

## 滇西腾冲-梁河地块早白垩世岩浆作用

李再会, 林仕良, 丛峰, 邹光富, 谢韬

成都地质矿产研究所, 成都 610081

**摘要:**滇西腾冲-梁河地区分布有大量的花岗岩。本文对梁河地区二长花岗岩进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年和 Hf 同位素分析, 研究表明, 锆石具有清晰的韵律环带, 其 Th/U 值为 0.34~1.65, 为典型的岩浆锆石; 锆石 U-Pb 年龄显示, 花岗岩有三个年龄峰值(139.6±2.3 Ma、129.7±5.2 Ma 和 118.8±4.2 Ma), 表明该区早白垩世经历了多期岩浆作用;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -20.15~-30.65,  $t_{\text{DM}}^{\text{C}}$  为 2458~3083 Ma, 暗示花岗岩源自古老地壳部分熔融。该区片麻岩中具有 2503 Ma 的碎屑锆石年龄, 据此推测可能存在新太古宙基底。上述研究说明, 该区早白垩世花岗岩的形成可能与班公湖-怒江洋的俯冲作用有关。

**关键词:**早白垩世; 岩浆作用; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 腾冲-梁河地块; 滇西

**中图分类号:** P597<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)06-0590-09

## Early Cretaceous Magmatism in Tengchong-Lianghe Block, Western Yunnan

LI Zai-hui, LIN Shi-liang, CONG Feng, ZOU Guang-fu, XIE Tao

Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China

**Abstract:** Lots of granitoides are distributed in Tengchong-Lianghe area, western Yunnan Province. In this paper, zircon LA-ICPMS U-Pb dating and Hf isotopic compositions of zircon were carried out on monzonitic granite from Lianghe area. Zircons with Th/U ratios rang from 0.34-1.65 and clear oscillatory zoning indicate typical magmatic genesis. Zircons U-Pb dating from one sample yielded concordant ages of 139.6±2.3 Ma, 129.7±5.2 Ma and 118.8±4.2 Ma, indicating that there were mult-episodes magmatism in Tengchong-Lianghe block in Early Cretaceous. Insitu Hf isotopic analyses yielded  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values rang between -20.15 and -30.65, corresponding to Hf isotopic crustal model ages, ( $t_{\text{DM}}^{\text{C}}$ ) of 2458-3083 Ma. It implies that the source of monzonitic granite was derived from older crust partial melting. Combined with the detrital zircons of 2503 Ma age from the Gaoligongshan gneisses, indicate the presence of early Precambrian basement in the Tengchong-Lianghe Block. It is proposed that the early Cretaceous magmatic belt in Tengchong-Lianghe black resulted from the sortherward subduction of the Bangonghu-Nujiang oceanic lithosphere underneath the Tengchong-Lianghe black.

**Key words:** early Cretaceous; magmatism; zircon U-Pb dating; Hf isotopic; Tengchong-Lianghe block; west Yunnan

云南西部三江一带作为青藏高原的东延部分, 以其独特的构造部位, 被认为是一个吸收新生代印度-欧亚大陆碰撞变形的调节带。作为一个包括元古代至新生代岩浆岩的火成岩省, 因其复杂的地质历史而备受关注<sup>[1~6]</sup>。高黎贡-腾冲花岗岩带呈北西-南北-北东向弧形展布, 向北与东构造结地区的波密-察隅花岗岩带相连, 并绕过东构造结与冈底斯花岗岩带连成一体。已报道的高黎贡-腾冲-梁河花岗岩的年龄主要集中在早古生代、晚古生代、中生代、新生代<sup>[7~18]</sup>。其中, 白垩纪是腾冲-梁河(简称

腾-梁)地区岩浆活动最强烈的时期之一<sup>[8,15~19]</sup>, 花岗岩形成于特提斯洋的俯冲过程, 并有地幔物质参与到岩浆组分中<sup>[16~19]</sup>。腾-梁地区早白垩世花岗岩与拉萨地块东缘就有相似的微量元素特征和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 是拉萨岩浆带向东南的延伸<sup>[16]</sup>。这些花岗岩年龄主要集中在早白垩晚期(110~128 Ma)。本文报道了早白垩世早期岩浆作用和相应的 Hf 同位素组成, 这对于建立完整的腾-梁地区花岗岩年代学框架, 示踪原岩源区, 并与冈底斯花岗岩带进行时空对比, 进而探讨三江特提斯构造演化具有重要意义。

收稿日期: 2012-03-27 收到, 04-19 改回

基金项目: 中国地质调查局项目资助(1212010784007)

第一作者简介: 李再会(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向: 岩石学、区域地质。E-mail: lizaihui00@163.com.

