

滇西保山地块中-新生代岩浆作用及其构造意义*

董美玲^{1,2} 董国臣^{1**} 莫宣学¹ 朱弟成¹ 聂飞¹ 于峻川¹ 王鹏¹ 罗微¹DONG MeiLing^{1,2}, DONG GuoChen^{1**}, MO XuanXue¹, ZHU DiCheng¹, NIE Fei¹, YU JunChuan¹, WANG Peng¹ and LUO Wei¹

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 国土资源实物地质资料中心, 燕郊 101149

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Cores and Samples Center of Land and Resources, Yanjiao 101149, China

2013-04-30 收稿, 2013-09-25 改回.

Dong ML, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Nie F, Yu JC, Wang P and Luo W. 2013. The Mesozoic-Cenozoic magmatism in Baoshan Block, western Yunnan and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11):3901–3913

Abstract The Bangmiao and Huataolin plutons, located in Baoshan Block of the Tethyan belt, western Yunnan, are representative of the Mesozoic-Cenozoic magmatism. The Bangmiao pluton consists mainly of quartz monzonite and monzogranite with zircon U-Pb ages of 83 ~ 85 Ma. The Huataolin two-mica granite pluton was dated at 60 ~ 66 Ma by zircon U-Pb method. These ages indicate that there were two magmatic events during the Late Cretaceous and Paleocene. The two plutons are high-K calc-alkaline and peraluminous, with $K_2O/Na_2O > 1$ and $A/CNK > 1.1$, but the Bangmiao pluton is apt to shoshonitic. These rocks are enriched in large-ion lithophile elements (LILEs) and lead, and depleted in high field-strength elements (HFSEs). The Bangmiao pluton is obviously enriched in light rare-earth elements (LREEs) [$(La/Yb)_N = 65.2 \sim 67.2$] in comparison with the Huataolin pluton. However, the Huataolin shows evident negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.17 \sim 0.35$). 41 analyses from three samples of the two plutons give a wide range zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ($-15.8 \sim -1.1$) and varying Hf-isotope crustal model ages (2.0 ~ 1.2 Ga and 2.0 ~ 1.5 Ga). The Bangmiao pluton has higher zircon saturation temperatures of the whole rock than the Huataolin pluton, which indicate that the molten degree of anatexis in the magma source is different. Such geochemical signatures indicate that the Mesozoic-Cenozoic granitoids are S-type granite in character and were derived mainly from anatexis of Paleoproterozoic to Mesoproterozoic crustal materials with varying contributions from mantle-derived components. The Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block are geochemically comparable to that in Tengchong Block, which can be related to the closure of the Neotethys ocean and the collision between the India and Eurasia, however, are incomparable to the nearly coeval rocks reported in Lhasa Terrane.

Key words Mesozoic-Cenozoic granitoids; Geochemistry; Zircon Hf isotope; Baoshan Block; Western Yunnan

摘要 保山地块上的中-新生代岩浆活动以蚌渺岩体和桦桃林岩体为代表, 蚌渺岩体岩石类型为石英二长岩、二长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 83 ~ 85 Ma, 桦桃林岩体为二云母花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 60 ~ 66 Ma, 表明该地区在晚白垩世和古新世发生了两次不同的岩浆作用。蚌渺岩体和桦桃林岩体都以全碱含量高为特征, $K_2O/Na_2O > 1$, 桦桃林岩体属于高钾钙碱性系列, 蚌渺岩体更加倾向于钾玄岩系列。它们的铝饱和指数 A/CNK 的值均大于 1.1, 属铝过饱和系列。这两个岩体岩石总体上富集大离子亲石元素和 Pb, 亏损高场强元素。蚌渺岩体较桦桃林岩体明显富集轻稀土元素 [$(La/Yb)_N = 65.2 \sim 67.2$], 而桦桃林岩体较蚌渺岩体显示明显的负 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.17 \sim 0.35$)。2 个岩体中 3 件样品 41 个测点的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围较大 ($-15.8 \sim -1.1$), 蚌渺岩体和桦桃林岩体的 Hf 同位素地壳模式年龄分别集中于 2.0 ~ 1.2 Ga 和 2.0 ~ 1.5 Ga。全岩锆饱和温度蚌渺高于桦桃林, 说明这两个岩体源区岩石的熔融程度不同。这些地球化学特征指示中-新生代花岗岩类为 S 型花岗岩, 主要来源于古元古代-中元古代地壳物质的重熔, 并不同程度地混入了幔源物质。保山地块、腾冲地块和拉萨地体在中-新生

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421002、2011CB403102)、111 计划项目(B07011)、长江学者和创新团队发展计划(IRT1083)和中国地质调查局研究项目(1212011220920)联合资助。

第一作者简介: 董美玲, 女, 1986 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: dml_happy@126.com

** 通讯作者: 董国臣, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石学及矿床学研究, E-mail: donggc@cugb.edu.cn

代存在几乎同期的岩浆活动,但保山地块与拉萨地体由于岩石地球化学特征不同,不存在对比性,而与腾冲地块存在共同点。保山地块与腾冲地块上的中-新生代岩浆作用与新特提斯洋的闭合和印欧大陆的碰撞息息相关。

关键词 中-新生代花岗岩类;地球化学;锆石 Hf 同位素;保山地块;滇西

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

许多地质学者普遍认为,在冈瓦纳大陆和劳亚大陆最后的碰撞之前,至少有两个大洋盆闭合,即古特提斯洋和新特提斯洋,其中部分学者甚至提出中特提斯洋(Metcalf, 1996)的存在。晚古生代以来,在劳亚和冈瓦纳这两个超大陆之间不断地有微小陆块,如 Cimmerican 地体(Sengör *et al.*, 1988)、Sibumasu 地体和拉萨地体等(Wang *et al.*, 2001; Jin, 2002),从冈瓦纳北部裂离出来,增生到位于北部的古亚洲地体,构成了全球规模特提斯造山带。而滇西特提斯构造带是东特提斯造山带的重要组成部分之一,该地区的大地构造格局和演化对全球特提斯研究具有重要的地质意义,因此,长期以来成为众多研究者的关注热点。滇西特提斯构造带是由多个地块和地块相间的构造带组成的,如腾冲地块、保山地块、思茅地块和昌宁-孟连结合带等(钟大赉等, 1998)。经受晚古生代-早中生代古特提斯和中生代-新生代新特提斯造山作

用的影响,这些微陆块岩浆活动频繁。拉萨地体和腾冲地块的中-新生代岩浆作用已被广泛研究,但保山地块相对薄弱。作者对出露于保山地块蚌渺-桦桃林地区的花岗岩类开展了野外调研,本文目的是报道蚌渺-桦桃林花岗岩类锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素数据和全岩元素地球化学数据,约束其岩浆源区,并探讨其构造意义。

2 地质背景和样品

滇西保山地块在大体构造上位于藏-滇-泰-马中间板块中段,向南与缅甸掸邦地块相连,东与昌宁-孟连结合带以柯街-南定河断裂为界,西与腾冲地块以泸水-潞西-瑞丽断裂为界,北部在碧江一带由于澜沧江断裂和怒江断裂汇拢而消失(图 1a)。最老地层是震旦系-寒武系公养河群,在晚寒武世至中侏罗世期间,保山地块以滨海台地沉积为主,缺失上石炭统、上二叠统和下三叠统,其他地层间均为假整合关系。下二叠世发育冈瓦纳相杂砾岩,早二叠世至中侏罗世发育多

