

滇西腾冲地区滇滩 A 型花岗岩的年代学、
地球化学及其构造意义唐婉丽^{1,2}, 许继峰^{1,3}, 陈建林^{1,3*}, 谈荣钰^{1,2}, 黄文龙^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要: 云南腾冲地区晚白垩世(81 Ma)滇滩花岗岩具有类似于典型 A 型花岗岩的地球化学组成特征, 如高 $K_2O + Na_2O$ (6.37%~8.68%) 和低 Al_2O_3 (最高为 13.1%)、 P_2O_5 (< 0.01%) 含量, 明显亏损 Ba、Sr、Ti、Eu 等元素; 同时具有明显高的 K_2O/Na_2O (除 15DT-11 为 56.9, 其余为 1.51~1.58)、 $FeO/(FeO + MgO)$ (0.76~0.90) 和 $10000Ga/Al$ (3.26~3.72) 比值。另外, 研究区 A 型花岗岩地球化学组成与实验岩石学研究结果相吻合, 如具有较低的 CaO (0.65%~0.78%)、 Al_2O_3 (12.40%~13.10%) 和 MgO (0.11%~0.32%) 含量等。滇滩花岗岩上述地球化学组成特征, 很可能暗示其为英云闪长质或花岗闪长质原岩部分熔融的产物。结合青藏高原南部和东南部广泛发育的晚白垩世岩浆作用及区域构造背景, 滇滩 A 型花岗岩很可能为陆-陆板块碰撞后因伸展作用引起的地幔物质上涌增温导致地壳熔融产生的一期重要岩浆活动。

关键词: 晚白垩世; 地球化学; A 型花岗岩; 伸展作用; 滇滩; 藏东南**中图分类号:** P588.121; P597.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0379-1726(2018)01-0001-13Implications of the geochronology and geochemistry of Diantan
A-type granites in the Tengchong areaTANG Wan-li^{1,2}, XU Ji-feng^{1,3}, CHEN Jian-lin^{1,3*}, TAN Rong-yu^{1,2} and HUANG Wen-long^{1,2}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The Late Cretaceous (81 Ma) Diantan granites, developed in the Tengchong area of the Yunnan Province, have some affinities with typical A-type granites, such as high $K_2O + Na_2O$ concentration (6.37%–8.68%), low Al_2O_3 (< 13.1%) and P_2O_5 (< 0.01%) concentrations, obvious depletions in Ba, Sr, Ti, Eu elements in multi-element patterns normalized to primitive mantle plots, and high K_2O/Na_2O (except 15DT-11 is 56.9, and the rest is 1.51–1.58), $FeO/(FeO + MgO)$ (0.76–0.90), and $10000Ga/Al$ (3.26–3.72) ratios. In addition, the major element contents of Diantan granites are similar to the experimental petrology results of previous researches. The geochemical characteristics of the Diantan granites suggest that they probably resulted from partial melting of tonalitic or granodioritic material. The Diantan A-type felsic magmatism, combined with the widespread Late Cretaceous magmatism that occurred in southern and southeastern Tibet, imply that the Late Cretaceous magmatism developed in an extension setting during continental-continental collision, which was triggered by the upwelling mantle material.

Key words: Late Cretaceous; geochemistry; A-type granites; extension; Diantan; southeastern Tibet

收稿日期(Received): 2016-12-21; 改回日期(Revised): 2017-04-09; 接受日期(Accepted): 2017-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB45260201); 国家深部专项(2016YFC0600305); 国家自然科学基金(41373035, 41573024); 中国地质大调查项目(DD20160024-06)

作者简介: 唐婉丽(1991-), 女, 博士研究生, 地球化学专业。E-mail: tangwanli@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Jian-lin, E-mail: lzdxchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290753

0 引言

三江地区属于环球特提斯构造域的重要组成部分(图 1a), 位于阿尔卑斯-喜马拉雅巨型造山带东段弧形转弯处, 濒临特提斯构造域与太平洋构造域交接部位^[1]。该区受到太平洋板块、印度洋板块和欧亚板块的共同影响^[1], 经历了特提斯大洋形成演化、印度-欧亚大陆碰撞以及高原隆升的复杂过程。腾冲地块、保山地块和拉萨地块广泛分布晚白垩世-古近纪岩浆活动, 代表了新特提斯演化阶段的一次重要岩浆事件, 是中外地质学家研究特提斯演化的良好场所和地学领域关注的热点。腾冲及其邻区的岩浆岩带作为青藏高原冈底斯花岗岩带的东南延伸部分, 前人已深入研究该区及邻区的中-新生代岩浆活动, 识别出区域上出露的与碰撞拼贴有关的花岗岩, 如腾梁 S 型花岗岩^[2, 3]、临沧 S 型花岗岩^[4]、盈江 S 型和 I 型花岗岩^[3]、保山蚌渺-桦桃林 S 型花岗岩^[5], 以及白垩世和古新世的同碰撞花岗岩^[2], 并提出燕山期腾冲地块与保山地块碰撞拼贴^[6, 7]、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 65 Ma^[8]。但是这些碰撞地质事件之间是否存在短暂的地壳拉张作用, 并且是否发育与这期伸展作用相联系的 A 型花岗岩等问题还鲜有研究。尽管江彪等^[9]发现腾冲古永复式岩体内发育有与锡成矿作用密切的 A 型花岗岩, 但对其成因机制、源区属性、构造环境及动力学背景尚不明确。

因此, 本文以位于云南三江地区波密-腾冲岩浆弧带的滇滩花岗岩体为研究对象, 对其进行全岩地球化学分析, 结合锆石 U-Pb 测年数据, 揭示滇滩花岗岩的成因机制和源区属性, 探讨三江地区燕山期的构造环境和深部动力学背景, 为三江地区燕山期的构造演化提供地球化学方面的制约。

1 区域地质背景

腾冲地块在大地构造位置上位于青藏高原中特提斯洋、新特提斯密支那洋相继俯冲消亡碰撞形成的怒江和密支那缝合带之间(图 1a)^[10]。在中生代燕山期, 腾冲地块与保山地块发生俯冲-碰撞拼贴^[7], 而在新生代喜马拉雅早期又与印度板块发生俯冲-碰撞^[11], 并引发造山带中块体发生大规模旋转、逃逸和走滑^[12], 形成青藏高原东南缘大型走滑构造变形带的重要组成部分。腾冲地块处于印度板块俯冲碰撞的最前缘, 构造变形明显, 岩浆活动频繁, 特别是中-新生代岩浆岩出露面积广^[13]。

腾冲地块变质基底主要由新元古代-早中生代绿片岩相角闪岩相花岗质片麻岩、角闪岩、混合岩、大理岩和片岩组成, 动力变形变质特征明显, 走滑剪切构造变形发育^[15]。新生代地层以角度不整合覆盖于绿片岩相-角闪岩相元古代-早中生代变沉积岩、岩浆岩之上^[15], 沉积地层以砂岩、泥质岩、泥质灰岩夹薄煤层为特征^[15], 侏罗系-白垩系的缺失显示这一时期腾冲地块处于隆升剥蚀状态, 与腾冲地块