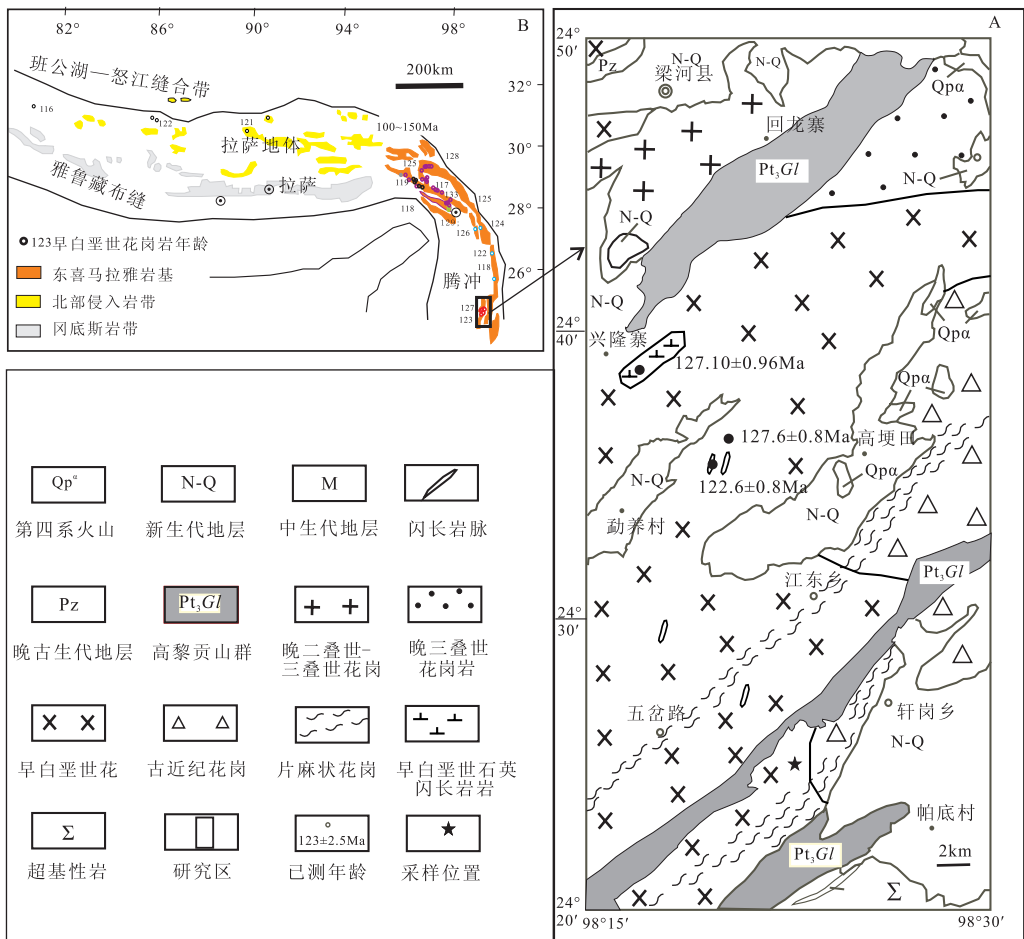
# 1 地质背景及样品特征

位于云南西南部的腾冲-保山地区,包括腾冲地块、保山地块和其间的高黎贡山变质带,属于缅甸马微陆块的北部<sup>[3]</sup>。在三叠纪期间,该地块处于东部古特提斯主洋盆,即昌宁-孟连古特提斯洋封闭时的前陆部位。部分学者认为,在新特提斯洋扩张时期,其间形成属于班公湖-怒江洋盆的东延分支海槽。该海槽在早侏罗世闭合,并导致腾冲地块和保山地块碰撞,其间形成高黎贡碰撞构造带<sup>[3]</sup>。以沪水-龙陵-瑞丽大断裂为界,腾冲-保山地块出露于地表的基底岩石类型有明显差别。东南部以公养河群为代表,时代可能是早古生代,其上为上寒武统-中生界碎屑岩、碳酸盐岩和玄武岩构成的沉积盖层<sup>[20]</sup>;西北部以高黎贡山群为代表,混合岩化显著,时代可能是新元古代-早古生代(作者未刊资料),上部主要为弱变形的石炭系-三叠系碳酸盐岩与碎屑岩沉积、古

近系-第四系陆相火山岩、河湖相碎屑沉积等构成的沉积盖层。区内出露大量的中生代-新生代花岗岩类和混合岩化花岗岩,新生代火山作用强烈。据现有资料,高黎贡群由一套角闪岩相的新元古-早古生代陆源沉积、大陆玄武岩、壳源花岗岩组成,类似于喜马拉雅结晶杂岩、念青唐古拉群和聂拉木群。

研究区以花岗岩为主(图 1A),出露面积约 800 km<sup>2</sup>,占研究区面积的 60% 以上。其中以早白垩世花岗岩为主,出露面积在 500 km<sup>2</sup> 以上,由数个岩体组成,主要为二长花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩,花岗岩中暗色闪长质包体普遍。年代学和同位素地球化学研究表明<sup>[17~19]</sup>,腾-梁地区早白垩世岩浆作用发生了广泛的壳-幔相互作用。

岩体呈北西向侵入到高黎贡山群变质岩中,南东与花岗质糜棱岩接触,北东被新生代片麻状花岗岩侵入。样品 D0001 为二长花岗岩,中粒花岗结构,具弱的片麻状构造。矿物主要有钾长石(±45%)、



腾-梁地块年龄数据引自文献[17];高黎贡数据引自文献[8];波密、察隅、然鸟引自文献[21~23];拉萨地体数据引自文献[24,25] the dates of Teng-Liang block from ref. [17]; the dates of Gaoligong from ref. [8]; the dates of Bomi, Chayu and Ranwu from ref. [21~23]; the dates of Lasa block from ref. [24,25]

图 1 腾冲-梁河地区地质图(A)及大地构造位置图(B)

Fig. 1 Geological sketch map(A) and tectonic sketch map(B) of Tengchong-Lianghe area, western Yunnan

斜长石( $\pm 15\%$ )、石英( $\pm 35\%$ )、黑云母( $\pm 5\%$ )、副矿物有锆石、磷灰石、榍石、Ti-Fe 氧化物等。钾长石以条纹长石为主,常有斜长石、黑云母细粒包体,斜长石主要为更长石,自形程度比钾长石好,石英呈不规则紧密嵌生,普遍具波状消光,部分被压碎呈细粒集合体,形成糜棱状条带,黑云母宽窄不一,与石英条带不均匀分布,形成片麻状构造。岩石  $\text{SiO}_2$  含量为 76.14%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 12.87%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 4.77%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.00%,  $\text{TiO}_2$  为 0.13%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.034%; 其 A/CNK 为 1.06。稀土含量较低( $68.35 \times 10^{-6}$ ),为轻稀土富集型,具弱的 Eu 负异常,Rb、U 和 Th 强烈富集,Na、Ta、P、Ti 相对亏损。

## 2 分析方法

用于锆石 U-Pb 年代学测定的样品,在廊坊地质服务有限公司利用标准技术进行分选。锆石制靶后进行阴极发光(CL)显微照像,结合反射光和透射光,观察锆石内部结构。制靶后的阴极发光照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室的扫描电镜+Gatan 阴极发光+ MonoCL3 上完成。LA-ICPMS 锆石原位 U-Pb 定年同时在该实验室完成。仪器为 LA-ICPMS Elan 6 100 DRC,激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 GeoLas 200 M 深紫外(DUV)193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统。激光束斑直径 32  $\mu\text{m}$ ,实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。U-Th-Pb 同位素组成分析以锆石 91 500 作为外标,NIST610 作为内标,分析方法及仪器参数类似于 Yuan 等<sup>[26]</sup>。标样为 SL13(U 含量为  $238 \times 10^{-6}$ )和 TEM(年龄为 417 Ma)<sup>[27,28]</sup>,分别用于 U 含量和年龄校正。同位素比值和 U、Th、Th 含量用 GLITER4.0 计算,锆石谐和图用 ISOPLOT 程序获得<sup>[29]</sup>。用实测  $^{204}\text{Pb}$  进行普通铅校正<sup>[30]</sup>。因样品年轻,故采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄。单个点的同位素比值和年龄误差均为  $1\sigma$ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄的加权平均值为 95% 的置信度。