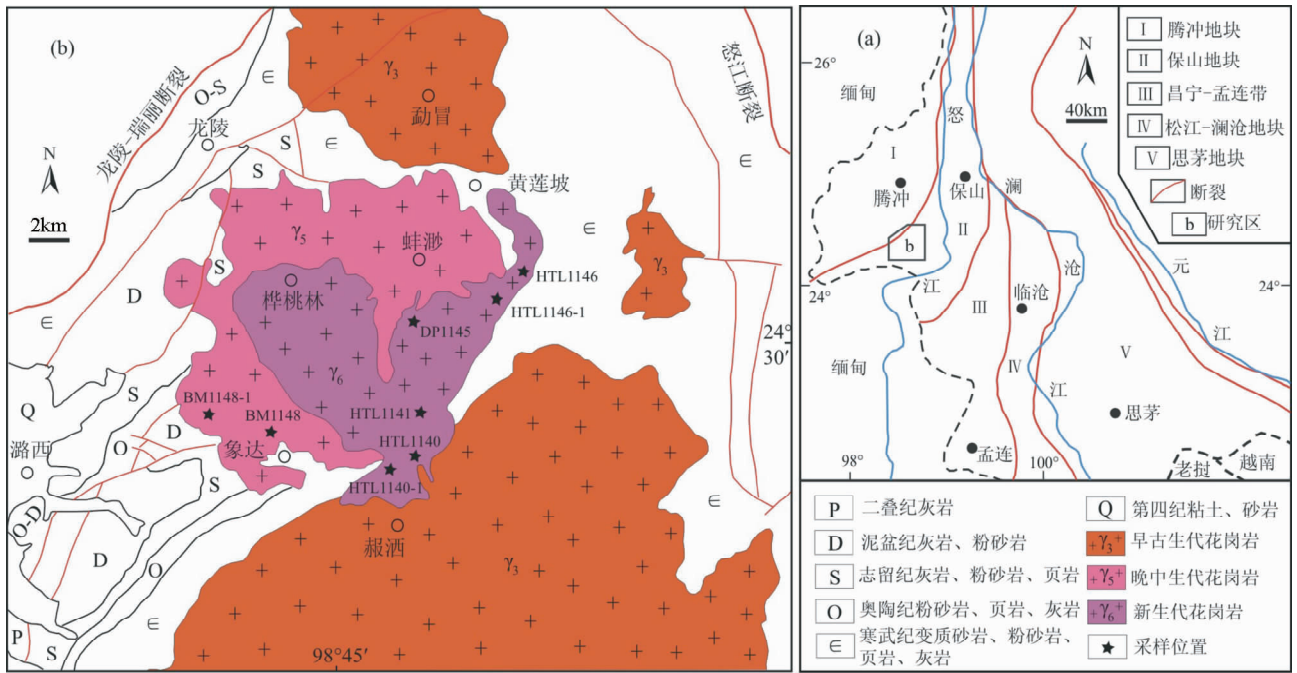


图 1 滇西保山地块构造地质简图(a,据 Shen *et al.*, 2002 修改)和保山地块中-新生代花岗岩类的地质简图(b,据云南省地质局, 1965^①修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Baoshan Block in western Yunnan Province (a, modified after Shen *et al.*, 2002) and simplified geological map of the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block (b)

① 云南省地质局. 1965. 1 : 20 万潞西幅地质图

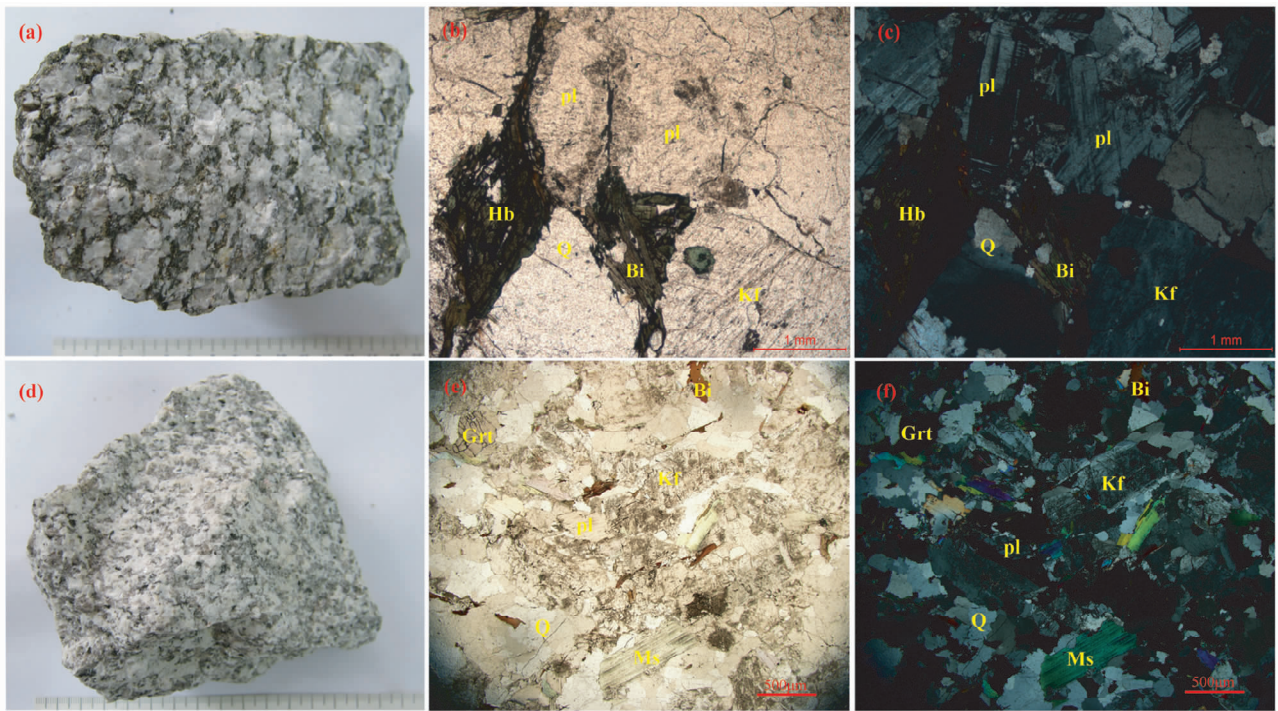


图2 中-新生代花岗岩类标本及显微镜下特征

Fig. 2 Rock photograph and microphotographs of the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

期大陆火山岩。晚古生代的生物群具有亲冈瓦纳特征。表明该地块是处于稳定的构造环境并与冈瓦纳大陆有亲缘关系(钟大赟, 1998; Metcalfe, 1996; Ueno, 2000)。保山地块岩浆活动主要以前寒武纪末期、早古生代、中生代晚期和新生代为主(图1b), 前寒武纪末期以西盟老街区花岗岩体为代表, 规模较小, 以岩株为主, 其 Rb-Sr 等时线年龄为 687Ma(李文昌等, 2010), 同时在潞西志本山地区发育二云母花岗岩, 其 Rb-Sr 等时线年龄为 645Ma(张玉泉等, 1990); 早古生代以平河岩体为代表, 它是保山地块出露面积最大的花岗岩体, 其锆石 U-Pb 年龄为 466 ~ 502Ma(Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; 董美玲等, 2012); 中生代晚期和新生代岩浆呈小岩株零星产出, 前者同位素年龄约 80 ~ 100Ma(Chen *et al.*, 2007; 金世昌和庄凤良, 1988)。

中-新生代的岩浆活动集中于龙陵-潞西地区, 出露面积约 180km², 呈岩株产出。这些岩株侵位于下古生界-中寒武统公养河群类复理石和砂页岩建造(陈国达等, 2004), 泥盆纪、志留纪的灰岩、粉砂岩、页岩和早古生代平河花岗岩基, 并将平河岩基分成南北两部分(图1b)。中生代晚期岩性为石英二长岩, 二长花岗岩, 岩石整体灰白色, 中粗粒状, 似斑状结构(图2a); 斑晶多为钾长石和斜长石, 少量角闪石和白云母(图2b); 斜长石自形-半自形板状, 可见聚片双晶和卡纳复合双晶, 钾长石具细微格子状双晶, 微弱的泥化, 角闪石绿色, 可见两组呈菱形的解理, 对称消光, 白云母褐色, 片状, 石英呈它形粒状(图2c); 副矿物为锆石、钛铁矿和磁铁矿等。

新生代岩性为二云母花岗岩, 灰白色, 中细粒状, 花岗结构(图2d); 主要矿物为钾长石、斜长石、石英, 次要矿物为黑云母和白云母(图2e); 斜长石呈半自形板状, 双晶纹不清晰, 钾长石半自形-他形粒状, 含量可达 45% 以上, 具卡式双晶, 微弱的碳酸盐化, 片状黑云母和白云母含量相当, 白云母自形程度高, 石英呈他形粒状, 个别具波状消光(图2f); 副矿物组合为锆石 + 磷灰石 + 榍石 + 磁铁矿, 可见特征富铝矿物-石榴子石(图2e, f)。

3 分析方法

主量元素在核工业北京地质研究院采用 XRF 法在 6735 仪器上分析完成, 分析精度优于 5%。微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成。详细的测试方法和分析流程参见 Liu *et al.* (2008a) 的文章。分析结果见表 1。

锆石阴极发光图像在中国地质科学院完成。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。测试仪器为 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005。激光剥蚀斑束直径为 32μm, 激光剥蚀深度为 20 ~ 40μm。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008b, 2010a, b) 详细描述。分析结果见表 2。

表1 中-新生代花岗岩类的全岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Whole-rock major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elemental data of the Mesozoic-Cenozoic granitoids