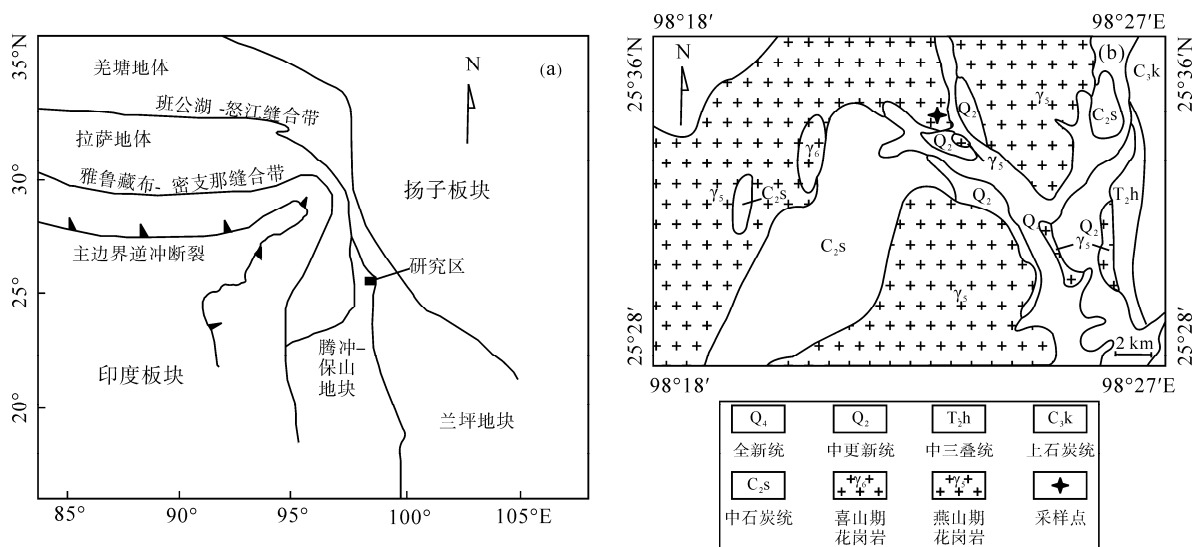


图 1 腾冲地区所处大地构造位置图(a)及滇滩花岗岩地质简图(b) (据文献^[14]修改)

Fig.1 Simple geological map of the Tengchong area, western Yunnan (a) and simplified geological map of the Diantan granites (b)

和保山孟连地块、缅甸地块的挤压碰撞隆升时期一致。区内岩浆活动强烈, 时代上具有多期性, 以中-新生代岩浆岩为主, 形成了颇具规模的复式岩基、基性-超基性岩带及火山岩带; 空间上具有分带性, 构成大致平行于金沙江、班公-怒江结合带的一系列大致南北向的岩浆岩带^[16]。

本文重点研究腾冲地块北部波密-腾冲岩浆弧带的滇滩花岗岩体(图 1b)。滇滩花岗岩体出露于云南保山市腾冲县滇滩镇西北(25°32'8"N, 98°23'20"E), 直线距离约 2 km, 该岩体出露面积小, 无明显风化和蚀变作用, 岩石类型主要为黑云母正长花岗岩(图 2), 肉红色, 具中粗粒结构, 显微文象结构, 块状构造。矿物成分主要为斜长石(10%)+钾长石(60%)+石英(20%)+黑云母(<10%), 副矿物组合为锆石+磷灰石+磁铁矿。斜长石自形程度较好, 0.5~3 mm, 发育聚片双晶, 含量约占 10%; 钾长石含量约占 60%, 多为正长石和微斜长石, 其中正长石自形-半自形, 0.5~3 mm, 发育卡斯巴双晶, 多发生高岭土化、泥化, 表面呈土红褐色, 微斜长石发育格子状双晶; 石英为烟灰色, 一般呈他形粒状体, 1~3 mm, 发育裂隙, 在薄片可见到石英晶体呈棱角状的外形规律的排列在

钾长石晶体中, 形成显微文象结构; 黑云母为黑色, 半自形片状结构, 0.5~3 mm, 多色性明显。

2 分析方法

选择新鲜、无蚀变的滇滩花岗岩样品进行分析测试。样品的主元素、微量元素和锆石 U-Pb 定年在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。选取本次所采的具有代表性的晚白垩世花岗岩样品 5 个, 去除风化面, 手工碎至 1~5 mm, 用 1% 的稀 HCl 溶液浸泡 3 h, 去除样品中的包体及碳酸盐物质, 然后用 Milli-Q 水反复淋洗直至碎块表面无明显杂质。清洗完成后, 将样品碎块烘干备用。主微量分析测试要求样品粉末的颗粒应小于 200 目, 因此选取约 50 g 的洗净的样品颗粒, 放于不锈钢球磨机碾磨至 200 目粉末。在样品粉末进行测试之前, 用鼓风干燥机在 105°C 的条件下将样品烘干。主元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF) 分析, 微量元素采用高温高压消解并利用 PEElan6000 型 ICP-MS 分析。主元素和微量元素的分析偏差在 5% 以内。相关分析方法和程序参见刘颖等^[17]和涂湘林等^[18]。

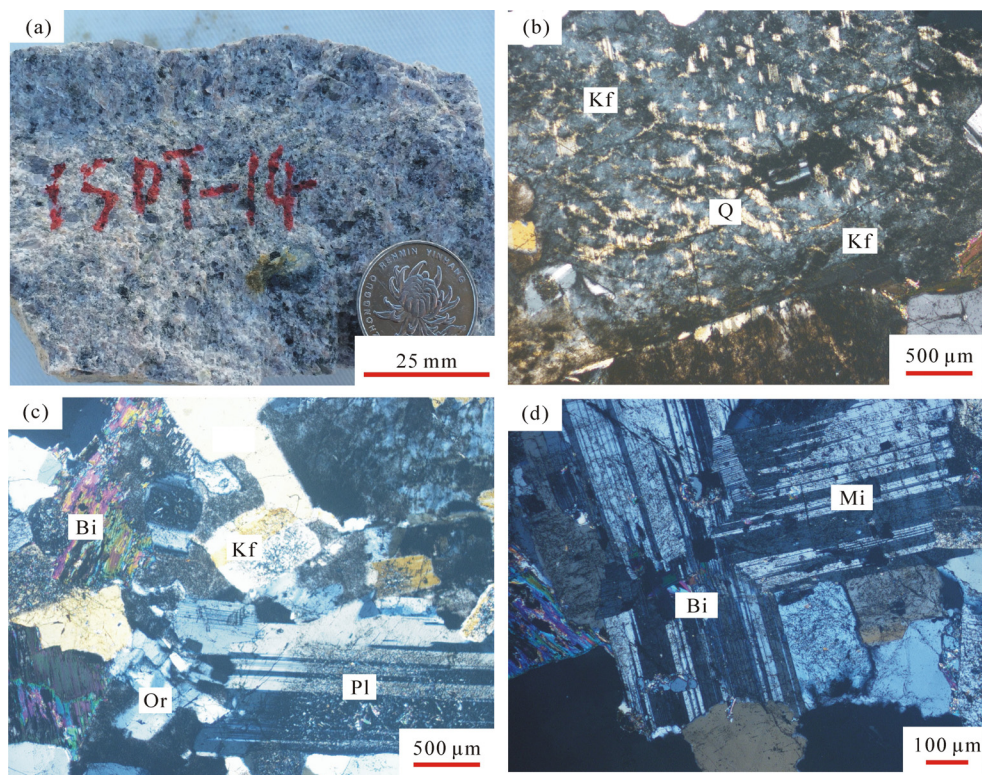


图 2 滇滩花岗岩手标本(a)及显微照片(b、c、d)

Fig.2 Hand specimen (a) and micro-scale (b, c, d) photographs of the Diantan granites

(a) 滇滩黑云母二长花岗岩手标本(15DT-14); (b) 显微文象结构(15DT-12, 正交镜下); (c) 矿物成分(15DT-13, 正交镜下); (d) 微斜长石的格子状双晶(15DT-15, 正交镜下)。矿物代号: Q-石英; Kf-钾长石; Bi-黑云母; Pl-斜长石; Or-正长石; Mi-微斜长石。

锆石挑选和锆石阴极发光照相在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。锆石制靶完成后,在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室利用激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)实验室进行 U-Pb 锆石定年。测试所用激光剥蚀系统为 193nmArF-excimer 激光器的 GeoLas2005, 激光束直径为 30 μm , 以氦气作为剥蚀物质载气。对分析数据的离线处理(包括对样品的空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量和年龄计算)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 等^[19-20]。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot 程序^[21]完成。