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定也在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 193 nm ArF 激光器的 Nu plasma 型 MC-ICPMS 上完成。激光束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ ,剥蚀频率为 10 Hz。分析点与 U-Pb、LA-ICPMS 定年分析点为同一位置。测定期间,获得锆石 91500 的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.2822952 \pm 0.0000056$  ( $n=111, 2\sigma$ )。  $\epsilon_{\text{Hf}}$  的计算采用  $^{176}\text{Lu}$  衰变常数为  $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ <sup>[31]</sup>,球粒陨石现今的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ <sup>[32]</sup>; Hf 亏损地幔

模式年龄的计算采用现今的亏损地幔  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ <sup>[33]</sup>。Hf 同位素二阶段模式年龄采用平均大陆壳的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ <sup>[34]</sup>。

## 3 锆石 U-Pb 年代

二长花岗岩岩石样品 D0001 采自梁-潞(梁河-潞西)公路边,距离芒市约 20 km 处,地理坐标:东经  $98^\circ 42' 15''$ ,北纬  $24^\circ 24' 25''$ 。

D0001 中的锆石无色透明,长柱状自形晶,长为 100~300  $\mu\text{m}$ ,长宽比 2:1~4:1。锆石 CL 图显示明显的振荡韵律环带(图 2)。根据锆石内部结构,大致可以分两类:①结构比较简单,具有韵律环带;②具有核边结构,核部和边部都有环带。所测锆石的 U、Th 含量变化较大,分别为  $7.28 \times 10^{-6} \sim 23824.25 \times 10^{-6}$  和  $2.45 \times 10^{-6} \sim 17781.74 \times 10^{-6}$ ,Th/U 值为 0.34~1.65,属典型的岩浆成因锆石<sup>[35]</sup>(表 1)。对样品 D0001 挑选 21 颗锆石测试了 21 个分析,大部分分析点都沿着谐和线或附近分布(图 3A),个别分析点位于一致曲线下方,显示可能有 Pb 丢失。测得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄主要集中在 109~222 Ma。有一个点的年龄为 222 Ma(点 22),为锆石核部,具韵律环带,为继承性锆石的结晶年龄,与本区三叠纪花岗岩的年龄一致<sup>[12]</sup>。相对集中的 19 个点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在概率分布图上显示三个年龄峰值(图 3B):分别为  $139.6 \pm 2.3 \text{ Ma}$  (MSWD = 8.1,  $N=9$ ),  $129.7 \pm 5.2 \text{ Ma}$  (MSWD = 4.3,  $N=3$ ) 和  $118.8 \pm 4.2 \text{ Ma}$  (MSWD = 16,  $N=7$ )。研究显示,一个花岗岩体在侵位以后,经冷却、结晶到固结和产生裂隙一般不超过 17 Ma<sup>[36]</sup>。而本文中同一样品获得岩浆锆石三组年龄跨度达 21 Ma,显然不能将其理解为一岩浆过程。较为合理的解释是该岩体存在三个岩浆作用幕:早期岩浆作用发生在 139.6 Ma,随后又在 129.7 Ma 和 118.8 Ma 发生了两期岩浆作用。其中后两次与本区报道的 127 Ma 和 120 Ma 的岩浆作用相一致<sup>[8,16,17,19]</sup>。

## 4 锆石 Hf 同位素组成

在样品 D0001 U-Pb 定年的锆石中,对 9 颗锆石进行了锆石 Lu-Hf 同位素测定(表 2)。样品中的  $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值分别为  $0.024798 \sim 0.231224$  和  $0.001728 \sim 0.007743$ ,其中点 1、2、3 三个样品的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  较大( $0.007128 \sim 0.007743$ ),  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  较低( $0.281826 \sim 0.280711$ ),点 1、2、3 三个点最低( $0.280711 \sim 0.280957$ )。这三粒锆石



虚线圆圈表示同时测试 Hf 和 U-Pb 同位素, 实线圆圈表示测试了 U-Pb 同位素  
dashed circle indicates Hf and U-Pb isotope, circle represents U-Pb isotopic

图 2 样品 D0001 锆石的 CL 图像及分析点位置

Fig. 2 CL images of the zircons from the sample D0001, showing the analyzed spots