样品号 岩性	HTL1140 花岗岩	HTL1140-1 花岗岩	HTL1141 花岗岩	HTL1146 花岗岩	HTL1146-1 花岗岩	DP1145 花岗岩	BMI148 石英二长岩	BMI148-1 二长花岗岩
SiO ₂	73.34	73.45	74.59	73.17	73.80	73.50	64.92	65.06
TiO ₂	0.06	0.06	0.06	0.11	0.12	0.10	0.49	0.63
Al ₂ O ₃	14.80	14.71	14.20	14.64	14.38	15.02	16.19	15.08
Fe ₂ O ₃ ^T	0.96	0.92	0.86	1.21	1.29	1.24	3.12	3.77
MnO	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08
MgO	0.16	0.16	0.15	0.21	0.23	0.21	2.01	2.49
CaO	0.57	0.59	0.58	0.59	0.57	0.29	2.85	3.08
Na ₂ O	3.80	3.68	3.60	3.63	3.54	2.61	4.23	3.52
K ₂ O	4.44	4.66	4.52	4.86	4.61	3.85	4.11	4.34
P ₂ O ₅	0.30	0.33	0.26	0.26	0.25	0.35	0.26	0.39
烧失量	1.38	1.22	1.02	1.14	1.04	2.63	1.66	1.44
A/CNK	1.28	1.26	1.25	1.24	1.27	1.72	1.16	1.13
A/NK	1.34	1.33	1.31	1.30	1.33	1.78	1.42	1.44
K ₂ O + Na ₂ O	8.24	8.34	8.12	8.49	8.15	6.46	8.34	7.86
K ₂ O/Na ₂ O	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5	1.0	1.2
CaO/Na ₂ O	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.11	0.67	0.88
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	231	245	225	133	120	152	33	24
石英(Q)	33.89	33.88	35.76	32.61	34.73	44.18	16.02	18.48
钙长石(An)	0.88	0.78	1.19	1.25	1.21	0	12.69	12.76
钠长石(Ab)	32.67	31.59	30.83	31.14	30.33	22.73	36.51	30.33
正长石(Or)	26.66	27.94	27.04	29.12	27.59	23.42	24.77	26.11
刚玉(C)	3.48	3.38	2.99	3	3.17	6.75	0.23	0
透辉石(Di)	0	0	0	0	0	0	0	0.17
紫苏辉石(Hy)	1	0.94	1.02	1.52	1.49	1.33	6.24	7.71
钛铁矿(Il)	0.12	0.12	0.12	0.21	0.23	0.19	0.95	1.22
磁铁矿(Mt)	0.59	0.6	0.45	0.55	0.67	0.73	1.98	2.31
磷灰石(Ap)	0.71	0.78	0.61	0.61	0.59	0.83	0.61	0.92
Sc	3.17	2.57	2.23	2.78	2.45	3.87	6.15	7.28
V	1.95	2.39	2.90	3.00	4.63	3.50	49.9	65.9
Cr	1.23	0.97	1.24	4.06	1.65	1.53	51.6	56.3
Co	0.39	0.47	0.47	0.77	0.92	0.80	8.77	10.5
Ni	0.25	0.30	0.40	1.49	0.62	0.85	32.6	38.3
Ga	27.6	25.8	23.4	25.2	26.8	26.8	22.5	23.0
Rb	605	628	509	565	577	465	127	271
Sr	22.0	23.6	27.2	26.3	23.2	17.5	1005	967
Y	11.1	9.94	10.1	14.6	14.1	10.6	10.3	13.4
Zr	33.8	33.6	39.6	49.8	64.9	44.8	169	210
Nb	35.3	31.9	28.2	31.7	37.2	34.3	22.0	28.1
Cs	95.1	110	46.1	47.4	51.7	54.1	10.5	87.5
Ba	63.7	76.7	92.8	67.3	51.7	34.9	1429	1403
La	6.35	5.79	7.03	12.4	11.8	9.71	83.0	102
Ce	13.1	11.6	13.5	25.6	23.3	21.3	139	173
Pr	1.51	1.42	1.59	3.03	3.01	2.32	13.3	17.3
Nd	5.32	4.96	5.85	11.0	10.9	8.44	43.8	57.3
Sm	1.52	1.37	1.45	2.84	2.84	2.33	5.76	7.69
Eu	0.13	0.14	0.17	0.18	0.18	0.12	1.57	1.85
Gd	1.53	1.37	1.49	2.61	2.53	2.17	3.69	4.99
Tb	0.32	0.31	0.31	0.49	0.47	0.43	0.45	0.57
Dy	1.88	1.73	1.81	2.76	2.60	2.28	1.98	2.66
Ho	0.33	0.30	0.29	0.43	0.44	0.36	0.34	0.46
Er	0.82	0.79	0.84	1.11	1.12	0.96	0.91	1.21
Tm	0.14	0.12	0.14	0.16	0.18	0.15	0.14	0.18
Yb	0.77	0.73	0.69	0.98	0.95	0.90	0.83	1.06
Lu	0.11	0.10	0.10	0.13	0.13	0.11	0.12	0.17
Hf	1.42	1.52	1.65	1.88	2.43	1.76	4.05	5.00
Ta	10.3	9.98	6.49	5.21	5.85	6.68	1.46	2.16
Pb	27.2	29.2	31.1	31.3	27.7	21.6	28.8	26.5
Th	5.39	4.80	5.87	10.4	10.0	8.11	25.8	34.2
U	32.0	23.3	26.9	37.9	27.2	8.22	3.72	4.43
ΣREE	33.7	30.7	35.1	63.5	60.3	51.4	294	371
(La/Yb) _N	5.5	5.4	6.9	8.5	8.3	7.3	67.2	65.2
δEu	0.27	0.32	0.35	0.21	0.21	0.17	1.04	0.91
T _{Zr} (°C)	679	678	690	705	727	721	771	785

注:锆饱和和温度(°C)计算参见(Watson and Harrison, 1983)

表 2 中-新生代花岗岩类的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of the Mesozoic-Cenozoic granitoids

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	
					比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	Age(Ma)	1 σ	Age(Ma)	1 σ	Age(Ma)	1 σ
BM1148:18 个测点 加权平均年龄:83.4 \pm 1.1 Ma, MSWD = 0.99																
1	31.1	1754	1594	1.1	0.0506	0.0035	0.0903	0.0060	0.0131	0.0002	224	121	88	6	84	1
2	32.4	1793	1597	1.1	0.0499	0.0037	0.0918	0.0065	0.0134	0.0002	188	128	89	6	86	1
3	67.5	3655	3748	1.0	0.0436	0.0020	0.0755	0.0034	0.0125	0.0002	-94	75	74	3	80	1
4	39.1	1717	2242	0.8	0.0436	0.0027	0.0772	0.0047	0.0129	0.0002	-93	104	76	4	82	1
5	51.6	2427	2772	0.9	0.0591	0.0030	0.1091	0.0056	0.0134	0.0003	569	79	105	5	86	2
6	44.4	2156	2503	0.9	0.0517	0.0029	0.0893	0.0050	0.0127	0.0002	272	98	87	5	82	1
7	22.6	1065	1137	0.9	0.0573	0.0037	0.1074	0.0061	0.0142	0.0003	502	85	104	6	91	2
8	19.9	1045	994	1.1	0.0586	0.0050	0.1043	0.0081	0.0134	0.0003	550	132	101	7	86	2
9	31.5	1769	1665	1.1	0.0503	0.0028	0.0884	0.0048	0.0130	0.0002	210	94	86	4	83	1
10	26.9	1286	1434	0.9	0.0473	0.0029	0.0842	0.0049	0.0132	0.0002	65	96	82	5	84	1
11	46.7	2482	2400	1.0	0.0546	0.0030	0.0959	0.0051	0.0129	0.0002	395	92	93	5	83	1
12	44.2	2225	2455	0.9	0.0534	0.0032	0.0908	0.0050	0.0125	0.0002	345	98	88	5	80	1
13	21.12	1003	1168	0.9	0.0593	0.0044	0.1034	0.0072	0.0129	0.0003	579	117	100	7	83	2
14	27.1	1371	1458	0.9	0.0569	0.0041	0.0965	0.0064	0.0129	0.0003	487	113	94	6	82	2
15	27.2	1417	1391	1.0	0.0468	0.0031	0.0868	0.0056	0.0136	0.0002	41	111	85	5	87	1
16	23.3	1210	1234	1.0	0.0611	0.0044	0.1052	0.0063	0.0132	0.0003	643	91	102	6	85	2
17	37.0	2182	1968	1.1	0.0560	0.0040	0.0976	0.0065	0.0129	0.0002	451	118	95	6	83	1
18	26.9	1406	1445	1.0	0.0523	0.0030	0.0963	0.0056	0.0133	0.0002	297	100	93	5	85	2
HTL1141:10 个测点 加权平均年龄:59.9 \pm 3.6 Ma, MSWD = 13																
2	77.22	378	6866	0.1	0.0463	0.0025	0.0650	0.0034	0.0102	0.0001	12	86	64	3	65.2	0.9
3	365.05	231	38557	0.01	0.0469	0.0015	0.0570	0.0017	0.0087	0.0001	46	48	56	2	56	0.6
7	28.8	1556	1678	0.9	0.0604	0.0093	0.0946	0.0143	0.0114	0.0003	619	345	92	13	73	2
8	181.94	296	18538	0.02	0.0512	0.0020	0.0618	0.0023	0.0088	0.0001	252	92	61	2	56.1	0.6
10	79.3	8618	4093	2.1	0.0525	0.0035	0.0796	0.0054	0.0109	0.0002	308	122	78	5	70	1
13	118.69	547	11116	0.05	0.0472	0.0025	0.0635	0.0032	0.0098	0.0001	57	85	63	3	62.8	0.9
15	222.78	737	19097	0.04	0.0465	0.0017	0.0689	0.0024	0.0107	0.0001	23	52	68	2	68.8	0.8
16	395.01	241	39033	0.01	0.0488	0.0015	0.0636	0.0020	0.0094	0.0001	138	56	63	2	60.2	0.6
17	569.1	528	56262	0.01	0.0487	0.0014	0.0623	0.0018	0.0093	0.0001	132	71	61	2	59.6	0.6
18	477	24130	44679	0.5	0.0505	0.0015	0.0612	0.0017	0.0087	0.0001	219	47	60	2	55.9	0.5
DP1145:11 个测点 2 组加权平均年龄:85.4 \pm 4.2 Ma, MSWD = 1.8; 66.1 \pm 1.8 Ma, MSWD = 1.02																
1	57.1	2964	3223	0.9	0.0427	0.0027	0.0753	0.0050	0.0127	0.0002	-137	111	74	5	81	2
5	38.2	2051	2068	1.0	0.0518	0.0047	0.0925	0.0090	0.0129	0.0003	278	179	90	8	83	2
6	47.0	1176	2689	0.4	0.0488	0.0034	0.0940	0.0061	0.0139	0.0002	140	113	91	6	89	2
7	93.77	433	8095	0.1	0.0475	0.0024	0.0696	0.0033	0.0105	0.0002	73	77	68	3	67.2	1
10	494.9	581	42154	0.01	0.0478	0.0015	0.0696	0.0022	0.0104	0.0001	90	52	68	2	66.6	0.8
11	54.08	148	3683	0.04	0.0467	0.0029	0.0847	0.0051	0.0130	0.0002	36	102	83	5	83	1
12	31.3	1392	1699	0.8	0.0511	0.0049	0.0902	0.0079	0.0131	0.0003	245	157	88	7	84	2
14	346.66	307	29795	0.01	0.0472	0.0017	0.0689	0.0026	0.0105	0.0001	57	59	68	2	67	0.9
16	73.55	340	6537	0.1	0.0459	0.0026	0.0623	0.0034	0.0099	0.0002	-10	87	61	3	63	1
17	52.41	1178	2816	0.42	0.0451	0.0030	0.0951	0.0064	0.0148	0.0003	-12	114	92	6	95	2
18	73.60	114	4562	0.02	0.0488	0.0027	0.0951	0.0053	0.0140	0.0003	140	90	92	5	90	2