3 分析结果

3.1 滇滩花岗岩的形成年龄

腾冲地区中酸性岩广泛出露, 主要表现为黑云母花岗岩和二长花岗岩, 代表性岩体如, 古永岩基、小龙河岩体、明光岩体、滇滩岩体、腾梁花岗岩体和大松坡花岗岩体等。不少学者对腾冲地块发育的花岗质岩类的侵位年龄进行了较为系统的研究。近年来, 江彪等^[9]对研究区附近的古永岩体二长花岗岩和黑云母花岗岩进行了钾长石 Ar-Ar 定年研究, 年龄分别为(67.3 \pm 1.5)Ma 和(65.3 \pm 1.2)Ma; 杨启军等^[2]对出露于研究区附近的腾冲古永岩体黑云母花岗岩和斑状花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年研究, 得到锆石 U-Pb 年龄分别为(67.8 \pm 1.4)Ma 和(74.9 \pm 1.8)Ma, 上述研究表明研究区的晚白垩世岩浆作用主要形成于 74.9~65.3 Ma。

选取滇滩花岗岩样品 15DT-17 进行 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析, 分析结果见表 1。锆石多为半自形-自形, 呈长柱状或粒状, 粒径长 100~200 μm , 发育

明显的振荡环带(图 3), Th/U 比值为 0.44~0.97, 具有典型的岩浆锆石的特征^[22]。8 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(81 \pm 4)Ma(MSWD=8.3)。部分锆石点(点号 2、4、5、8)偏离谐和线, 可能是由于这些测点锆石 U、Th 含量比较高(表 1), 导致锆石局部出现蜕晶化作用, 从而产生了铅丢失现象^[23]。本文分析的锆石年龄结果与与前人在腾冲地区对晚白垩世花岗岩的研究成果相近, 因此可以认为花岗岩大约侵位于 81 Ma。

3.2 主元素特征

腾冲滇滩花岗岩样品的主元素和微量分析结果见表 2。花岗岩具有高的 SiO_2 (74.7%~77.0%, 平均 75.80%)、 K_2O (4.91%~6.26%, 平均 5.30%)、低 Al_2O_3 (12.4%~13.1%, 平均 12.70%)、贫 CaO (0.65%~0.78%, 平均 0.68%) 和 MgO (0.11%~0.32%, 平均 0.16%), 低 FeO^T (0.98%~1.17%, 平均 1.18%)。 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 总含量为 6.37%~8.68%, 平均 7.93%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高, 均大于 1, 除一个样品(15DT-11)为 56.9, 其余为 1.51~1.58, 平均 1.55。根据主元素化学成分计算的标准矿物进行岩石分类, 花岗岩类型主要为碱长花岗岩(图 4)。铝饱和指数 A/CNK 的值为 1.03~1.53, 平均为 1.12, 为铝饱和系列。滇滩花岗岩除 1 个样品(15DT-11, A/CNK = 1.53)为铝过饱和系列外, 其余为铝弱饱和系列(A/CNK = 1.03~1.08)(表 2 和图 5)。

3.3 微量元素特征

滇滩花岗岩具有较高的稀土总量($\Sigma\text{REE} = 284\sim 455 \mu\text{g/g}$), 轻重稀土元素分馏不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.59~3.69。在球粒陨石标准化 REE 分布模式图上(图 6b), 滇滩花岗岩呈现强 Eu 负异常的“海鸥式”稀土谱型; 在原始地幔标准化微量元素图中(图 6a), 明显亏损 Ba、Sr、Ti 等元素, 富集 Nb、Ta、Zr、Hf。

表 1 滇滩花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICPMS U-Pb analyzed data of zircons from the Diantan granites

测点号	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th	U	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$		
1	25.0	808	1604	0.50	0.0935	0.0073	0.0132	0.0004	90.7	6.8	84.3	2.4
2	34.9	1607	2162	0.74	0.0781	0.0055	0.0117	0.0003	76.4	5.1	75.1	1.8
3	9.15	447	515	0.87	0.1007	0.0083	0.0126	0.0004	97.4	7.6	80.4	2.6
4	60.6	2325	3167	0.73	0.1098	0.0061	0.0137	0.0003	106.0	6.0	87.8	1.6
5	32.6	1682	1725	0.97	0.0917	0.0068	0.0128	0.0003	89.1	6.3	82.2	1.8
6	8.43	592	673	0.88	0.0980	0.0088	0.0125	0.0004	95.0	8.2	79.9	2.4
7	11.3	656	910	0.72	0.0973	0.0087	0.0121	0.0003	94.3	8.1	77.6	1.9
8	23.6	1560	1990	0.78	0.0744	0.0065	0.0119	0.0002	72.9	6.1	76.5	1.3

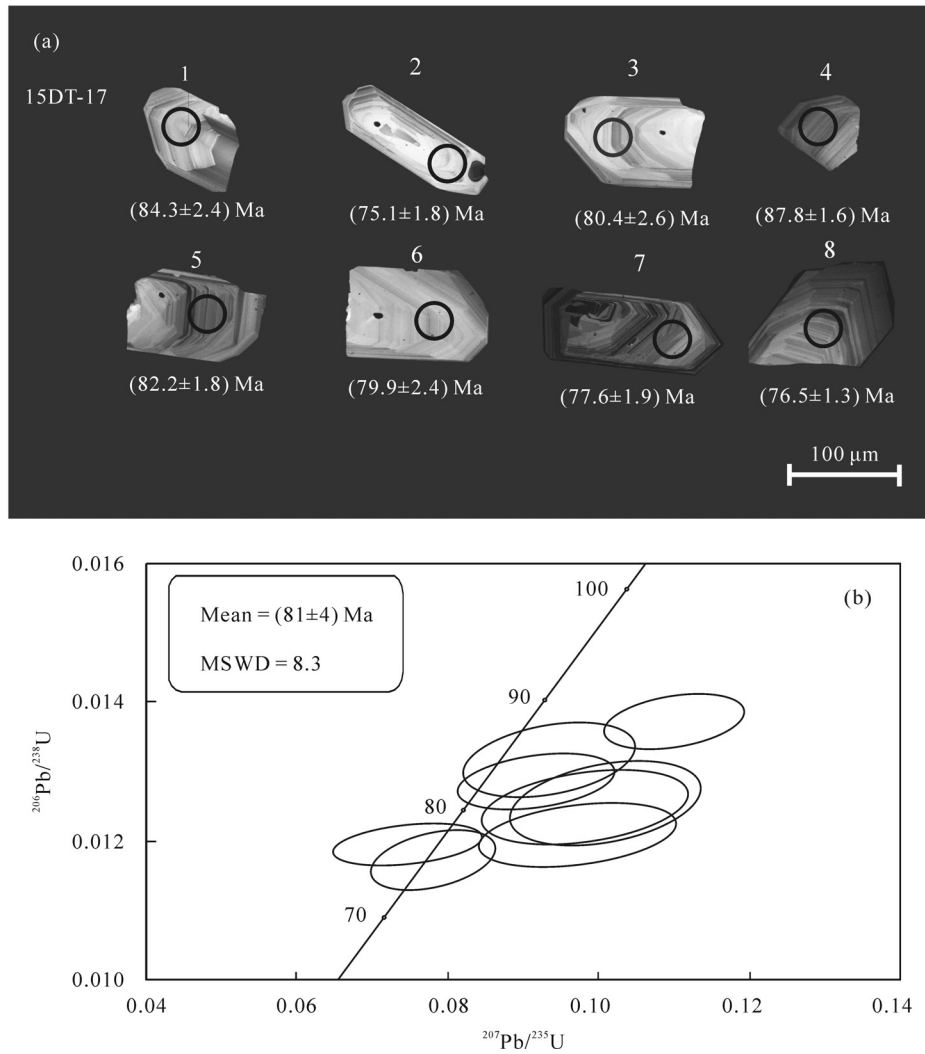


图 3 滇滩花岗岩典型锆石的阴极发光图像(a)与 U-Pb 年龄谱和图(b)

Fig.3 CL images (a) and U-Pb concordia diagram (b) of zircons from the Diantan granites

表 2 滇滩花岗岩主元素(%)和微量元素(μg/g)分析结果

Table 2 Major (%) and trace element (μg/g) concentrations for the Diantan granites of Tengchong