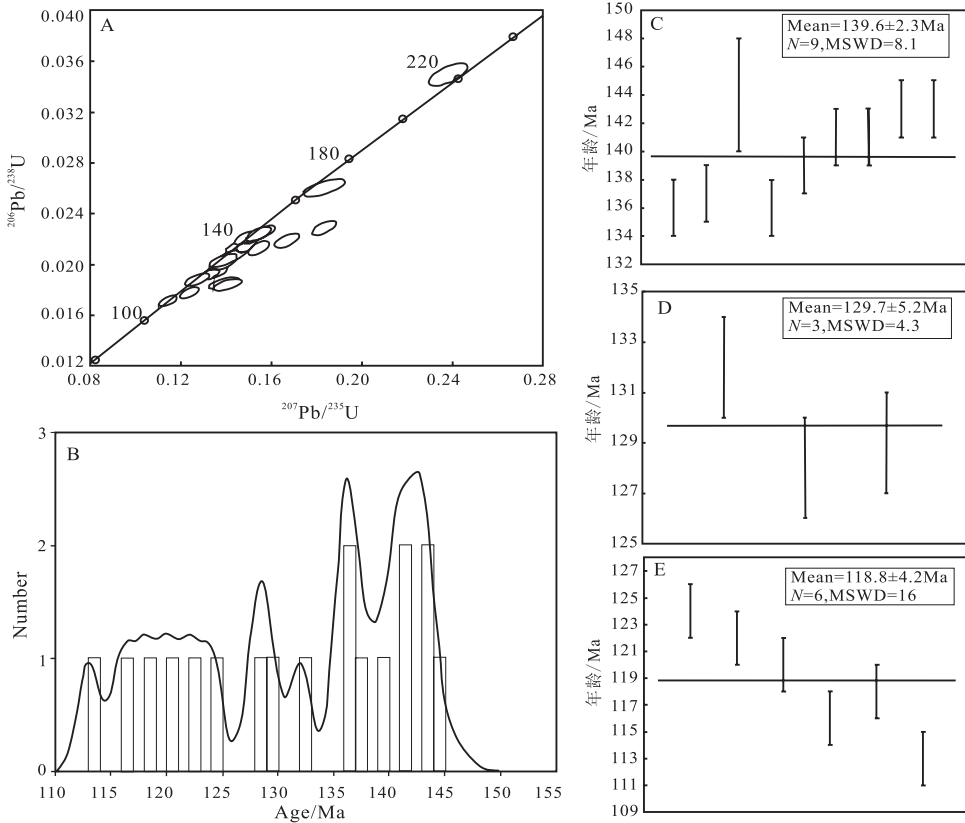


图 3 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄和谐图(A); 岩浆锆石的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄分布概率图(B); 岩浆锆石的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分布图(C,D,E)

Fig. 3 U-Pb concordia diagram showing for analytical for zircons from samples D0001 of Tengchong-Lianghe area(A), relative probability and distribution plots of <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages igneous zircons(B); the distribution plots of <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U mean age value of igneous zircons(C,D,E)

表 1 腾-梁地块早白垩世二长花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年结果

Table 1 U-Pb LA-ICPMS data for zircons of early Cretaceous granite from Tengchong-Lianghe block

| 分析<br>点号 | 组成( $\times 10^{-6}$ ) |       |       | Th<br>U | 校正的同位素比值                                  |           |  |           |  |           | 校正的年龄值/Ma                                |   |  |   |
|----------|------------------------|-------|-------|---------|---|-----------|--|-----------|--|-----------|--|---|--|---|
|          | Pb                     | Th    | U     |         | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ |           | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ |           | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |           | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ |   | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |   |
|          |                        |       |       |         | $1\sigma$                                 | $1\sigma$ | $1\sigma$                                | $1\sigma$ | $1\sigma$                                | $1\sigma$ |  |   |  |   |
| D0001-01 | 0.027                  | 2.449 | 7.28  | 0.34    | 0.05010                                   | 0.00061   | 0.14834                                  | 0.00179   | 0.02147                                  | 0.00022   | 140                                      | 2 | 137                                      | 1 |
| D0001-02 | 53.91                  | 4090  | 9359  | 0.44    | 0.05797                                   | 0.00072   | 0.18259                                  | 0.00224   | 0.02284                                  | 0.00023   | 149                                      | 6 | 144                                      | 2 |
| D0001-03 | 81.13                  | 5397  | 5589  | 0.97    | 0.05239                                   | 0.00066   | 0.15350                                  | 0.00190   | 0.02125                                  | 0.00022   | 145                                      | 2 | 136                                      | 1 |
| D0001-04 | 62.54                  | 4821  | 11030 | 0.44    | 0.05517                                   | 0.00075   | 0.16593                                  | 0.00220   | 0.02181                                  | 0.00022   | 156                                      | 2 | 139                                      | 1 |
| D0001-05 | 2.215                  | 20.87 | 61.13 | 0.34    | 0.04944                                   | 0.00071   | 0.15066                                  | 0.00211   | 0.02210                                  | 0.00023   | 142                                      | 2 | 141                                      | 1 |
| D0001-06 | 1.908                  | 24.74 | 54.44 | 0.45    | 0.05060                                   | 0.00073   | 0.13503                                  | 0.00185   | 0.01935                                  | 0.00019   | 129                                      | 2 | 124                                      | 1 |
| D0001-07 | 219.3                  | 17782 | 16759 | 1.06    | 0.04993                                   | 0.00074   | 0.13165                                  | 0.00186   | 0.01912                                  | 0.00019   | 126                                      | 2 | 122                                      | 1 |
| D0001-08 | 152                    | 11820 | 14516 | 0.81    | 0.05033                                   | 0.00075   | 0.12290                                  | 0.00173   | 0.01771                                  | 0.00017   | 118                                      | 2 | 113                                      | 1 |
| D0001-09 | 21.64                  | 1714  | 1439  | 1.19    | 0.04855                                   | 0.00069   | 0.14771                                  | 0.00203   | 0.02206                                  | 0.00022   | 140                                      | 2 | 141                                      | 1 |
| D0001-10 | 133.4                  | 13490 | 23824 | 0.57    | 0.04807                                   | 0.00073   | 0.11322                                  | 0.00163   | 0.01708                                  | 0.00017   | 109                                      | 1 | 109                                      | 1 |
| D0001-11 | 21.53                  | 1613  | 2132  | 0.76    | 0.05011                                   | 0.00075   | 0.15534                                  | 0.00224   | 0.02248                                  | 0.00023   | 147                                      | 2 | 143                                      | 1 |
| D0001-13 | 52.02                  | 3724  | 2432  | 1.53    | 0.04876                                   | 0.00088   | 0.12618                                  | 0.00218   | 0.01877                                  | 0.00019   | 121                                      | 2 | 120                                      | 1 |
| D0001-14 | 47.53                  | 2256  | 1926  | 1.17    | 0.04932                                   | 0.00092   | 0.14540                                  | 0.00260   | 0.02138                                  | 0.00022   | 138                                      | 2 | 136                                      | 1 |
| D0001-15 | 15.99                  | 1101  | 1506  | 0.73    | 0.05423                                   | 0.00111   | 0.13813                                  | 0.00272   | 0.01847                                  | 0.00019   | 131                                      | 2 | 118                                      | 1 |
| D0001-16 | 19                     | 1242  | 1446  | 0.86    | 0.04979                                   | 0.00099   | 0.14155                                  | 0.00270   | 0.02062                                  | 0.00021   | 134                                      | 2 | 132                                      | 1 |
| D0001-17 | 70.36                  | 4505  | 5126  | 0.88    | 0.04988                                   | 0.00090   | 0.13747                                  | 0.00239   | 0.01998                                  | 0.00020   | 131                                      | 2 | 128                                      | 1 |
| D0001-18 | 86.83                  | 4846  | 6490  | 0.75    | 0.05524                                   | 0.00108   | 0.13983                                  | 0.00264   | 0.01835                                  | 0.00019   | 120                                      | 5 | 116                                      | 1 |
| D0001-19 | 143.1                  | 7214  | 5547  | 1.30    | 0.04933                                   | 0.00096   | 0.13784                                  | 0.00259   | 0.02026                                  | 0.00021   | 131                                      | 2 | 129                                      | 1 |
| D0001-20 | 313.2                  | 11966 | 7262  | 1.65    | 0.05093                                   | 0.00107   | 0.18287                                  | 0.00372   | 0.02604                                  | 0.00028   | 171                                      | 3 | 166                                      | 2 |
| D0001-21 | 10.31                  | 773.4 | 1164  | 0.66    | 0.04974                                   | 0.00077   | 0.15356                                  | 0.00227   | 0.02239                                  | 0.00023   | 145                                      | 2 | 143                                      | 1 |
| D0001-22 | 25.08                  | 1888  | 2266  | 0.83    | 0.04928                                   | 0.00076   | 0.23784                                  | 0.00351   | 0.03499                                  | 0.00036   | 217                                      | 3 | 222                                      | 2 |

