, 刘颖, 涂湘林等. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MC 准确测定: 酸溶与碱溶分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289 - 294
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前沿, 10(3): 135 - 148
- 潘桂棠, 丁俊等. 2004. 青藏高原及邻区地质图(1:1500000)说明书. 成都: 成都地图出版社
- 邱瑞照, 邓晋福, 周肃. 2003. 青藏高原中生代花岗岩 Sr-Nd 同位素研究. 地球学报, 24: 611 - 617
- 涂光炽, 张玉泉, 1982. 西藏南部花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华等. 2002. (LP)(MC-ICPMS)方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学, 31(3): 295 - 299
- 王立全, 潘桂棠, 李才等. 2004. 晚古生代—中生代冈底斯弧造山作用的重要地质事件信息. 2004 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 247 - 249
- 卫万顺, 张宇辉, 陆彦明等. 2003. 西藏班公湖-怒江成矿带中段岩浆演化及其金矿成矿动力学模式. 黄金科学技术, 11(3): 1 - 10
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社
- 雍永源, 贾宝江. 2000. 板块剪式汇聚加地体拼贴: 中特提斯消亡的新模式. 沉积与特提斯地质, 20: 85 - 89
- 翟庆国, 李才, 王天武等. 2004. 西藏折无地区地区二云母花岗岩地球化学及构造环境. 吉林大学学报(地球科学版), 34(1): 27 - 31
- 钟大赉, 季建清, 胡世玲. 1999. 新特提斯洋俯冲时间: 变质洋壳残片³⁹Ar/⁴⁰Ar 微区年龄. 科学通报, 44: 1782 - 1785
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学(D 辑), 26(4): 289 - 295