锆石 Hf 同位素组成分析是基于阴极发光 (CL) 图像和锆石 U-Pb 定年测试的基础上进行的。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析是在天津地质矿产研究所同位素实验室完成的,所用的测试仪器为 NEPTUNE 多接收器电感耦合等离子质谱仪 (MC-ICP-MS),利用 193nm FX 激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的束斑直径为 50 μm ,能量密度为 10 ~ 11J/cm²,频率为

8 ~ 10Hz。详尽的分析技术和实验参见耿建珍等 (2011) 的论述。样品 BM1148 和 DP1145 均在相同的测年样品上进行锆石 Hf 同位素分析,而样品 HTL1141 由于锆石颗粒较小且挑选颗粒不多,故在同一地区与其具有近似年龄的样品 HTL1146 上进行了锆石 Hf 同位素分析。分析结果见表 3。

表3 中-新生代花岗岩类的锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Hf isotopic data of zircon grains from the Mesozoic-Cenozoic granitoids

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
BM1148:18 个测点 加权平均年龄:83.4 ± 1.1 Ma, MSWD = 0.99											
1	84	0.0137	0.0004	0.282687	0.000019	0.282686	-3.0	-1.2	789	1229	-0.99
2	86	0.0156	0.0005	0.282620	0.000019	0.282619	-5.4	-3.5	884	1379	-0.99
3	80	0.0273	0.0008	0.282651	0.000021	0.282650	-4.3	-2.6	848	1314	-0.97
4	82	0.0159	0.0005	0.282663	0.000019	0.282662	-3.9	-2.1	825	1285	-0.98
5	86	0.0310	0.0009	0.282660	0.000019	0.282658	-4.0	-2.1	838	1290	-0.97
6	82	0.0201	0.0006	0.282625	0.000023	0.282624	-5.2	-3.4	879	1369	-0.98
7	91	0.0204	0.0006	0.282641	0.000019	0.282640	-4.6	-2.7	857	1328	-0.98
8	86	0.0203	0.0006	0.282621	0.000019	0.282620	-5.3	-3.5	884	1376	-0.98
9	83	0.0178	0.0005	0.282627	0.000019	0.282627	-5.1	-3.3	874	1364	-0.98
10	84	0.0194	0.0006	0.282645	0.000018	0.282645	-4.5	-2.7	851	1323	-0.98
11	83	0.0385	0.0011	0.282612	0.000017	0.282610	-5.7	-3.9	910	1400	-0.97
12	80	0.0352	0.0011	0.282643	0.000018	0.282641	-4.6	-2.9	866	1333	-0.97
13	83	0.0183	0.0006	0.282690	0.000018	0.282689	-2.9	-1.1	788	1223	-0.98
14	82	0.0216	0.0006	0.282634	0.000019	0.282633	-4.9	-3.1	868	1350	-0.98
15	87	0.0155	0.0005	0.282630	0.000018	0.282629	-5.0	-3.1	869	1355	-0.99
16	85	0.0173	0.0005	0.282621	0.000021	0.282620	-5.3	-3.5	883	1377	-0.98
17	83	0.0133	0.0004	0.282623	0.000018	0.282622	-5.3	-3.5	877	1373	-0.99
18	85	0.0121	0.0004	0.282658	0.000019	0.282658	-4.0	-2.2	828	1293	-0.99
DPI145:11 个测点 2 组加权平均年龄:85.4 ± 4.2 Ma, MSWD = 1.8; 66.1 ± 1.8 Ma, MSWD = 1.02											
1	81	0.0331	0.0009	0.282518	0.000021	0.282517	-9.0	-7.2	1036	1611	-0.97
5	83	0.0237	0.0006	0.282646	0.000022	0.282645	-4.4	-2.7	850	1322	-0.98
6	89	0.0423	0.0011	0.282525	0.000021	0.282523	-8.7	-6.8	1032	1592	-0.97
7	67.2	0.0736	0.0018	0.282300	0.000017	0.282297	-16.7	-15.3	1373	2112	-0.95
11	83	0.0295	0.0008	0.282379	0.000020	0.282378	-13.9	-12.1	1229	1922	-0.97
12	84	0.0289	0.0007	0.282376	0.000015	0.282375	-14.0	-12.2	1230	1929	-0.98
14	67	0.0388	0.0010	0.282479	0.000020	0.282478	-10.4	-8.9	1093	1708	-0.97
16	63	0.0456	0.0013	0.282398	0.000020	0.282396	-13.2	-11.9	1217	1894	-0.96
17	95	0.0162	0.0005	0.282604	0.000028	0.282603	-5.9	-3.9	906	1408	-0.98
18	90	0.1271	0.0038	0.282376	0.000030	0.282369	-14.0	-12.3	1338	1935	-0.89
HTL1146:13 个测点 加权平均年龄:55 ~ 70 Ma (未刊数据)											
2	78	0.0489	0.0013	0.282578	0.000022	0.282576	-6.9	-5.2	963	1481	-0.96
3	59	0.0525	0.0013	0.282587	0.000020	0.282586	-6.5	-5.3	949	1471	-0.96
4	81	0.0296	0.0008	0.282576	0.000020	0.282575	-6.9	-5.2	953	1481	-0.98
7	63.3	0.0457	0.0012	0.282378	0.000017	0.282377	-13.9	-12.6	1241	1937	-0.96
9	67.3	0.0307	0.0009	0.282568	0.000019	0.282567	-7.2	-5.8	965	1508	-0.97
10	88	0.0384	0.0011	0.282545	0.000018	0.282543	-8.0	-6.2	1004	1549	-0.97
11	87	0.0455	0.0011	0.282274	0.000019	0.282272	-17.6	-15.8	1386	2156	-0.97
12	79	0.0566	0.0015	0.282572	0.000025	0.282570	-7.1	-5.4	975	1493	-0.96
14	69	0.0387	0.0010	0.282602	0.000024	0.282601	-6.0	-4.5	921	1431	-0.97
15	94	0.1163	0.0027	0.282468	0.000018	0.282463	-10.8	-8.9	1163	1724	-0.92
16	76.8	0.0815	0.0019	0.282381	0.000019	0.282378	-13.8	-12.2	1262	1924	-0.94
17	92	0.0265	0.0007	0.282608	0.000020	0.282607	-5.8	-3.8	906	1403	-0.98
18	72	0.0223	0.0006	0.282580	0.000024	0.282579	-6.8	-5.3	943	1478	-0.98