样号	15DT-10	15DT-11	15DT-12	15DT-14	15DT-15
SiO ₂	74.7	77.0	75.4	75.6	76.3
TiO ₂	0.08	0.06	0.07	0.11	0.08
Al ₂ O ₃	13.1	12.5	12.8	12.6	12.4
Fe ₂ O ₃ ^T	1.27	1.31	1.09	1.73	1.18
MnO	0.07	0.03	0.05	0.08	0.04
MgO	0.11	0.32	0.10	0.15	0.12
CaO	0.78	0.65	0.69	0.67	0.66
Na ₂ O	3.39	0.11	3.37	3.10	3.19
K ₂ O	5.29	6.26	5.10	4.91	4.93
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
LOI	1.05	1.65	0.79	0.85	0.85
Total	99.9	99.8	99.4	99.7	99.7
Na ₂ O+K ₂ O	8.68	6.37	8.47	8.01	8.12
K ₂ O/Na ₂ O	1.56	56.91	1.51	1.58	1.55
A/CNK	1.03	1.53	1.04	1.08	1.05

(续表 2)

样号	15DT-10	15DT-11	15DT-12	15DT-14	15DT-15
A/NK	1.16	1.79	1.16	1.21	1.17
分异指数(DI)	92.4	88.5	93.3	91.3	93.0
Sc	3.26	3.17	3.01	3.22	3.20
V	6.11	6.48	9.24	7.63	6.03
Cr	1.58	1.38	2.00	1.82	1.21
Co	0.41	1.02	0.44	0.59	0.36
Ni	0.41	0.88	0.48	0.87	0.38
Ga	24.1	24.5	22.1	22.7	23.1
Rb	737	803	679	793	725
Sr	13.8	7.90	14.6	18.4	11.5
Y	142	100	109	109	125
Zr	165	99.0	118	146	138
Nb	90.0	61.5	65.4	65.7	80.2
Cs	15.1	17.2	15.0	27.8	18.6
Ba	31.1	115	28.9	39.9	21.2
La	50.4	26.6	43.8	61.8	46.7
Ce	113	60.9	95.5	136	108
Pr	14.2	7.62	12.1	15.9	13.0
Nd	51.0	28.1	43.8	55.7	46.9
Sm	13.3	7.50	11.2	12.7	12.1
Eu	0.21	0.14	0.21	0.25	0.19
Gd	13.1	8.40	11.2	11.9	12.3
Tb	2.86	1.98	2.35	2.40	2.61
Dy	19.2	14.0	15.6	15.6	17.4
Ho	4.36	3.30	3.55	3.52	3.94
Er	13.2	10.1	10.7	10.5	11.9
Tm	2.24	1.77	1.81	1.78	2.04
Yb	15.2	12.0	12.2	12.0	13.8
Lu	2.27	1.78	1.82	1.83	2.08
Hf	8.24	5.55	6.25	7.38	7.77
Ta	10.6	8.38	8.20	8.78	11.0
Pb	34.1	115	40.1	32.6	33.5
Th	87.1	60.7	74.3	91.0	85.2
U	29.7	22.9	22.2	21.2	23.9
∑REE	456	284	375	451	417
(La/Yb) _N	2.38	1.59	2.58	3.69	2.43
δEu	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
Nb/Ta	8.49	7.34	7.97	7.48	7.29
Nd/Th	0.59	0.46	0.59	0.61	0.55
La/Nb	0.56	0.43	0.67	0.94	0.58
Sr/Y	0.10	0.08	0.13	0.17	0.09
10000Ga/Al	3.47	3.72	3.26	3.41	3.51

注: A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)摩尔比; A/NK = Al₂O₃/(Na₂O + K₂O)摩尔比; 分异指数(DI) = Qz + Or + Ab + Ne + Lc + Kp。

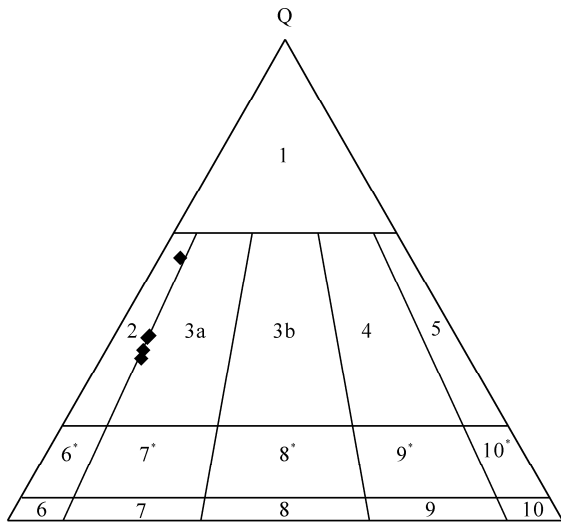


图 4 滇滩花岗岩 QAP 图解(据文献^[24])

Fig.4 QAP classification diagram for the Diantan granites
 1-富石英花岗岩; 2-碱长花岗岩; 3a-花岗岩; 3b-花岗岩(二长花岗岩); 4-花岗闪长岩; 5-英云闪长岩、斜长花岗岩; 6*-碱长石英正长岩; 7*-石英正长岩; 8*-石英二长岩; 9*-石英二长闪长岩; 10*-石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩; 6-碱长正长岩; 7-正长岩; 8-二长岩; 9-二长闪长岩、二长辉岩; 10-闪长岩、辉长岩、斜长岩。

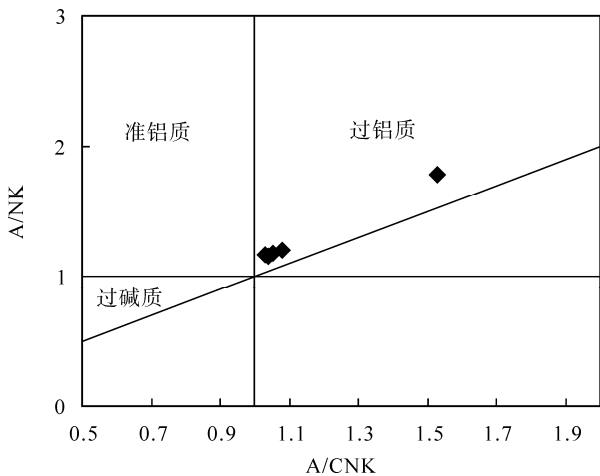


图 5 滇滩花岗岩 A/CNK-A/NK 图解(据文献^[25])

Fig.5 A/CNK-A/NK plot for the Diantan granites

3.4 岩石类型

A 型花岗岩最初由 Loiselle *et al.*^[27]提出, 是一组产于伸展构造环境中的花岗岩类型, 即断裂带或非造山构造环境。典型的 A 型花岗岩具有独特的地球化学组成特征, 如岩石组合多与碱性花岗岩和正长花岗岩演化系列有关的黑云母花岗岩; 地球化学组成特征上具有高 $FeO^T/(FeO^T+MgO)$ 、 K_2O/Na_2O 和 TiO_2/MgO 比值、富集高场强元素, 如 Zr、Nb 和 Ta 等, 以及具有强 Eu 负异常的“海鸥式”稀土分布模式^[28]。

