

## 糜棱岩化过程中锆石的稳定性 ——以西南三江高黎贡、西盟地区花岗质糜棱岩为例

王冬兵<sup>1</sup>, 唐 渊<sup>1</sup>, 王保弟<sup>1</sup>, 罗 亮<sup>1</sup>, 廖世勇<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008)

**摘要:**自然条件下锆石的稳定性对于合理解释锆石年龄及深入理解锆石同位素年代学有重要意义。本文对西南三江造山带高黎贡山和西盟地区的花岗质糜棱岩进行了显微构造和锆石 U-Pb 年代学研究。高黎贡山和西盟糜棱岩中主要造岩矿物长石、石英、云母发生了明显的变形和重结晶,而锆石则以独立晶体或以残留核的形式保存了原始的岩浆结构。高黎贡山和西盟糜棱岩锆石 U-Pb 年龄分别为  $513 \pm 8$  Ma 和  $459 \pm 2$  Ma,代表花岗质原岩的时代。受新生代构造变质影响,锆石边部发育有窄的海绵状结构和溶蚀结构,指示变质重结晶作用发生在有少量流体参与条件下。石英变质机制为颗粒边界迁移重结晶,指示变形温度为  $500 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。石英 C 组构 EBSD 分析表明,糜棱岩经历了早期  $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$  和晚期  $400 \sim 550^{\circ}\text{C}$  的递进变形作用。岩石显微构造、锆石结构及年代学研究结果表明,岩石糜棱岩化过程中,还有少量流体参与的情况下,温度在  $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$  时锆石晶体结构就受到破坏,发生变质重结晶作用。这为解释自然界复杂条件下锆石年龄提供了重要约束。

**关键词:**锆石;稳定性;重结晶温度;糜棱岩化;花岗质糜棱岩;“三江”造山带

**中图分类号:**P588.33+2; P597

**文献标识码:**A

锆石广泛存在于各类岩石中,其富含 U 和 Th, 低普通 Pb 以及非常高的矿物稳定性,使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最常用和最有效的方法之一<sup>[1-3]</sup>。锆石是目前已知矿物同位素体系中封闭温度最高的,实验岩石学表明锆石中 Pb 的封闭温度高达  $900^{\circ}\text{C}$ <sup>[4-5]</sup>。研究者们根据锆石 U-Pb 体系高封闭温度的特征,将其广泛应用于确定岩浆岩结晶年龄和各种高级变质作用峰期年龄并取得了大量重要成果<sup>[6-10]</sup>。锆石的形成和改造受温度、压力、熔流体性质及物理化学条件等多因素影响。由于自然界这些条件非常复杂多变,复杂性远远超过实验室人工模拟条件,导致在自然界特别是在变质作用、成矿作用过程中锆石 U-Pb 同位素体系并不完全遵循高封闭温度这一结果。有实验表明,在有流体存在的情况下,当温度  $\geq 400^{\circ}\text{C}$  时,严重蜕晶化锆石可以很快发生重结晶作用<sup>[11-12]</sup>,没有蜕晶化

的锆石区域随着温度升高和/或流体作用时间增长,同样可以发生重结晶作用。尽管如此,人们迄今对自然界复杂变质条件下的锆石稳定性仍然缺乏深入了解。

糜棱岩是韧性剪切带广泛出露的特征性岩石,能够从不同尺度(野外露头到纳米级超显微)记录丰富的变形几何学、运动学特征及温压条件等,具有重要的地球动力学意义。糜棱岩由构造前或同构造期的岩石在不同地壳层次受动力变质作用形成,典型特征是矿物经受了塑性变形,并由塑性变形导致了明显的重结晶及强烈的优选方位。对糜棱岩开展显微构造、超显微构造研究能够提供变形温度条件等重要信息<sup>[13-15]</sup>。

为研究自然条件下糜棱岩锆石稳定性和变质重结晶温度条件,选择西南三江造山带高黎贡山韧性剪切带和西盟穹形隆起带花岗质糜棱岩开展显

收稿日期: 2020-06-01; 改回日期: 2020-10-30

作者简介: 王冬兵(1981—),男,高级工程师,主要从事西南地区基础地质矿产调查研究。E-mail: wangdb06@163.com

资助项目: 中国地质调查局项目(Nos. DD20190053, DD20160016); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0702); 国家自然科学基金项目(No. 41802031)

微构造与锆石年代学综合研究。选取研究的糜棱岩同时满足两个条件:(1)原岩是构造前花岗岩,以便于通过锆石结构和 U-Pb 年龄确定锆石是否被改造;(2)为中—上地壳层次糜棱岩,未发生部分熔融,以保证研究的样品在固态单相条件下变形。对糜棱岩开展显微构造、石英 EBSD 组构分析以限定变形温度条件,对糜棱岩锆石开展形态、结构和 U-Pb 年龄研究以确定锆石变质特征,进而综合探讨糜棱岩锆石稳定性,约束重结晶温度。