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$. $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$. $t_{\text{DM}}^{\text{C}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$. $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$. 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; t 为锆石结晶年龄

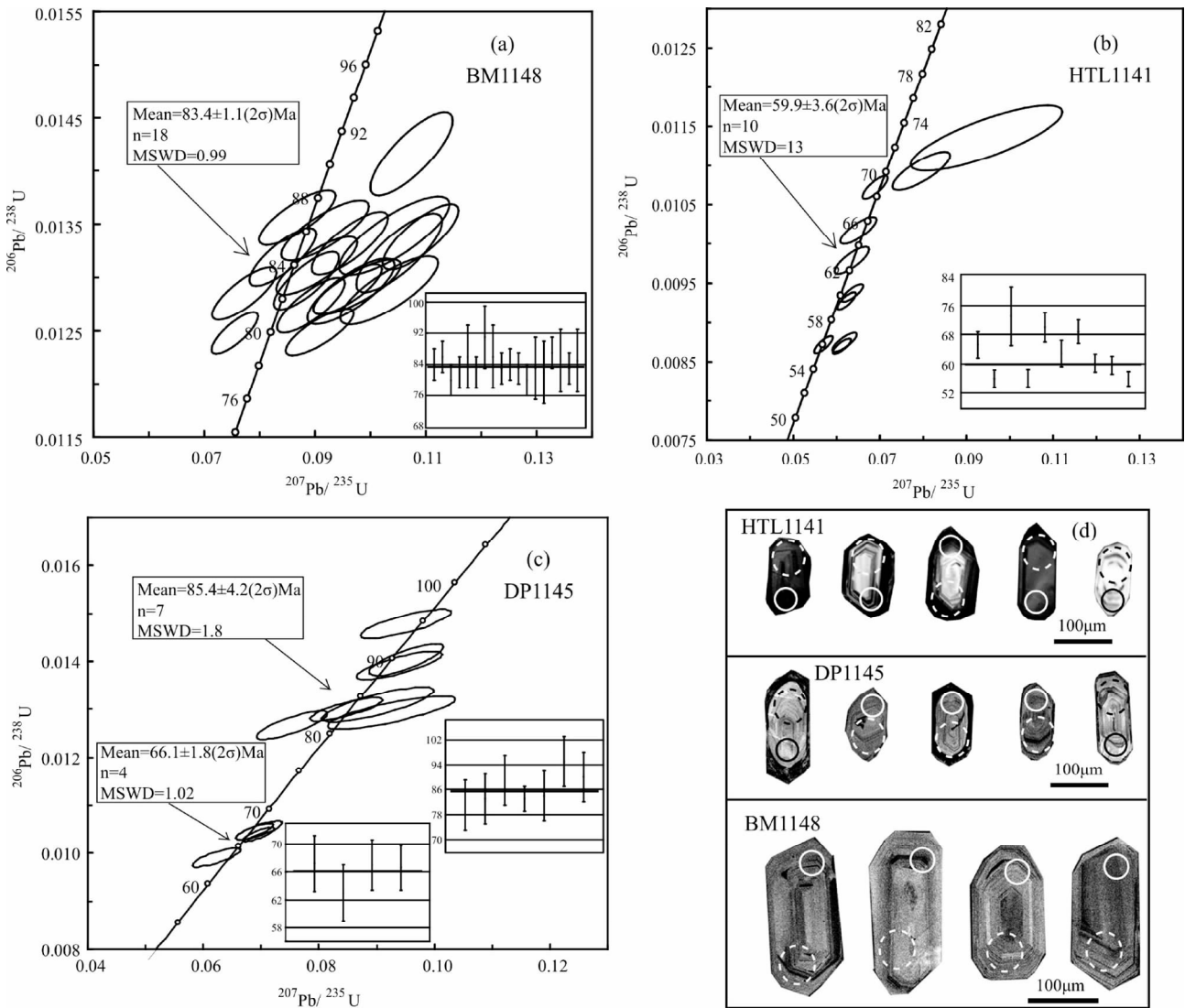


图3 中-新生代花岗岩类锆石阴极发光图像和U-Pb年龄谐和图

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircon grains and concordia plots of the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本文在详细调研的基础上,对岩体不同部位代表性样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年。样品中锆石颗粒自形程度高,多为长柱状晶体,部分短柱状,长约 100 ~ 200 μm ,长宽比为 1.2 : 1 ~ 2 : 1,锆石阴极发光图像可见清晰的生长环带(图 3d),锆石的 Th/U 比值绝大部分大于 0.1,为典型的岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003)。在分析过程中,我们选择锆石环带边部打点,在剔除个别异常点后,锆石的 U、Th、Pb 同位素成分数据及谐和年龄列于表 2。

样品 BM1148 中 18 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值

为 $83.4 \pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD = 0.99),在 U-Pb 年龄谐和图上分析点均分布在谐和线上或其附近(图 3a),显示很好的谐和性,表明锆石形成后 U-Pb 同位素体系是基本封闭的,没有 U 或 Pb 同位素的明显丢失或加入,测试结果真实可信。样品 HTL1141 中 10 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $59.9 \pm 3.6\text{Ma}$ (MSWD = 13),在 U-Pb 年龄谐和图上分析点均分布在谐和线上并且沿线分布(图 3b),可能是锆石中 U 含量过高的影响结果(表 2)。样品 DP1145 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值集中在两组,分别为 $85.4 \pm 4.2\text{Ma}$ (MSWD = 1.8) 和 $66.1 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 1.02)(图 3c),反应岩浆源区中含有晚白垩世的继承组分。本次测定的年龄结果均在允许误差范围内,可以确定蚌涉和桦桃林这两个岩株的形成年龄分别为 83 ~ 85Ma 和 60 ~ 66Ma,属晚白垩世和古新世。

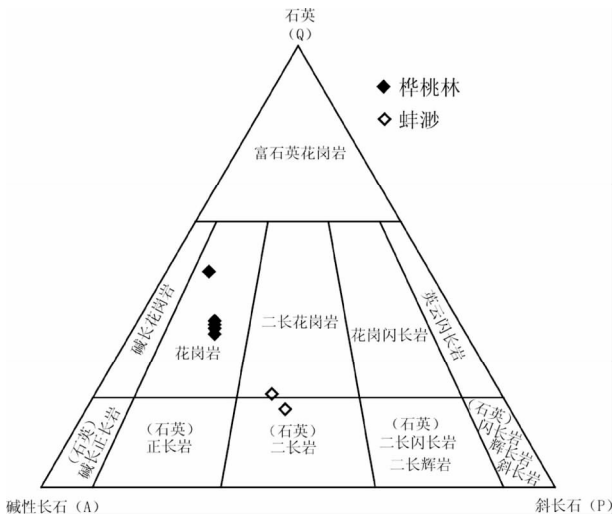


图4 中-新生代花岗岩类的 QAP 图解 (据 Streckeisen, 1976)

Fig. 4 QAP classification diagram for the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block (after Streckeisen, 1976)

4.2 全岩地球化学

根据常量元素化学成分计算的标准矿物进行岩石分类, 蚌渺岩体岩石类型为石英二长岩和二长花岗岩, 属二长岩向花岗岩的过渡类型, 桦桃林岩体为花岗岩 (图 4), 与岩相学特征相吻合。蚌渺岩体, SiO_2 为 64.92% ~ 65.06%, TiO_2 为 0.49% ~ 0.63%, Al_2O_3 为 15.08% ~ 16.19%, MnO 为 0.05% ~ 0.08%, MgO 为 2.01% ~ 2.49%, CaO 为 2.85% ~

3.08%, P_2O_5 为 0.26% ~ 0.39%, 全碱 ($K_2O + Na_2O$) 为 7.86% ~ 8.34%; 而桦桃林岩体, SiO_2 为 73.17% ~ 74.59%, TiO_2 为 0.06% ~ 0.12%, Al_2O_3 为 14.20% ~ 15.02%, MnO 为 0.04% ~ 0.06%, MgO 为 0.15% ~ 0.23%, CaO 为 0.29% ~ 0.59%, P_2O_5 为 0.25% ~ 0.35%, 全碱 ($K_2O + Na_2O$) 为 6.46% ~ 8.49% (表 1)。蚌渺岩体和桦桃林岩体都以全碱含量高为特征, $K_2O/Na_2O > 1$, 桦桃林岩体岩石系列属于高钾钙碱性系列, 蚌渺岩体更加倾向于钾玄岩系列 (图 5a), 它们的铝饱和指数 A/CNK 的值均大于 1.1, 属铝过饱和系列, 投点均落在 I-S 型花岗岩分界的 S 型一侧 (图 5b), 标准矿物计算结果中出现刚玉分子, 也说明它们可能是 S 型花岗岩。相对于桦桃林花岗岩, 蚌渺岩体的 MgO 、 CaO 和 TiO_2 较高, 分别表现为样品 BM1148-1 标准矿物计算后出现透辉石和含量较高的铁钛矿 (表 1)。