滇滩花岗岩具有类似于 A 型花岗岩的特征: (1) 岩相学上, 岩体中未发育暗色包体和析离体, 以及岩石具有显微文象结构; (2) 主元素组成富碱、高钾和 $FeO/(FeO + MgO)$ 值、贫钙和镁等; (3) 具有较高的稀土总量 ($\Sigma REE = 284\sim 455 \mu g/g$), 轻重稀土元素分异弱, $(La/Yb)_N = 1.59\sim 3.69$ 和具有“海鸥式”球稀土元素分布模式(图 6b); (4) 微量元素蛛网图表现出亏损 Ba、Sr、Ti 和 Eu 等元素(图 6a); (5) 具有高的 $10000Ga/Al$ 比值($3.26\sim 3.72$, 均大于 2.6 ^[29]); (6) 依据岩石中的 MALI 值($Na_2O + K_2O - CaO$) (代表岩石中长石的含量, 与岩浆的源区无关)和铁值($FeO^T/(FeO^T + MgO)$)^[29] (反映花岗岩质岩浆结晶分异的信息), 在 $(Na_2O + K_2O - CaO)-SiO_2$ 和 $(FeO^T/FeO^T + MgO)-SiO_2$ 判别图(图 7), 以及在 $Zr-10000Ga/Al$ 、 $Y-10000Ga/Al$ 和 $FeO^T/MgO-(Zr + Ce + Nb + Y)$ 图解中(图 8), 滇滩花岗岩也均落入 A 型花岗岩区域; (7) 通常, A 型花岗岩与高分异的花岗岩在地球化学特征上具有很大的相似性, 但其本质区别是 A 型花岗岩中 Fe 相对于 Mg 高度富集^[29-30]。滇滩花岗岩 $Fe_2O_3^T$ 含量为 $1.09\%\sim 1.73\%$ 、 MgO 含量为 $0.10\%\sim 0.32\%$ 和 $Fe_2O_3^T/MgO$ 值为 $4.09\sim 11.55$, 明显与高分异 I 型(约为 2.27)和 S 型(约为 2.38)相区别^[29-31]。上述特征表明滇滩花岗岩可能为 A 型花岗岩。

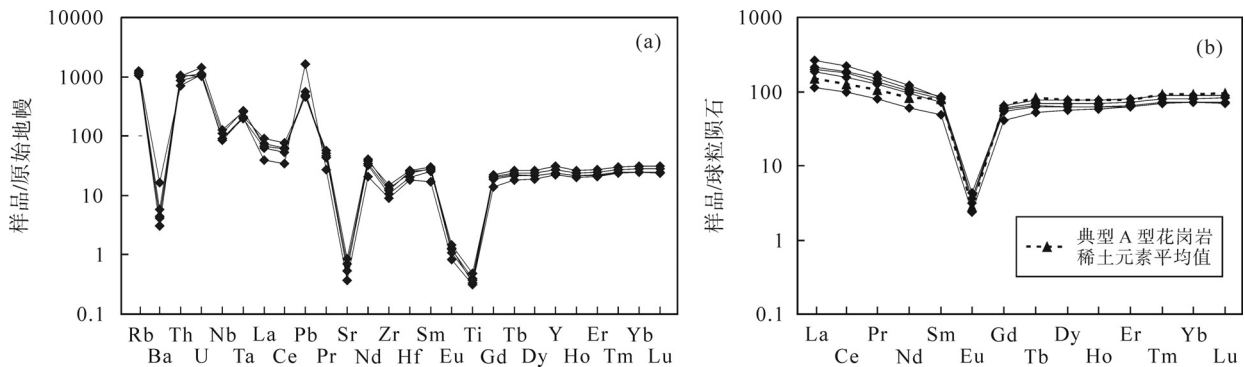


图 6 滇滩花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土元素分布模式图(b)

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a), and chondrite-normalized REE patterns (b) for the Diantan granites 标准化数值据文献^[26], 平均值数值据文献^[9,32]。

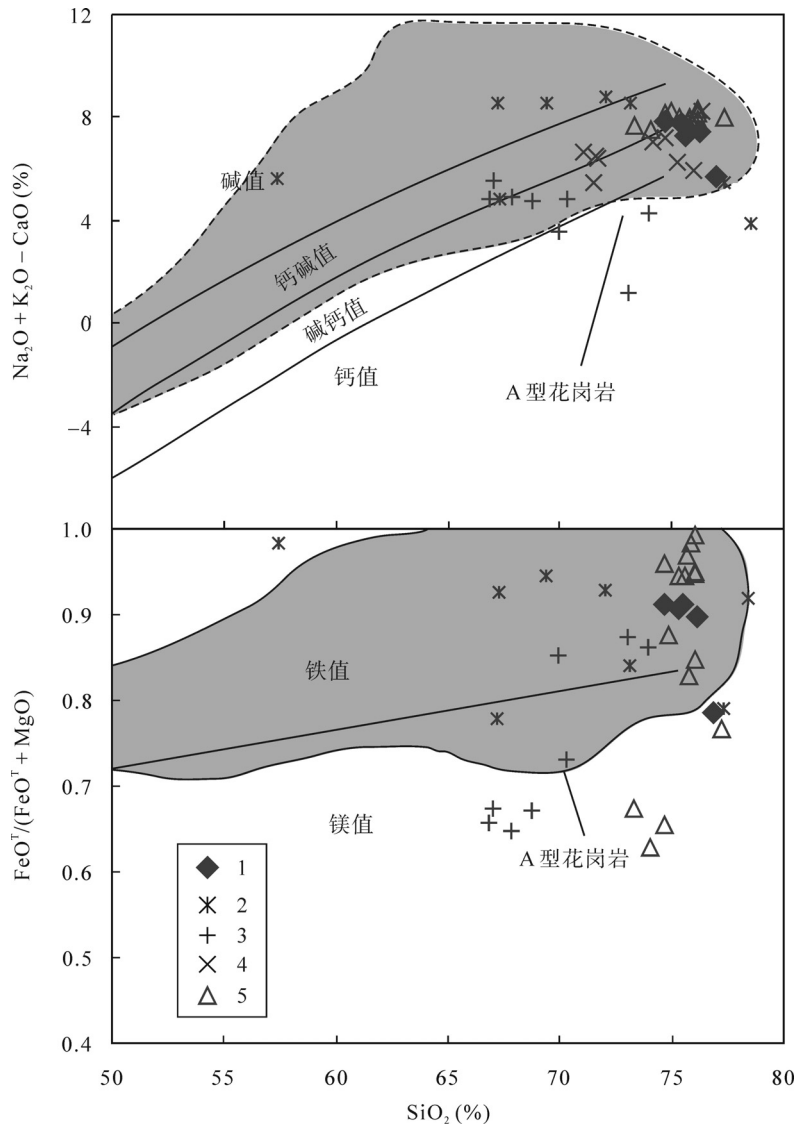


图7 滇滩花岗岩($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)- SiO_2 和 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ - SiO_2 判别图(据文献[30])

Fig.7 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)- SiO_2 and $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ - SiO_2 diagrams of the Diantan granites

1-滇滩 A 型花岗岩; 2-大松坡 A 型花岗岩^[9]; 3-临沧 S 型花岗岩^[4]; 4-腾梁花岗岩^[2]; 5-来利山和小龙河 A 型花岗岩^[32]。

4 讨论

4.1 岩石学成因

A 型花岗岩有多种成因模式, 主要包括幔源和壳源物质混合^[34]、中下地壳岩石的部分熔融^[28, 35-37]和幔源基性岩浆高度结晶分异^[38]。

地幔物质的部分熔融不能直接产生花岗质岩浆^[39], 它只能产生镁铁质和中性岩浆^[40]。实验岩石学研究表明, 在不同的压力(0.5~3.0 GPa)和部分熔融程度(2%~40%)下, 无水橄榄岩主要产生镁铁质岩浆^[41-42], 而含水橄榄岩则形成高 Mg 安山岩^[43-44]。滇滩花岗岩表现出高 SiO_2 (74.7%~77.0%, 平均为 75.8%)和低

MgO (0.11%~0.32%, 平均为 0.16%)含量, 表明其源区可能不是直接来源于地幔。由幔源基性岩浆分异形成的花岗岩(HiBaSr)具有高 Ba、Sr 含量, 低 Y、HREE 含量等地球化学特征^[45], 而滇滩花岗岩明显亏损 Ba、Sr, 和高 HREE 含量, 不同于 HiBaSr 花岗岩。根据前人的研究资料以及我们野外地质观察, 研究区缺乏与滇滩花岗岩相配套的基性或中性侵入岩类, 因此可以排除花岗岩成因中的幔源基性岩浆高度结晶分异。此外, 该岩体中未见到基性岩包体, 也无岩浆混合的迹象, 表明并未发生强烈的壳幔混合作用, 所以, 幔源物质和壳源物质混合也并非滇滩花岗岩的成因模式。因此, 滇滩花岗岩很可能是由中下地壳部分熔融作用形成。