的 Hf 含量偏低,导致测试数据置信度下降,剔除这三个点。其它锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 20.15~30.65, Hf 同位素地壳模式年龄 ( $t_{\text{DM}}^{\text{C}}$ ) 为 2458~3083 Ma。暗示这些花岗岩源区来自古老地壳的熔融。结合在高黎

贡山群片麻岩中记录 2500 Ma 的碎屑锆石的年龄(作者未刊资料),反映在腾-梁地块可能存在新太古代基底<sup>[37]</sup>。

表 2 腾-梁地块二长花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotopic data for monzonitic granite from Tengchong-Lianghe Block

| 点号       | $t/\text{Ma}$ | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $1\delta$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $1\delta$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $t_{\text{DM}}(\text{Ma})$ | $t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|----------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| D0001-01 | 140           | 0.024798                          | 0.007743                          | 0.000023  | 0.280711                          | 0.000014  | -72.90                    | -70.10                    | 3685                       | 5519                                  | -0.92              |
| D0001-02 | 140           | 0.231224                          | 0.007254                          | 0.000005  | 0.280748                          | 0.000073  | -71.57                    | -69.12                    | 4138                       | 5442                                  | -0.78              |
| D0001-03 | 140           | 0.229269                          | 0.007185                          | 0.000033  | 0.280957                          | 0.000012  | -64.19                    | -61.87                    | 3797                       | 5000                                  | -0.78              |
| D0001-04 | 140           | 0.053584                          | 0.001838                          | 0.000003  | 0.282120                          | 0.000010  | -23.04                    | -20.15                    | 1630                       | 2458                                  | -0.94              |
| D0001-05 | 140           | 0.100256                          | 0.003281                          | 0.000016  | 0.281840                          | 0.000012  | -32.97                    | -30.19                    | 2109                       | 3083                                  | -0.90              |
| D0001-09 | 140           | 0.074537                          | 0.002443                          | 0.000003  | 0.281938                          | 0.000007  | -29.48                    | -26.62                    | 1919                       | 2862                                  | -0.93              |
| D0001-11 | 140           | 0.051099                          | 0.001728                          | 0.000002  | 0.282084                          | 0.000008  | -24.33                    | -21.37                    | 1677                       | 2536                                  | -0.95              |
| D0001-21 | 140           | 0.102375                          | 0.003465                          | 0.000027  | 0.281826                          | 0.000011  | -33.45                    | -30.65                    | 2140                       | 3113                                  | -0.90              |
| D0001-22 | 222           | 0.052369                          | 0.001769                          | 0.000002  | 0.281963                          | 0.000007  | -28.63                    | -24.02                    | 1850                       | 2760                                  | -0.95              |

## 5 讨论

### 5.1 腾-梁地块早白垩世岩浆作用

高黎贡-腾梁花岗岩带呈北西-南北-北东向弧形展布,向北与东构造结地区的波密-察隅花岗岩带相连,并绕过东构造结与冈底斯花岗岩带连成一体。近年来,在腾-梁地块东部怒江(高黎贡)缝合带自泸水向北经福贡到贡山相继厘定出一系列呈近南北向分布的早白垩世花岗岩<sup>[8,18]</sup>,向北可与拉萨地块东缘的察隅-然乌-波密岩浆岩带相连,其锆石 U-Pb 年龄都在 130~110 Ma<sup>[21~23]</sup>,向西延伸到中拉萨岩浆

岩带,其岩浆活动集中在 143~102 Ma 之间<sup>[38]</sup>。本文测定的岩体锆石年龄(140~119 Ma)以及腾-梁地块广泛分布的早白垩世花岗岩<sup>[16~17,19]</sup>与拉萨地块东缘察隅-然乌-波密和中拉萨地体花岗岩形成时代一致,表明腾-梁地块和拉萨地块一样,在早白垩世经历了一次广泛的岩浆事件。本文报道的早白垩世早期的岩浆事件(139.6~118.8 Ma),说明这次岩浆事件持续的时间更长,而且是多期次活动。

杨启军等<sup>[8]</sup>和 Xu 等<sup>[18]</sup>认为在高黎贡地区花岗岩存在分带性,从北东往南西形成时代依次为三叠纪、早白垩世、晚白垩世和新生代。事实上,在腾-梁

地块这种花岗岩的分带性并不明显。经详细的野外填图和年代学研究,本区三叠纪、早白垩世、晚白垩世和新生代花岗岩都存在<sup>[12~14,16,19]</sup>。

### 5.2 腾-梁地块存在新太古代宙基底?

印支地块的前寒武纪基底形成于元古代,高黎贡山群中高级变质岩的 Sm-Nd 模式年龄为 2.3~1.0 Ma<sup>[3,39]</sup>。Bodet 等<sup>[40]</sup>通过对印支地块内四条主要河流的碎屑锆石测年后认为,该区不存在大于 25 Ma 的基底岩石。虽然 Lan 等<sup>[41]</sup>报道了越南北部地区存在新太古代(2.8~2.5 Ga)的碎屑锆石,却把它与扬子克拉通北部的康定杂岩联系起来,而后者被证实形成于新元古代<sup>[42~44]</sup>而非新太古代。笔者对高黎贡山群变质岩锆石 U-Pb 测年表明,高黎贡山群形成于新元古代,经历了古生代、中生代和新生代岩浆作用和变质作用的再造(作者未刊资料)。

锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素体系结合可以揭示不同时期物质成分的演化。锆石 Hf 模式年龄代表锆石母岩浆从亏损地幔提取出来的时间,即地壳生长的时间。但是由于大多数锆石的母岩浆不是直接由地幔分异出来,这时二阶段模式年龄更接近新生代地壳生长时间。

本文对早白垩世花岗岩的锆石 Hf 同位素分析表明,140 Ma 锆石具有较低的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和太古代的模式年龄,结合本区片麻岩中 2 503 Ma 的碎屑锆石年龄记录,说明该花岗岩源区来自新太古代地壳熔融。印支地块高黎贡山群片麻岩中存在 2 440~2 750 Ma<sup>[44]</sup>碎屑锆石的事实支持了这一推论。与本区早白垩世晚期(110~127 Ma)和新生代花岗岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和二阶段模式年龄明显不同,这些花岗岩主要模式年龄为 1.1~1.7 Ga,说明它们可能源自不同的基底岩石。Song 等<sup>[37]</sup>根据印支地块变质岩中碎屑锆石记录的年龄信息与喜马拉雅造山带具有可比性,而与扬子克拉通具有明显的不同,认为印支地块在寒武-奥陶纪以前曾经增生到冈瓦纳大陆北缘,构成了拉萨地块的一部分。最近,在青藏高原的昌都地块除了发现有 40 Ga 的古老锆石,还有大量的新太古代碎屑锆石<sup>[45]</sup>,推测这些微陆块可能与北 Gondwana 超大陆存在亲缘关系。

### 5.3 腾-梁地块早白垩世花岗岩地球动力学背景

冈底斯岩基中生代花岗岩普遍富集 Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素和 La、Ce 等轻稀土元素,相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,表现出弧型岩浆岩的性质<sup>[46]</sup>。对于早白垩世花岗岩的成因仍存在争议,主要有以下四种认识:①新特提斯洋板片向北俯冲<sup>[46~48]</sup>;②班公湖-怒江洋板片向南俯

冲<sup>[38,49]</sup>;③拉萨地块和羌塘地块碰撞引起地壳加厚的熔融<sup>[18,50,51]</sup>;④在新特提斯洋的俯冲过程中,拉萨地体沿着班公湖-怒江结合带向北俯冲到羌塘地体之下<sup>[52]</sup>。目前比较多还是前两种认识。康志强等<sup>[53]</sup>的研究为中生代班公湖-怒江洋向南俯冲消减提供了直接的岩石学证据。

腾-梁地块、高黎贡山以及波密、察隅一带大量大布的早白垩纪花岗岩(130~110 Ma)显示出弧形花岗岩的地球化学特征<sup>[16,18,19]</sup>,且有广泛的壳源与幔源的岩浆混合作用<sup>[16,17,19,22,23]</sup>。这些花岗岩的形成与班公湖-怒江洋的俯冲作用有关<sup>[17~19,22,23]</sup>。在洋壳俯冲过程中,受俯冲带流体交代的地幔楔型区地幔橄榄岩部分熔融,形成基性-超基性岩浆<sup>[54,55]</sup>并底侵下地壳,导致下地壳物质部分熔融,形成酸性岩浆<sup>[56]</sup>。当少量的基性岩浆注入到酸性岩浆中时,温度迅速降低,结晶形成早白垩世花岗岩中广泛分布的辉长-闪长质包体<sup>[17,19]</sup>;当大量的基性岩浆注入时,二者混合较完全,同位素均一化,从而形成石英闪长岩岩浆<sup>[19]</sup>。

根据对本区早白垩世侵入岩的成因及构造环境分析<sup>[19]</sup>,本文倾向认为冈底斯早白垩世岩浆作用的动力学模式<sup>[22]</sup>也适应本区:班公湖-怒江特提斯洋从中二叠世末开始向南俯冲<sup>[49]</sup>,并一直持续到早白垩世晚期。由俯冲洋壳岩石圈诱导的幔源岩浆提供足够的热量引起腾-梁地块古老地壳物质的重熔并与重熔物质发生岩浆混合作用。最新的研究表明<sup>[49]</sup>,班公湖-怒江特提斯洋从中二叠世末开始向南的俯冲,在早白垩世晚期结束,在 113±5 Ma 发生洋壳断离,导致拉萨地体北缘区域上带状岩浆岩的爆发和幔源物质的显著增加。研究表明,班公湖-怒江特提斯在东部三江地区结束的时间(123~127 Ma)可能要早于西部拉萨地区(113±5 Ma)<sup>[19]</sup>。

## 6 结 论

(1) LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果表明,腾-梁地区白垩纪二长花岗岩存在 139.6±2.3 Ma, 129.7±5.2 Ma, 118.8±4.8 Ma 三个岩浆作用幕,腾-梁地区白垩纪经历了多期岩浆作用。