桦桃林岩体的稀土总量 $\sum REE$ 在 $30.7 \times 10^{-6} \sim 63.5 \times 10^{-6}$ 之间, 明显低于蚌渺岩体稀土总量 ($294 \times 10^{-6} \sim 371 \times 10^{-6}$) (表 1), 桦桃林岩体 $(La/Yb)_N$ 值 (5.4 ~ 8.5) 同样低于蚌渺岩体 $(La/Yb)_N$ 值 (65.2 ~ 67.2), 说明岩石轻/重稀土分馏强烈, 而且前者较后者分馏弱; 桦桃林岩体 δEu 值 (0.17 ~ 0.35) < 1 , 具有明显的负铕异常, 岩浆结晶分异作用十分明显, 蚌渺岩体 δEu 值 (0.91 ~ 1.04) ≈ 1 , 表明岩浆结晶分异不明显 (图 6a)。微量元素原始地幔标准化图解中 (图 6b), 蚌渺岩体富集 Rb、Th 等大离子亲石元素 (LILEs) 和 Pb, 相对亏损 Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素 (HFSEs)。桦桃林岩体富集 Rb、U、Pb 和 P, 相对亏损 Nb、Nd、Zr、Ti、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。蚌渺岩体和桦桃林岩体中高场强元素含量分别为, Zr $33.6 \times 10^{-6} \sim 210 \times 10^{-6}$; Hf $1.42 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$; Nb $22 \times$

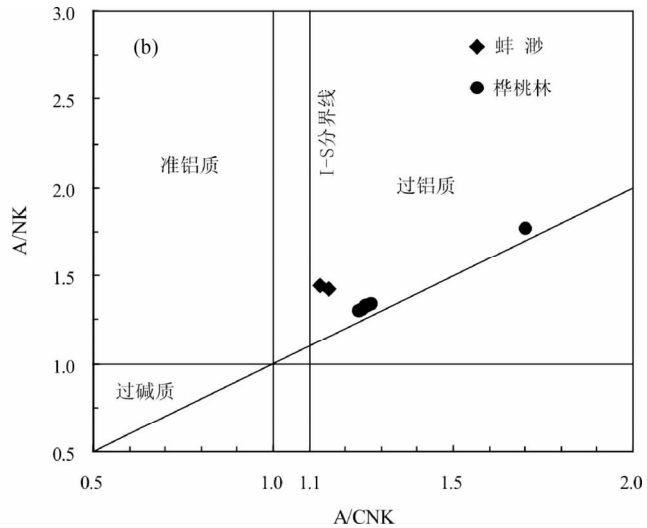
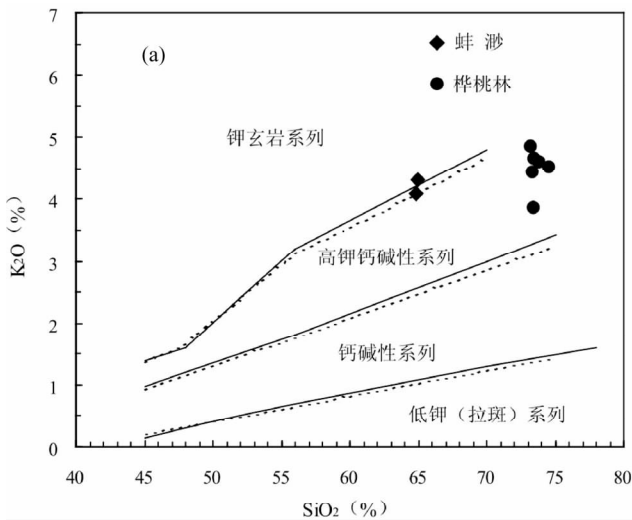


图5 中-新生代花岗岩类的 K_2O-SiO_2 图解 (a, 实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985) 和 $A/CNK-A/NK$ 图解 (b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 K_2O-SiO_2 (a, after Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985) and $A/CNK-A/NK$ (b, after Maniar and Piccoli, 1989) plots for the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

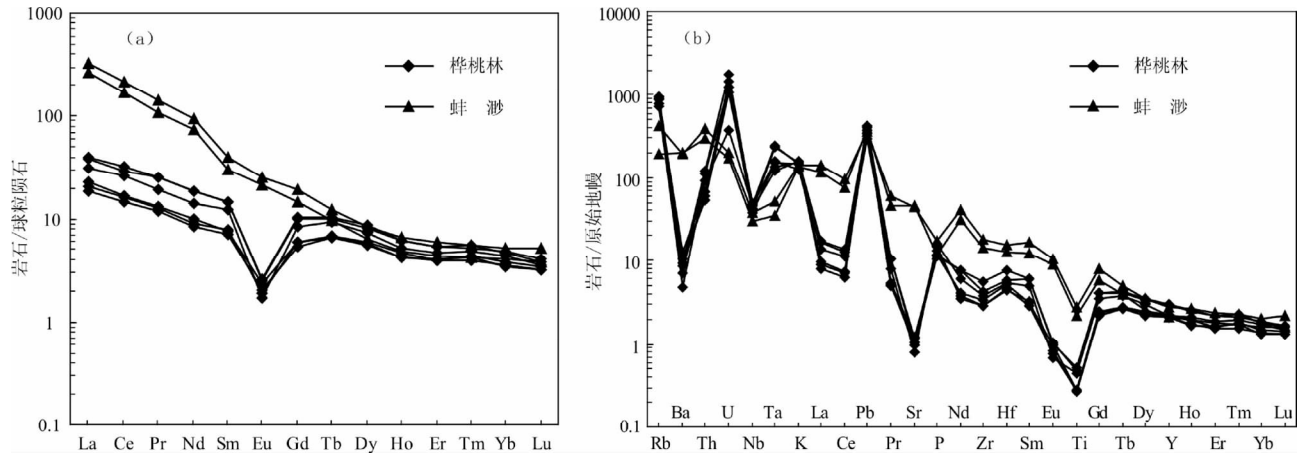


图6 中-新生代花岗岩类的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

$10^{-6} \sim 37.2 \times 10^{-6}$, 其富集程度基本相当于原始地幔的十倍, 与 S 型花岗岩接近, 低于典型 A 型花岗岩, 高于 I 型花岗岩。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

本文分析的 3 件样品锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.1271 ~ 0.0121 和 0.0038 ~ 0.0004 (表 3), $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值几乎都小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (吴福元等, 2007)。考虑到 3 件样品的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 的平均值在 -0.99 ~ -0.89 之间, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.34, Amelin *et al.*, 2000) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.72, Vervoort *et al.*, 1996), 故二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)。样品 BM1148 共 18 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化 -3.9 ~ -1.1 之间, 对应的地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 为 1.4 ~ 1.2Ga; 样品 DP1145 和 HTL1146 共 23 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显示较大的变化范围, 原因可能是这两件样品中存在来自于蚌渺岩体的继承锆石, 对应于蚌渺岩体年龄范围的锆石颗粒 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 -12.3 ~ -2.7, 而年龄较小的桦桃林岩体的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化在 -15.3 ~ -5.2, 对应的地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 分别为 2.0 ~ 1.3Ga 和 2.0 ~ 1.5Ga (表 3、图 7)。

5 讨论

5.1 岩浆侵位时代

蚌渺岩体侵入的最高层位为泥盆系, 桦桃林岩体侵位于蚌渺岩体及寒武系中, 它们的侵位时代尚未被精确的确定。早期研究利用 Rb-Sr 全岩等时线方法和白云母 K-Ar 法, 认为桦桃林岩体侵位于 64 ~ 66Ma (陈吉琛, 1987), 最近, Chen *et*

al. (2007) 采用 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法, 获得桦桃林岩体的侵位时代为 61Ma 和 78Ma, 年龄差距很大, 而蚌渺岩体尚未有定年数据。本文采用 LA-ICP-MS 定年方法, 在蚌渺岩体 1 件代表性的样品中获得了谐和度很好的年龄 $83.4 \pm 1.1\text{Ma}$ (BM1148), 在桦桃林岩体 2 件代表性样品中获得了 2 组年龄, 一组是较年轻的 $59.9 \pm 3.6\text{Ma}$ 和 $66.1 \pm 1.8\text{Ma}$, 一组是和蚌渺岩体相当的 $85.4 \pm 4.2\text{Ma}$, 可能是来源于蚌渺的继承锆石, 这也可能正是 Chen *et al.* (2007) 获得的两个年龄差别很大的原因。上述可靠的锆石 U-Pb 年龄数据表明, 蚌渺岩体侵位于 83 ~ 85Ma, 桦桃林岩体侵位于 60 ~ 66Ma, 分别形成于两次岩浆事件, 即晚白垩世和古新世。