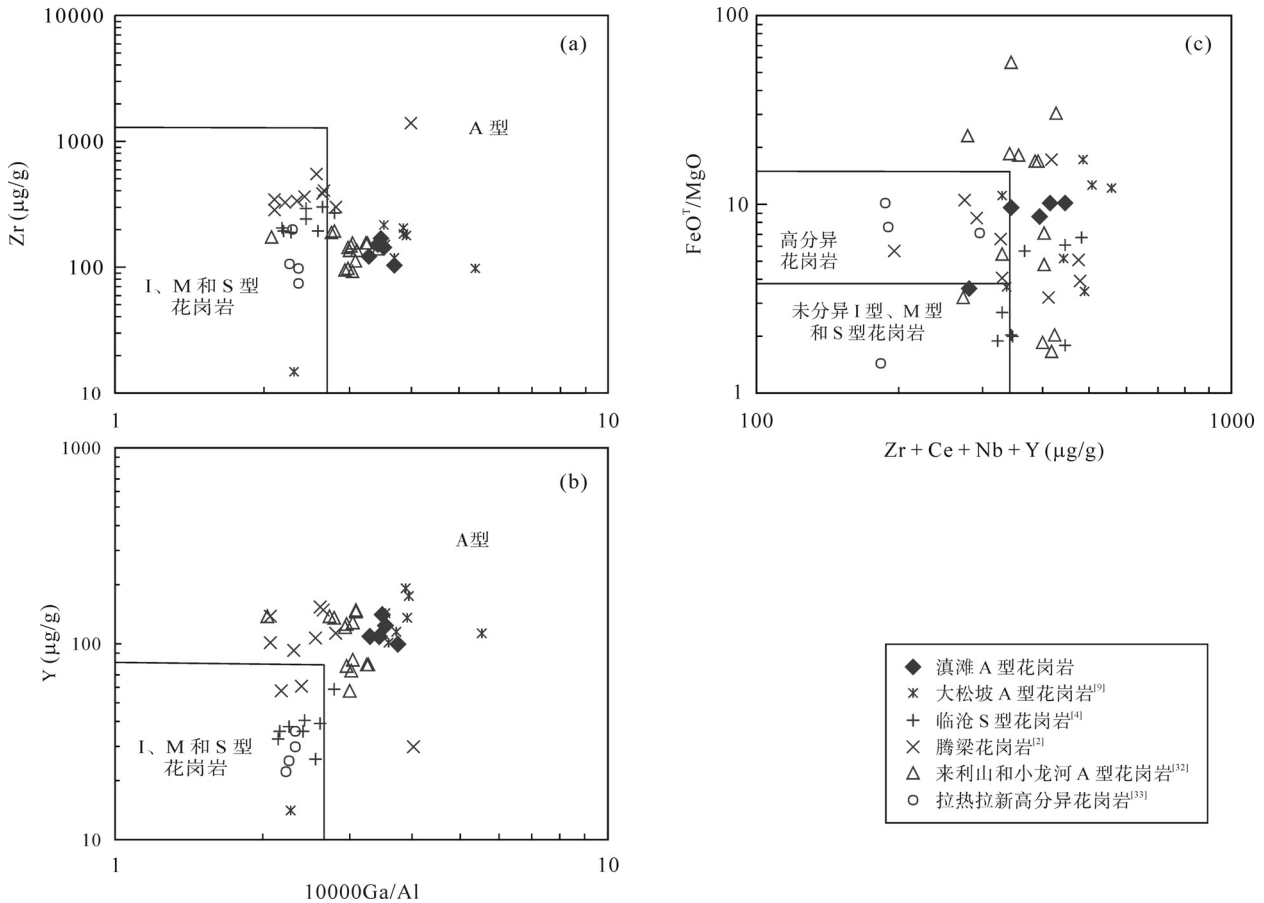


图 8 滇滩花岗岩的岩石成因类型判别图解(据文献[29])

Fig.8 Discrimination diagrams of genesis type for the Diantan granites

前人的研究成果表明，在低压(400 MPa)高温(950 °C)条件下 A 型花岗岩的地壳物质来源主要由富含 F 和 Cl 的下地壳麻粒岩相残留体、英云闪长岩、花岗闪长岩和下地壳玄武质岩石部分熔融形成^[30,46-48]。Creaser *et al.*认为麻粒岩相残留体模式部分熔融产生的 A 型花岗岩，可能会继承残留源区的一些地球化学特征，如高 MgO、CaO、Al₂O₃ 含量，因此，这种残留模式无法解释滇滩 A 型花岗岩中高 FeO^T/(FeO^T + MgO)值等一些典型的地球化学特征^[49]。因此，滇滩 A 型花岗岩并非由下地壳麻粒岩相残留体部分熔融形成。前人的实验研究发现，通过下地壳玄武质岩石部分熔融可以形成在化学成分上偏基性的准铝质花岗岩，滇滩花岗岩除一个样品(15DT-11, A/CNK = 1.53)为铝过饱和系列外，其余为铝弱饱和系列(A/CNK = 1.03~1.08) (图 5)，这种差异的出现，很可能是因为前者有着较低的 Na₂O 含量所致。因此，下地壳玄武质岩石的部分熔融也不是滇滩 A 型花岗岩的成因模式。实验岩石学资料表明英云闪长岩和花岗闪长岩在高温、贫水和相对低压条件下熔融形

成 A 型花岗岩质岩浆，同时出现斜长石和斜方辉石矿物相^[50]，而这些矿物相的出现会使得熔体中对应组分的亏损，如 Al₂O₃、Na₂O、CaO、Sr、Eu 和 MgO 等。然而，Clemens *et al.*^[35]、King *et al.*^[37]和 Dall’Agnol *et al.*^[51]研究表明 A 型花岗岩的产出并非仅限于贫水条件，岩浆处于水未饱和状态下也能形成 A 型花岗岩。Gd、Dy 和 Ho 在角闪石中的分配系数较高，所以当源区存在角闪石残留相时，形成的熔体会相对亏损中-重稀土元素，显示中稀土下凹分布模式^[52]。而滇滩花岗岩在稀土元素分布模式曲线上呈平缓型的重稀土曲线，因此滇滩花岗岩源区可能不存在角闪石的残留。Harker 图解中主元素对 SiO₂ 不具有明显的相关性(未显示)，表明岩浆演化过程中并未发生明显的分异作用。但是，在微量元素蛛网图中(图 6a)滇滩花岗岩具有明显的 Sr、Eu 负异常，表明地壳物质熔融时，可能存在斜长石矿物相的残留。

滇滩花岗岩的主元素和微量元素特征与 Patino Douce^[53]的实验结果相吻合，即英云闪长岩和花岗闪长岩的脱水熔融产生 A 型花岗岩熔体，其主要由钙

质斜长石、斜方辉石和少量单斜辉石组成,并具有低 Al、Ca、Mg、Sr 和 Eu 含量,高 Ga/Al 和 K/Na 值等。因此,滇滩花岗岩初始熔体来源于英云闪长质和花岗闪长质物质部分熔融形成。

4.2 构造环境

A 型花岗岩的产出往往与地壳的拉张作用密切相关,不同程度的拉张背景,以及拉张规模和深度的差异可以产生不同类型的 A 型花岗岩,其形成的构造环境与地壳挤压增厚生热模式不同,A 型花岗岩的形成与地壳发生高温部分熔融有关,指示深部存在热异常。虽然大陆地壳中的花岗岩类极少直接源自地幔物质,但是地幔物质可以为多数花岗质岩浆的形成提供重要的热源,进而引起大范围内地壳物质的熔融和再造。通常认为,俯冲板块的断离或者加厚岩石圈地幔的拆沉作用引起下方软流圈地幔上涌带来的热导致下地壳部分熔融,伴随的低压、相对贫水和高温的物理化学条件往往能够形成 A 型花岗岩^[54],而大陆环境下的 A 型花岗岩在一定程度上可指示岩石圈地幔减薄的时间、过程及其动力学机制。Eby 在前人研究的基础上,将 A 型花岗岩分成 A1 型和 A2 型两类花岗岩^[55-56]。其中 A1 型花岗岩总体上代表一种非造山的大陆裂谷或者板内环境;A2 型花岗岩则主要代表碰撞后拉张环境,如陆-陆碰撞后期构造应力松弛阶段或者岛弧岩浆作用。