(2) 锆石 Hf 同位素揭示岩浆来自古老地壳的熔融。腾-梁地块可能存在新太古代的基底。

(3) 腾-梁地区早白垩世岩浆岩很可能是在班公湖-怒江洋向南俯冲的地球动力学背景下,由俯冲带之上的上地幔岩浆部分熔融提供热量诱发腾-梁地块古老地壳物质重熔。

**致 谢:** 锆石 U-Pb 年龄测试及 Hf 同位素分析得到了西北大学袁洪林教授、钟春蕾老师和硕士生陈开运的帮助,王立全研究员对文章提出建设性意见,在此一并致谢。

## 参考文献 (References):

- [1] Tapponnier R, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. Propagating extrusion tectonics in Asia, New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geol.*, 1982, 10: 611—616.
- [2] Arne D, Worley B, Wilson C, She F C, Foster D, Luo Z L, Liu S G, Paul H, Dirks G M. Differential exhumation in response to episodic rifting along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 1997, 280: 239—256.
- [3] 钟大赉. 川滇西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Zhong Dalai. Paleo-Tethyan orogenic belt in the western parts of the Sichuan and Yunnan Provinces[M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
- [4] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 喻学惠, 王勇, 周肃, 杨伟光. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(2): 121—138.
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, Yu Xuehui, Wang Yong, Zhou Su, Yang Weiguang. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(2): 121—138. (in Chinese with English abstract)
- [5] 路远发, 战明国, 陈开旭. 金沙江构造带嘎嘎雪山岩群玄武岩铀-铅同位素年龄[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(2): 155—158.
- Lu Yuanfa, Zhan Mingguo, Chen Kaixu. U-Pb isotopic dating of basalt from the Gajinxueshan Group in the Jinshajiang tectonic belt[J]. *Regional Geology of China*, 2000, 19(2): 155—158. (in Chinese with English abstract)
- [6] 闫全人, 王宗起, 刘树文, 石玉若, 李秋根, 闫臻, 王涛, 王建国, 张德会, 张宏远. 青藏高原东缘构造演化的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学框架[J]. *地质学报*, 2006, 80(9): 1287—1293.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Liu Shuwen, Shi Yuruo, Li Qiugeng, Yan Zhen, Wang Tao, Wang Jianguo, Zhang Dehui, Zhang Hongyuan. Eastern margin of the Tibetan Plateau: A window to probe the complex geological history from the Proterozoic to the Cenozoic revealed by SHRIMP analyses[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(9): 1287—1293. (in Chinese with English abstract)
- [7] Song S G, Ji J Q, Wei C J, Su L, Zheng Y D, Song B, Zhang L F. Early Paleozoic granite in Nujiang River of northwest Yunnan in SW China and its tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 2402—2406.
- [8] 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗振宇. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 817—834.
- Yang Qijun, Xu Yigang, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu. Geochronology and geochemistry of granites in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan, tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 817—834. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗振宇, 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 Qijun, Xu Yigang, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Shi Yuruo. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(5): 1092—1104. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李再会, 林仕良, 丛峰, 邹光富, 谢韬. 滇西腾冲梁河印支造山事件——花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石学证据[J]. *矿物岩石学杂志*, 2010, 29(3): 289—312.
- Li Zaihui, Lin Shiliang, Cong Feng, Zou Guangfu, Xie Tao. Indosinian orogenesis of the Tengchong-Lianghe Block, western Yunnan: Evidences from zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Granitoids[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(3): 289—312. (in Chinese with English abstract)
- [11] 丛峰, 林仕良, 李再会, 邹光富, 耿全如. 滇西腾冲地块片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 2009, 83(5): 1651—1658.
- Cong Feng, Lin Shiliang, Li Zaihui, Zou Guangfu, Geng Quanru. Zircon U-Pb age of gneissic granites in the Tengchong block, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(5): 1651—1658. (in Chinese with English abstract)
- [12] 丛峰, 林仕良, 唐红峰, 谢韬, 李再会, 邹光富, 彭智敏, 梁婷. 滇西梁河三叠纪花岗岩的锆石微量元素、U-Pb 和 Hf 同位素组成[J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1155—1164.
- Cong Feng, Lin Shiliang, Tang Hongfeng, Xie Tao, Li Zaihui, Zou Guangfu, Peng Zhiming, Liang Ting. Trace elements and Hf isotope compositions and U-Pb age of Igneous zircons from the Triassic granite in Lianghe, Western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1155—1164. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丛峰, 林仕良, 唐红峰, 谢韬, 李再会, 邹光富, 彭智敏, 梁婷. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩锆石稀土元素组成和 U-Pb 同位素年龄[J]. *吉林大学学报*, 2010, 40(3): 573—580.
- Cong Feng, Lin Shiliang, Tang Hongfeng, Xie Tao, Li Zaihui, Zou Guangfu, Peng Zhiming, Liang Ting. Rare earth element geochemistry and U-Pb age of zircons from granites in Tengchong-Lianghe Area, western Yunnan[J]. *Journal of Jilin University*, 2010, 40(3): 573—580. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢韬, 林仕良, 丛峰, 李再会, 邹光富, 李军敏, 梁婷. 滇西梁河地区钾长花岗岩锆石 LA-ICPMS、U-Pb 定年及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(3): 419—428.
- Xie Tao, Lin Shiliang, Cong Feng, Li Zaihui, Zou Guangfu, Li Junming, Liang Ting. LA-ICPMS zircon U-Pb Dating for K-feldspar Granites in Lianghe Region, Western Yunnan and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(3): 419—428. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李化启, 许志琴, 蔡志慧, 康哲民, 杨梅. 2011 滇西三江构造