5.2 源区性质

随着 Hf 同位素测试技术的成熟, 近年来锆石原位 Hf 同位素示踪研究越来越受到人们的重视 (Vervoort *et al.*, 1996; Amelin *et al.*, 2000; Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002)。Hf 同位素也被应用于岩石成因的探讨。研究表明 (Peter and Roland, 2003; 吴福元等, 2007), 不同地球化学储库 (如亏损地幔、球粒陨石和地壳等) 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 组成以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显不同, 如具有低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石往往指示其源区为地壳或经过地壳的混染, 而具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石直接来自地幔或由幔源物质分异的新生壳源物质。蚌渺岩体和桦桃林岩体具有负的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-U-Pb 年龄图解 (图 8) 中, 所有样品点均落在球粒陨石化演线附近及以下的地壳区域, 但蚌渺岩体具有相对较高的负值, 其平均值为 -5.1, 而桦桃林岩体平均值为 -9.3, 明显低于蚌渺岩体, 两者具有不明显的演化作用 (图 8), 表明蚌渺岩浆可能来源于古元古代-中元古代新生地壳的重熔, 而桦桃林岩体则是在中生代进一步成熟陆壳的基础上深熔而成。

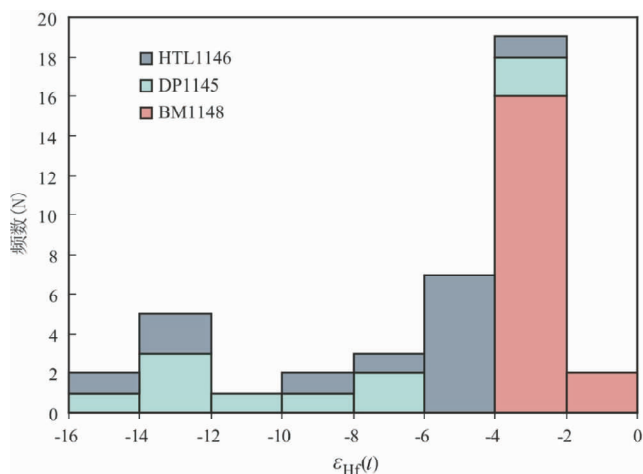


图7 中-新生代花岗岩类的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与 U-Pb 年龄值直方图

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and U-Pb ages histograms of the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

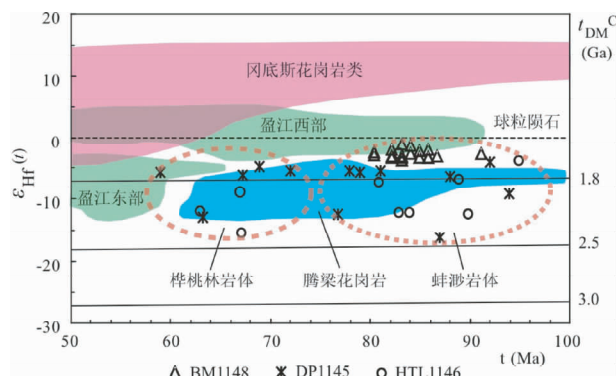
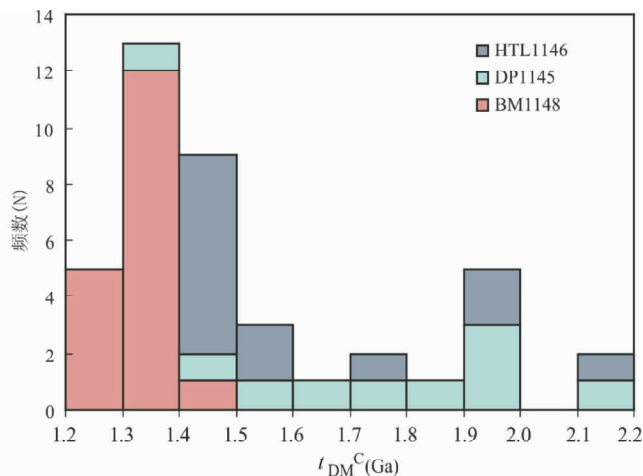


图8 中-新生代花岗岩类的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-U-Pb 年龄图解

图中阴影部分数据来自 Chu *et al.*, 2006 和 Xu *et al.*, 2012

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vs. U-Pb ages plot of the Mesozoic-Cenozoic granitoids in Baoshan Block

两个岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均具有较大的变化范围,可能暗示其源区发生了不同程度幔源物质的注入(朱弟成等, 2009; Zhu *et al.*, 2009, 2011, 2012)。另外,据研究表明(Sylvester, 1998),过铝质花岗岩中的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值可以作为源区岩石部分熔融温度的指示剂,当岩石的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值 >100 时,源区部分熔融温度 $<875^\circ\text{C}$,当岩石的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值 <100 时,源区部分熔融温度 $>875^\circ\text{C}$,且 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值与形成温度成反消长关系。蚌渺岩体的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为24~33,均小于100,桦桃林岩体的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为120~245,均大于100。结合全岩锆饱和温度(蚌渺771~785 $^\circ\text{C}$,桦桃林678~727 $^\circ\text{C}$)(表1),表明蚌渺岩体岩浆的形成温度相对桦桃林岩体要较高一些,这也为蚌渺岩体熔融程度高于桦桃林岩体提供了依据,也就为两个岩体均具有较大变化范围的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值提供了佐证。

5.3 岩浆事件及其构造意义

本文的年代学数据表明,滇西保山蚌渺-桦桃林地区的岩浆活动时限为晚白垩世-古新世。实际上,晚白垩世-古新世岩浆活动在保山西缘的腾冲地块非常普遍(吕伯西等, 1993; 杨启军等, 2009; Xu *et al.*, 2012),以腾梁花岗岩和盈江花岗岩为典型代表,腾梁花岗岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为78~84Ma(江彪等, 2012),锆石 U-Pb 年龄为68~76Ma 和53Ma(杨启军等, 2009; Xu *et al.*, 2012),盈江花岗岩锆石 U-Pb 年龄为53~66Ma(Xu *et al.*, 2012)。在南冈底斯带东段朗县-米林一带花岗岩类的侵位年龄为79~84Ma(管琪等, 2010),中西部曲水、日喀则地区也发现了晚白垩世岩浆活动(81~87Ma, Ji *et al.*, 2009),大规模的林子宗火山岩形成于65~40Ma(董国臣等, 2002; 莫宣学等, 2003)。这些研究表明,保山地块与腾冲地块以及拉萨地块在晚白垩世-古新世存在几乎同期的岩浆活动。

冈底斯花岗岩成分复杂,以准铝质 I 型花岗岩为主,含有部分 S 型花岗岩, I 型花岗岩的 ϵ_{Nd} 均为正值(Chung *et al.*, 2005),花岗岩中铁镁质包体发育,岩浆混合特征明显(江万等, 1999; Mo *et al.*, 2007; 董国臣等, 2011),表明冈底斯岩浆活动频繁,壳幔物质交换作用强烈,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本为正(图8),代表新生地壳的熔融产物。腾梁花岗岩以过铝-强过铝 S 型花岗岩为主,含有少量 I 型花岗岩,花岗岩中铁镁质微粒包体较少,岩浆混合特征不明显,地幔对花岗岩形成的贡献不大,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负(图8),主要由古老中下地壳物质熔融而成(杨启军等, 2009)。保山蚌渺-桦桃林花岗岩属强过铝质 S 型花岗岩,未见铁镁质包体,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负(图8),来源于古元古代-中元古代地壳的熔融(本文)。以上研究表明,保山地块与拉萨地块在中-新生代岩浆活动上具有明显的不同,不存在对比性,而与腾冲地块上同期的岩浆活动在地球化学特征上存在共同点。

腾冲地块于燕山期与保山地块碰撞拼贴(莫宣学等, 1993; 钟大赟等, 1998), 白垩纪末期新特提斯洋开始闭合, 随后印度板块与欧亚大陆开始碰撞, 时间为 65Ma(莫宣学等, 2003), 这些俯冲碰撞事件造成了腾冲与保山地区的现今构造格局, 地块上中-新生代的花岗岩类岩浆作用正是在这样大的构造背景下应运而生的。

6 结论

(1) 滇西保山地块蚌渺岩体与桦桃林岩体分别形成于 83 ~ 85Ma 和 60 ~ 66Ma, 表明该地区在晚白垩世和古新世发生了两次不同的岩浆作用。

(2) 蚌渺石英二长岩、二长花岗岩和桦桃林花岗岩属高钾钙碱性系列到钾玄岩系列, 具有壳源过铝质 S 型花岗岩特征。蚌渺岩体可能来源于古元古代-中元古代新生地壳的熔融, 桦桃林岩体则是在中生代进一步成熟陆壳的基础上深熔而成。