在 A 型花岗岩亚类判别图中(图 9),滇滩花岗岩位于 A2 型花岗岩区域,属于造山后构造环境;在 Rb-(Y + Nb)图解中落在板内花岗岩(WPG)区域(图 10)。因此,结合腾冲地壳大量分布的晚白垩世火山

岩以及滇滩 A 型花岗岩侵位,指示研究区在该期处于碰撞后伸展作用阶段;同时滇滩 A 型花岗岩则代表了该区在陆块碰撞聚合后由于伸展作用引起的岩石圈地幔减薄从而导致地壳熔融而形成的一期重要花岗岩浆活动。

戚学祥等^[13]通过研究腾冲早白垩世 I 型花岗岩认为该地区在早白垩世处于俯冲-碰撞构造环境。杨启军等^[2]通过对腾梁古永岩群中晚白垩世花岗岩的研究,认为其具有岛弧-后碰撞花岗岩的特征。侏罗纪-早白垩世期间,缅甸和腾冲板块的碰撞引起显著的挤压应力和地壳加厚,新特提斯大洋板片俯冲到腾冲板块,引起幔源岩浆的上升和底侵,进而提供高温热源熔融无水镁铁质和变质沉积地壳岩石^[32]。另外,前人的研究成果同时也表明,燕山期腾冲地块与保山地块碰撞拼贴^[6,7,57],喜马拉雅早期腾冲地块与印度板块发生碰撞^[6]。晚白垩世滇滩 A 型花岗岩可能指示这些碰撞地质事件之间可能存在地壳的拉张作用,即腾冲地块在晚白垩世完成与保山地块碰撞造山作用之后,在与印度板块进行碰撞作用之前发生了短暂的应力松弛阶段。晚白垩世时,新特提斯大洋板片俯冲到腾冲板块的下部,之后该俯冲板块的断离引起下方软流圈地幔上涌^[58],为英云闪长质和花岗闪长质物质的部分熔融提供了足够的热源,进而在一个低压、相对贫水和高温的物理化学条件和伸展构造机制下导致晚白垩世滇滩 A 型花岗岩的侵位。本次研究很好地补充了前人的研究成果,完善了腾冲地块存在早白垩世俯冲碰撞-晚白垩世造山后伸展作用阶段-喜马拉雅早期再次碰撞的构

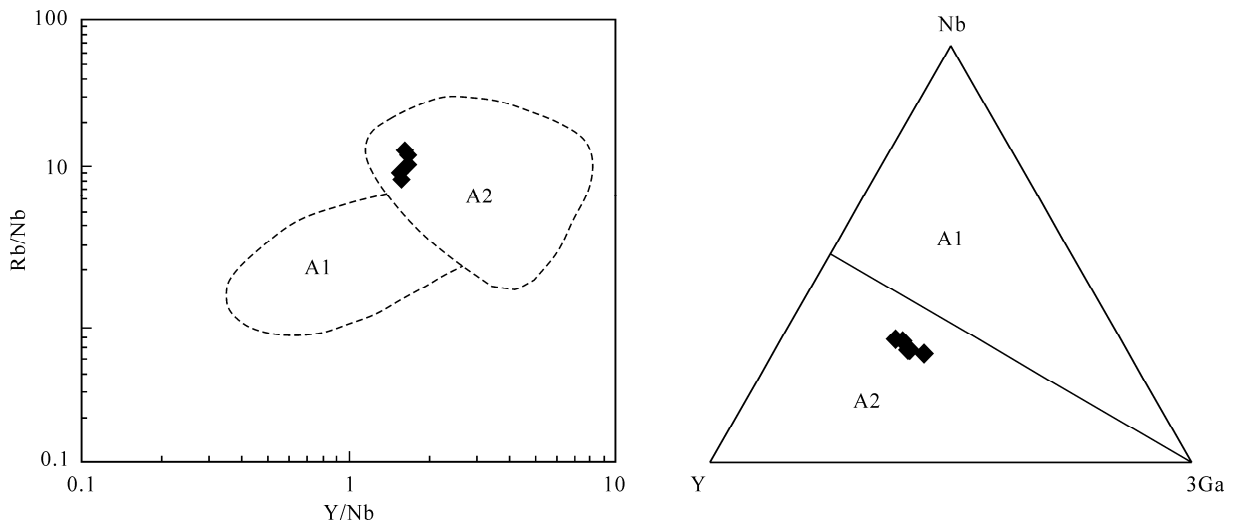


图 9 滇滩花岗岩的 Rb/Nb-Y/Nb 和 Nb-Y-3Ga 图解(据文献[55])

Fig.9 Rb/Nb-Y/Nb and Nb-Y-3Ga diagrams for the Diantan granites

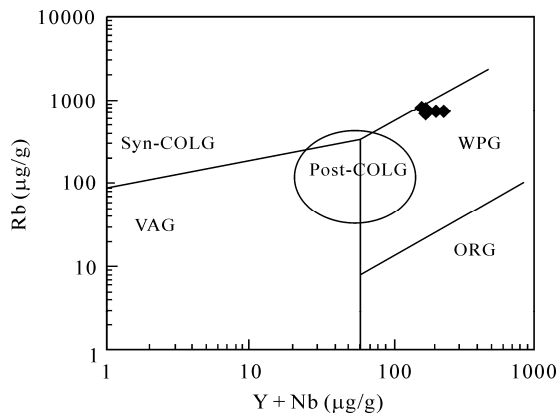


图 10 滇滩花岗岩的构造环境判别图解(据文献[59])

Fig.10 Discrimination diagrams of tectonic setting for the Diantan granites

ORG-洋中脊花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩。

造体制,对深入探讨三江地区燕山期的构造环境和深部动力学背景,以及构造演化提供了地球化学方面的信息。

5 结 论

(1) 形成于晚白垩世的滇滩 A 型花岗岩很可能是由英云闪长质或花岗闪长质原岩部分熔融形成的。

(2) 晚白垩世滇滩 A 型花岗岩及其藏东南大量花岗岩的侵位,指示腾冲地块和保山地块完成碰撞造山作用之后,并在与印度板块进行碰撞作用之前发生了短暂的应力松弛阶段。

中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的孙胜玲老师、王鑫玉和黄丰同学在样品主元素、微量元素及年龄测试实验中给予了大量的帮助,笔者在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

[1] 李文昌. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-491.
Li Wen-chang. Ore-Forming Thesis of Multi-Island-Arc-Basin-System and Collisional Orogeny and Exploration Techniques in Sanjing Region, SW China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 1-491 (in Chinese).

[2] 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇, 石玉若. 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[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1092-1104.
Yang Qi-jun, Xu Yi-gang, Huang Xiao-long, Luo Zhen-yu, Shi Yu-ruo. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication[J]. Acta Petrol Sinica, 2009, 25(5): 1092-1104 (in Chinese with English abstract).

[3] Xu Y G, Yang Q J, Lan J B, Luo Z Y, Huang X L, Shi Y R, Xie L W. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. J Asian Earth Sci, 2012, 53: 151-175.

[4] 孔会磊. 三江地区南澜沧江带临沧花岗岩的地球化学、年代学与成因[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
Kong Hui-lei. Western Yunnan in Sanjiang region Lincang granite petrogenesis: Geochemistry and zircon U-Pb geochronology and Hf isotope constraints[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011 (in Chinese with English abstract).

[5] 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 聂飞, 谢许峰, 王霞, 胡兆初. 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[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 107-118.
Dong Mei-ling, Dong Guo-chen, Mo Xuan-xue, Zhu Di-cheng, Nie Fei, Xie Xu-feng, Wang Xia, Hu Zhao-chu. Geochronology, geochemistry and significance of the western Yunnan Baoshan block early Paleozoic granitoids[J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 28(5): 107-118 (in Chinese with English abstract).