- 造带西部腾冲地块内印支期岩浆热事件的发现及其意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2165—2172.
- Li Huaqi, Xu Zhiqin, Cai Zhihui, Kang Zhemin, Yang Mei. Indosinian epoch magmatic event and geological significance in the Tengchong block, western Yunnan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2165—2172. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 SPRIMP 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 Xuexiang, Zhu Luhua, Hu Zhaochu, Li Zhiqun. Zircon SHRIMP U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition for Early Cretaceous plutonic rocks in Tengchong block, south-eastern Tibet, and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3409—3421. (in Chinese with English abstract)
- [17] Cong F, Lin S L, Zou G F, Li Z H, Xie T, Peng Z M, Liang T. Magma mixing of granites at Lianghe: In-situ zircon analysis for trace elements, U-Pb ages and Hf isotopes [J]. Science in China 2011, 54 (9): 1346—1359.
- [18] Xu Y G, Yang Q J, Lan J B, Huang X L, Luo Z Y, 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. 2011, 10. 1016/j. jseas. 2011. 06. 018
- [19] 李再会, 林仕良, 丛峰, 周光富, 谢韬. 滇西腾冲-梁河地块石英闪长岩-二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1047—1060.
- Li Zaihui, Lin Shiliang, Cong Feng, Zhou Guangfu, Xie Tao. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition for quartz diorite and monzonitic granite from Tengchong-Lianghe block and its geological implications, western Yunnan [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1047—1060. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈福坤, 李秋立, 王秀丽, 李向辉. 滇西地区腾冲地块东侧混合岩锆石年龄和 Sm-Nd-Hf 同位素组成 [J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 439—448.
- Chen Fukun, Li Qiuli, Wang Xiuli, Li Xianghui. Zircon age and Sr-Nd-Hf isotopic composition of migmatite in the eastern Tengchong block, western Yunnan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2): 439—448. (in Chinese with English abstract)
- [21] Chiu H Y, Chung S L, Wu F Y, Liu D Y, Liang Y H, Lin Y J, Iizuka Y, Xie L W, Wang Y B, Chu M F. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from eastern Trans-Himalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet [J]. Tectonophysics, 2009, 477: 3—19.
- [22] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀龄, 杨岳衡. 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 同位素约束 [J]. 中国科学 (D 辑), 2009, 39(7): 833—848.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Yang Yuehen. 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 [J]. Science in China (D), 2009, 39 (7): 833—848. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘敏, 朱弟成, 赵志丹, 王立全, 莫宣学, 周长勇. 西藏冈底斯东部然乌地区早白垩世岩浆混合作用: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据 [J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 52—60.
- Liu Min, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Wang Liquan, Mo Xuanxue, Zhou Changyong. Early Cretaceous magma mixing in Ranwu Area of eastern Gangdese, Tibet: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 52—60. (in Chinese with English abstract)
- [24] Schwab M, Ratschbacher, Siebel W, McWilliams M, Minaev V, Lutkov V, Chen F, Stanek K, Nelson B, Frisch W, Wooden J L. Assembly of the Pamirs: Age and origin of magmatic belts from southern Tien Shan to the southern Pamirs and their relation to Tibet [J]. Tectonics, 2004, 23: TC400.
- [25] Leier A L, Kapp P, Gehrels G E, DeCelles P G. Detrital zircon geochronology of Carboniferous-Cretaceous strata in the Lhasa terrane, Southern Tibet [J]. Basin Res., 2007, 19: 361—378.
- [26] Yuan H L, Gao S, Liu X M. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostand. Geoanal. Res., 2004, 28: 353—370.
- [27] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [C]. McKibben M A, Shanks III W C, Ridley W I. (Eds.). Applications of microanalytical techniques to understanding mineralization processes, vol. 7 [A]. Rev. Econ. Geol., 1998: 1—35.
- [28] Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinik J N, Davis D W, Korsch R, Foudoulis C. TEMORA1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. Chem. Geol., 2003, 200: 155—170.
- [29] Ludwig K R. User's manual for a geochronological toolkit for microsoft excel [J]. Berkeley Geochronology Center, Spec. Publ., 2003: 4.
- [30] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. Chem. Geol., 2002, 192: 59—79.
- [31] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2004, 219: 311—324.
- [32] Blichert T J, Albarede F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1997, 148: 243—258.
- [33] Vervoort J D, Blichert T J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63: 533—55.
- [34] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In situ analysis of Hf isotopes. Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. Lithos, 2002,



- 61: 237–269.
- [35] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, 53: 27–62.
- [36] 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. U-Th-K 放射成因热对花岗岩冷却-结晶过程影响的计算及地质意义[J]. *中国科学(D 辑), 地球科学*, 2007, 37(2): 155–159.  
Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, Cheng Peirong. Estimate of influence of U-Th-K radiogenic heat on cooling process of granitic melt and its geological implications[J]. *Science in China (D)*, 2007, 37(2): 155–159. (in Chinese with English abstract)
- [37] Song S G, Niu Y L, Wei C J, Jian Q J, Li S. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent – An eastern extension of the Lhasa Block[J]. *Lithos*, 2010, 120: 327–346.
- [38] Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S, Wu F Y. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chem. Geol.*, 2009, 268: 298–312.
- [39] 翟明国, 从柏林, 乔广生, 杨瑞英. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年代学[J]. *岩石学报*, 1990, 11(4): 1–11.  
Zhai Mingguo, Cong Bailin, Qiao Guangsheng, Yang Ruiying. Sm-Nd and Rb-Sr geochronology of metamorphic rocks from SW Yunnan orogenic zones, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1990, 11(4): 1–11. (in Chinese with English abstract)
- [40] Bodet F, Scharer U. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, 64: 2067–2091.
- [41] Lan C Y, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Wang P L, Li H, Toan D V. First evidence for Archean continental crust in northern Vietnam and its implications for crustal and tectonic evolution in southeast Asia[J]. *Geology*, 2001, 29: 219–222.
- [42] Li Z X, Li X H, Kinny P D. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precamb. Res.*, 2003, 122: 85–109.
- [43] Chen Y L, Luo Z H, Zhao J X. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 48: 622–634.
- [44] Zhao X, Chen Y L, Li Z H. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the Kangding Complex and its geological significance[J]. *Geoscience*, 2006, 20: 378–385.
- [45] 何世平, 李荣社, 王超, 张洪飞, 计文化, 于浦生, 辜平, 时超. 青藏高原北羌塘昌都地块发现 ~4.0 Ga 碎屑锆石[J]. *科学通报*, 2011, 56(8): 573–582.  
He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao, Zhang Hongfei, Ji Wenhua, Yu Pusheng, Gu Pingyang, Shi Chao. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Changdu Block, North Qiangtang, Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(8): 573–582. (in Chinese with English abstract)
- [46] 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 刘传周. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. *中国科学(D)*, 39(7): 849–871.  
Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chang Sunlin, Liu Chuanzhou. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Science in China(D)*, 2009, 39(7): 849–871. (in Chinese with English abstract)
- [47] Coulon C, Maluski H, Bollinger C. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, 79: 281–302.
- [48] Ding L, Kapp P, Yin A, Deng W M, Zhong D L. Early Tertiary volcanism in the Qiangtang terrane of central Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 1833–1865.
- [49] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. The Lhasa terrane: Record of a micro-continent and its histories of drift and growth[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 301: 241–255.
- [50] Xu R H, Schärer U, Allègre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study[J]. *J. Geol.*, 1985, 93: 41–57.
- [51] Pearce J A, Mei H. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud[J]. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, A327: 169–201.
- [52] Kapp P, Yin A, Harrison T M, Ding L. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2005, 117: 865–878.
- [53] 康志强, 许继峰, 董彦辉, 王保弟, 陈建林. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slnajap 洋南向俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 303–314.  
Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Dong Yanhui, Wang Baodi, Chen Jianlin. Qushenla Formation volcanic rocks in north Lhasa block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethy's southward subduction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 303–314. (in Chinese with English abstract)
- [54] Iwamori H, Richardson C, Maruyama S. Numerical modeling of thermal structure, circulation of H<sub>2</sub> magmatism-metamorphism in subduction zones: Implications for evolution of arcs[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11: 109–119.
- [55] Nakamura H, Iwamori H. Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 431–445.
- [56] Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *J. Petrol.*, 2006, 47(3): 505–539.