(3) 保山地块、腾冲地块和拉萨地体在中-新生代存在几乎同期的岩浆活动, 但保山地块与拉萨地体由于岩石地球化学特征不同, 不存在对比性, 与腾冲地块存在共同点。保山地块与腾冲地块上的中-新生代岩浆作用与新特提斯洋的闭合和印欧大陆的碰撞息息相关。

References

Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4205 - 4225

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148 (1 - 2): 243 - 258

Boynnton WV. 1984. Geochemistry of the rare-earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63 - 114

Chen JS. 1987. Discussion on the age division and the selects of isotopic age determination for granitic rock in western Yunnan. *Yunnan Geology*, 6(2): 101 - 113 (in Chinese with English abstract)

Chen FK, Li XH, Wang XL, Qiu LL and Siebel W. 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1179 - 1194

Chen GD, Peng SL, Dai TG, Yang XY, Wu YZ, Lai JQ, Liu JS, Liu YN, Wang L, Yang M, Hu B and Dong J. 2004. Copper-polymetallic Crustbody Geotectonics Metallogeny of Yunnan Province. Changsha: Central South University Publishing House, 1 - 423 (in Chinese)

Chu MF, Chung SL, Song B, Liu DY, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji JQ and Wen DJ. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745 - 748

Chung SL, Chu MF, Zhang YQ *et al.* 2005. Tibet tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Science Review*, 61(3 - 4): 173 - 196

Dong GC. 2002. Linzizong volcanic rocks in Linzhou volcanic basin, Tibet and implication for India-Eurasia collision process. Ph. D.

Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese)

Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Xie XF and Dong ML. 2011. The Neocene magmatism from Namuru intrusion in western Gandese, Tibet and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1983 - 1992 (in Chinese with English abstract)

Dong ML, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Nie F, Xie XF, Wang X and Hu ZC. 2012. Geochronology and geochemistry of the Early Palaeozoic granitoids in Baoshan block, western Yunnan and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1453 - 1464 (in Chinese with English abstract)

Geng JZ, Li HK, Zhang J, Zhou HY and Li HM. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508 - 1513 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 - 147

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3 - 4): 237 - 269

Guan Q, Zhu DC, Zhao ZD, Zhang LL, Liu M, Li XW, Yu F and Mo XX. 2010. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo-Tethyan ridge subduction? *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2165 - 2179 (in Chinese with English abstract)

Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews of Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27 - 62

Ji WQ, Wu FY, Chung SL, Li JX and Liu CZ. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3 - 4): 229 - 245

Jiang B, Gong QJ, Zhang J and Ma N. 2012. Late Cretaceous aluminium A-type granites and its geological significance of Dasongpo Sn deposit, Tengchong, West Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1477 - 1492 (in Chinese with English abstract)

Jiang W, Mo XX, Zhao CH, Guo TY and Zhang SQ. 1999. Geochemistry of granitoid and its mafic microgramular enclave in Gandese belt, Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 89 - 97 (in Chinese with English abstract)

Jin SC and Zhuang FL. 1988. Study of melting inclusion in granites at Longling in Luxi area. *Journal of Kunming Institute of Technology*, 13(5): 1 - 15 (in Chinese with English abstract)

Jin XC. 2002. Permo-Carboniferous sequences of Gondwana affinity in southwest China and their paleogeographic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 633 - 646

Li WC, Pan GT, Hou ZQ *et al.* 2010. Archipelagic-basin, Forming Collision Theory and Prospecting Techniques along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 490 (in Chinese)

Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Huang ZL, Lai SC, Yuan HL, Liu XM, Coulson IM, Feng GY, Wang T and Qi YQ. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan block, western Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2 - 3): 168 - 182

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008a. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1 - 2): 34 - 43

Liu YS, Zong KQ, Kelemen PB and Gao S. 2008b. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates. *Chemical Geology*, 247(1 - 2): 133 - 153

Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite

- interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CQ, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546
- Lü BX, Wang Z, Zhang ND, Duan JZ, Gao ZY, Shen GF, Pan CY and Yao P. 1993. Granitoids in the Sanjiang Region (Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Region) and Their Metallogenic Specialization. Beijing: Geological Publishing House, 1-238 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643
- Middlemost EAK. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1-266
- Metcalfe I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605-623
- Mo XX, Lu FX, Shen SY, Zhu QW and Hou ZQ. 1993. Sangjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 178-235 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Dong GC, Zhou S, Guo TY, Zhang SQ and Wang LL. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135-147
- Mo XX, Hou ZQ, Niu YL *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision; Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1-2): 225-242
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81
- Peter DK and Roland M. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327-341
- Scherer EE, Cameron KL and Blicher-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19): 3413-3432
- Sengör AMC, Altiner D, Cin A, Ustaomer T and Hsü KJ. 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. In: Audley-Charles MG and Hallam A (eds.). *Gongwana and Tethys*. Geological Society of London, Special Publications, 37: 119-181
- Shen SZ, Shi GR and Fang ZJ. 2002. Permian brachiopods from the Baoshan and Simao blocks in western Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 665-682
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Streckeisen AL. 1976. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition; A provisional attempt: *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*, 1: 1-15
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29-44
- Ueno K. 2000. Permian fusulinacean faunas of the Sibumasu and Baoshan blocks: Implications for the paleogeographic reconstruction of the Cimmerian continent. *Geosciences Journal*, 4: 160-163
- Vervoort JD, Patchett PJ, Gehrels GE and Nutman AP. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379(6566): 624-627
- Wang XD, Ueno K, Mizuno Y and Sugiyama T. 2001. Late Paleozoic faunal, climatic, and geographic changes in the Baoshan block as a Gondwana-derived continental fragment in southwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 170(3-4): 197-218
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Yang QJ, Lan JB, Luo ZY, Huang XL, Shi YN and Xie LW. 2012. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengchong-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 151-175
- Yang QJ, Xu YG, Huang XL, Luo ZY and Shi YR. 2009. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan; Tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1092-1104 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Xie YW and Cheng ZL. 1990. Rb-Sr isochron age for tin-bearing granites in the Sanjiang region. *Acta Petrologica Sinica*, 6(1): 75-81 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL. 1998. Paleo-Tethyan Orogenic Belt in the Western Parts of the Sichuan and Yunnan Provinces. Beijing: Science Press, 1-231 (in Chinese)
- Zhu DC, Mo XX, Niu YL, Zhao ZD, Wang LQ, Liu YS and Wu FY. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3-4): 298-312
- Zhu DC, Mo XX, Wang LQ, Zhao ZD, Niu YL, Zhou CY and Yang YH. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1223-1239
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Mo XX, Chung SL, Hou ZQ, Wang LQ and Wu FY. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2): 241-255
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Yildirim D, Wang Q, Ji WH, Dong GC, Sui QL, Liu YS, Yuan HL and Mo XX. 2012. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin. *Chemical Geology*, 328: 290-308

附中文参考文献

- 陈吉琛. 1987. 滇西花岗岩类时代划分及同位素年龄值选用的讨论. *云南地质*, 6(2): 101-113
- 陈国达, 彭省临, 戴塔根, 杨心宜, 吴延之, 赖健清, 刘继顺, 刘石年, 王力, 杨牧, 胡斌, 董军. 2004. 云南铜-多金属壳体大地构造成矿学. 长沙: 中南大学出版社, 1-423
- 董国臣. 2002. 林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度-欧亚大陆碰撞信息研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 谢许峰, 董美玲. 2011. 冈底斯带西段那木如岩体始新世岩浆作用及其构造意义. *岩石学报*, 27(7): 1983-1992
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 聂飞, 谢许峰, 王霞, 胡兆初. 2012. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义. *岩石学报*, 28(5): 1453-1464
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10): 1508-1513
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 张亮亮, 刘敏, 李小伟, 于枫, 莫宣学. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物? *岩石学报*, 26(7): 2165-2179

- 江彪, 龚庆杰, 张静, 马楠. 2012. 滇西腾冲大松坡锡矿区晚白垩世铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义. 岩石学报, 28(5): 1477-1492
- 江万, 莫宣学, 赵崇贺, 郭铁鹰, 张双全. 1999. 青藏高原冈底斯带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(1): 89-97
- 金世昌, 庄凤良. 1988. 龙陵-潞西地区花岗岩矿物中熔融包裹体研究. 昆明理工学报, 13(5): 1-15
- 李文昌, 潘桂堂, 侯增谦等. 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术. 北京: 地质出版社, 1-490
- 吕伯西, 王增, 张能德, 段建中, 高子英, 沈敢富, 潘长云, 姚鹏. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性. 北京: 地质出版社, 1-328
- 莫宣学, 陆凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 178-235
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135-147
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇, 石玉若. 2009. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 25(5): 1092-1104
- 张玉泉, 谢应雯, 成忠礼. 1990. 三江地区含锡花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄. 岩石学报, 6(1): 75-81
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1-231
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀龄, 周长勇, 杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 中国科学(D 辑), 39(7): 833-848