[6] 莫宣学. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 178-235.
Mo Xuan-xue. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 178-235 (in Chinese).

[7] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 9-215.
Zhong Da-lai. The Paleotethys Orogenic Belt in West of Sichuan and Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 1998: 9-215 (in Chinese).

[8] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135-148.
Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Deng Jin-fu, Dong Guo-chen, Zhou Su, Guo Tie-ying, Zhang Shuang-quan, Wang Liang-liang. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. Earth Sci Front, 2003, 10(3): 135-148 (in Chinese with English abstract).

[9] 江彪, 龚庆杰, 张静, 马楠. 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[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1477-1492.
Jiang Biao, Gong Qing-jie, Zhang Jing, Ma Nan. Late Cretaceous aluminium A-type granites and its geological significance of Dasongpo Sn deposit, Tengchong, West Yunnan[J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 28(5): 1477-1492 (in Chinese with English abstract).

[10] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 2003, 28(1): 211-280.

[11] Searle M P, Weinberg R F, Dunlap W J. Transpressional tectonics along the Karakoram fault zone, northern Ladakh: Constraints on Tibetan extrusion[J]. Geol Soc London Spec Publ, 1998, 135(1): 307-326.

[12] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics[J]. Nature, 1976, 264(5584): 319-324.

[13] 戚学祥, 朱路华, 胡兆初, 李志群. 青藏高原东南缘腾冲早白垩世岩浆岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素组成

- 及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3409–3421.
- Qi Xue-xiang, Zhu Lu-hua, Hu Zhao-chu, Li Zhi-qun. Zircon SHRIMP U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition for Early Cretaceous plutonic rocks in Tengchong block, southeastern Tibet, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(11): 3409–3421 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李再会, 林仕良, 丛峰, 谢韬, 邹光富. 滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1529–1541.
- Li Zai-hui, Lin Shi-liang, Cong Feng, Xie Tao, Zou Guang-Fu. The gaoligongshan Group of metamorphic rocks, Dianxi zircon ages and their tectonic significance[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2012, 28(5): 1529–1541 (in Chinese with English abstract).
- [15] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[J]. 北京: 地质出版社, 1990.
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of the Yunnan Province[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1990 (in Chinese).
- [16] 徐善法, 袁志亮, 陈建平. 三江北段地球化学特征研究[J]. 物探与化探, 2007, 31(2): 99–105.
- Xu Shan-fa, Yuan Zhi-liang, Chen Jian-ping. Geochemical characteristics of the northern part of Sanjiang[J]. *Geophys Geochem Explor*, 2007, 31(2): 99–105 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552–558.
- Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract).
- [18] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 83–98.
- Tu Xiang-lin, Zhang Hong, Deng Wen-feng, Ling Ming-xing, Liang Hua-ying, Liu Ying, Sun Wei-dong. Application of RESOLUTION *in-situ* laser ablation ICP-MS in trace element analyses[J]. *Geochimica*, 2011, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract).
- [19] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Detlef G, Xu J, Gao C, Chen H. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chem Geol*, 2008, 257(1/2): 34–43.
- [20] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [21] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication 4, 2003: 1–71.
- [22] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(3): 637–648.
- [23] 赖冬梅. 锆石 U-Pb 年龄不一致原因浅析[J]. 四川有色金属, 2004 (2): 12–18.
- Lai Dong-mei. Preliminary analysis of discordant reason of zircon U-Pb dating[J]. *Sichuan Nonferrous Metal*, 2004 (2): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- [24] Streckeisen A. Classification of common igneous rocks by means of their chemical composition: A provisional attempt[J]. *New Jahrb Mineral*, 1976, 1: 1–15.
- [25] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [26] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42(1): 313–345.
- [27] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geol Soc Am Abstr Prog*, 1979, 11(7): 468.
- [28] Douce P, Alberto E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. *Geology*, 1997, 25(8): 743.
- [29] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.
- [30] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. A Geochemical classification for granitic rocks[J]. *J Petrol*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [31] 高源, 郑常青, 姚文贵, 王浩, 李娟, 施璐, 崔芳华, 高峰, 张行行. 大兴安岭北段哈多河地区骆驼脖子岩体地球化学和锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1293–1310.
- Gao Yuan, Zheng Chang-qing, Yao Wen-gui, Wang Hao, Li Juan, Shi Lu, Cui Fang-hua, Gao Feng, Zhang Xing-xing. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Luotuobozi pluton in the Hadohe area in the northern Daxing'anling[J]. *Acta Geol Sinica*, 2013, 87(9): 1293–1310 (in Chinese with English abstract).
- [32] Chen X C, Hu R Z, Bi X W, Zhong H, Lan J B, Zhao C H, Zhu J J. Petrogenesis of metaluminous A-type granitoids in the Tengchong-Lianghe tin belt of southwestern China: Evidences from zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes, and whole-rock Sr-Nd isotopes[J]. *Lithos*, 2015, 212–215: 93–110.
- [33] Li S M, Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Sui Q L, Liu S A, Liu D, Mo X X. Northward subduction of Bangong-Nujiang Tethys: Insight from Late Jurassic intrusive rocks from Bangong Tso in western Tibet[J]. *Lithos*, 2014, 205(9): 284–297.
- [34] Mingran B, Trumbull R B, Littaman S, Gerstenberger H. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components[J]. *Lithos*, 2000, 54(1/2): 1–22.
- [35] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. *Am Mineral*, 1986, 71(3): 317–324.
- [36] Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, 80(2):

- 189–200.
- [37] King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *J Petrol*, 1997, 38(3): 371–391.
- [38] Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 1992, 28(2): 151–179.
- [39] Gibbs A K. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *J Geol*, 1985, 94(4): 632–633.
- [40] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90(3): 297–314.
- [41] Hirose K, Kushiro I. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 114(4): 477–489.
- [42] Baker M B, Hirschmann M M, Ghiorso M S, Stolper E M. Compositions of near-solidus peridotite melts from experiments and thermodynamic calculations[J]. *Nature*, 1995, 375(6529): 308–311.
- [43] Hirose K, Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: The effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 133(3/4): 463–473.
- [44] Hirose K. Melting experiments on lherzolite KLB1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts[J]. *Geology*, 1997, 25(1): 42–44.
- [45] Tarney J, Jones C E. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models[J]. *J Geol Soc*, 1994, 151(5): 855–868.
- [46] Frost C D, Frost B R. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection[J]. *Geology*, 1997, 25(7): 647.
- [47] Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite[J]. *J Petrol*, 1999, 40(12): 1771–1802.
- [48] Dall’Agnol R, Oliveira D C D. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites[J]. *Lithos*, 2007, 93(3): 215–233.
- [49] Barker F, Creaser R A, Price R C, Wormald R J. Comment and Reply on “A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model”[J]. *Geology*, 2013, 19(2): 163.
- [50] 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3): 465–480.
- Jia Xiao-hui, Wang Qiang, Tang Gong-jian. A-type granites: Research progress and implications[J]. *Geotecton Metallogen*, 2009, 33(3): 465–480 (in Chinese with English abstract).
- [51] Dall’Agnol R, Scaillet B, Pichavant M. An Experimental study of a Lower Proterozoic A-type granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil[J]. *J Petrol*, 1999, 40(11): 1673–1698.
- [52] 肖庆辉. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- Xiao Qing-hui. *The Ways of Investigation on Granitoids*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 (in Chinese).
- [53] Patino Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. *Geology*, 1997, 25(8): 743–746.
- [54] Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, Robert F, Garipey C. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A-type granite petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians[J]. *J Petrol*, 1996, 37(6): 1463–1489.
- [55] Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1): 115–134.
- [56] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641.
- [57] 莫宣学. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 128.
- Mo Xuan-xue. *Volcanic Rocks, Ophiolites and Related Mineralization in Middle and South Part of Sanjiang*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 128 (in Chinese).
- [58] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Res*, 2013, 23(4): 1429–1454.
- [59] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J Petrol*, 1984, 25(4): 956–983.