## 1 地质背景与样品

西南三江(怒江、澜沧江、金沙江)地区是全球最复杂的造山带之一,经历了长期、多阶段、不同构造体制转换,不仅保存了特提斯多阶段构造演化的

重要记录,而且还是新生代以来藏东南大陆块体挤出、旋转和逃逸的重要场所<sup>[16-22]</sup>。采用地质历史时期优势构造事件奠定的格架划分,西南三江造山带由一系列规模不等的结合带及其间稳定地块/弧地体拼贴构成。在新生代,受印度—欧亚大陆碰撞及其后的持续汇聚作用影响,还发育高黎贡山剪切带、崇山剪切带、哀牢山剪切带等著名的条带状构造带(图1)。这些条带状构造带出露一系列中深变质岩(苍山岩群、哀牢山岩群、瑶山岩群、崇山岩群、高黎贡山岩群、西盟岩群等),早期研究者根据它们强烈变质变形特征和不精确的同位素数据认为是前寒武纪基底岩石,但最新研究表明它们不是古老基底岩石,而是不同时代、不同性质的岩石受新生代变质影响而形成的变质杂岩<sup>[23-24]</sup>。

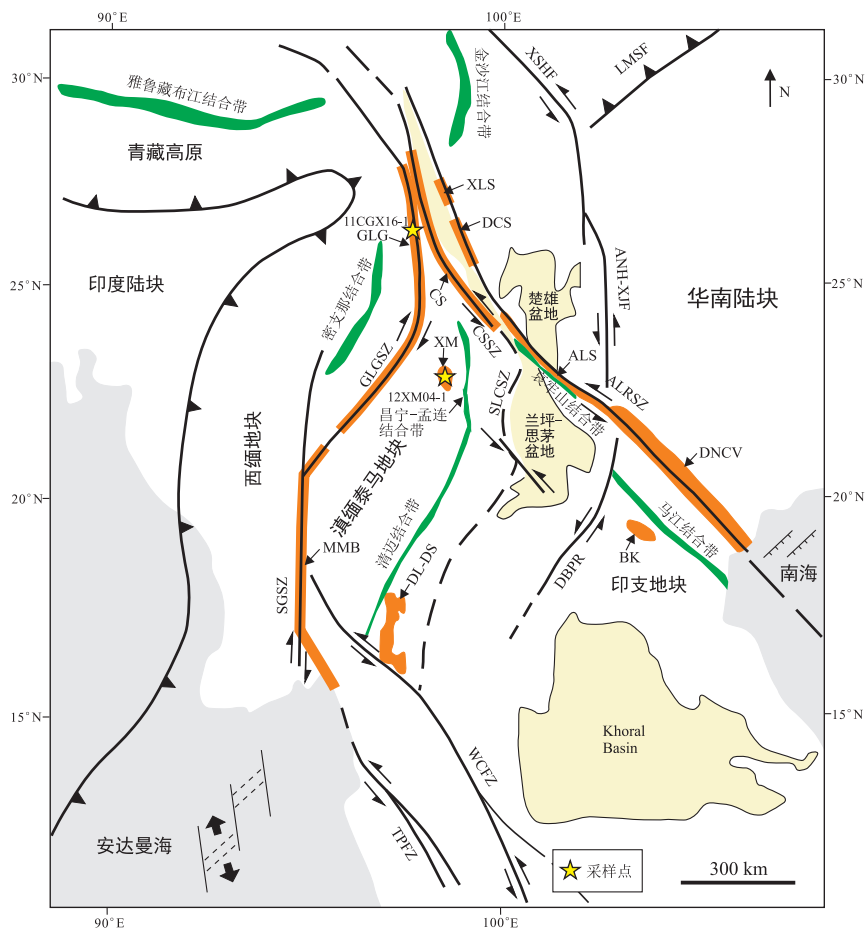


图1 三江—东南亚构造格架简图及主要剪切带、变质杂岩(据文献[28-29]修改)

XLS. 雪山山杂岩;DCS. 点苍山杂岩;ALS. 哀牢山杂岩;DNCV. 大象山杂岩;CS. 崇山杂岩;XM. 西盟杂岩;GLG. 高黎贡杂岩;DL-DS. Doi Lanthanon-Doi Suthep 杂岩;BK. Bu khang 杂岩;MMB. 抹谷变质杂岩;LMSF. 龙门山断裂;XSHF. 鲜水河断裂;ANH-XJF. 安宁河—小江断裂;ALRSZ. 哀牢山—红河剪切带;SLCSZ. 南澜沧江剪切带;CSSZ. 崇山剪切带;GLGSZ. 高黎贡剪切带;SGSZ. 实皆剪切带;WCFZ. 王朝断裂带;TPFZ. 三塔断裂带;DBPF. 莫边府断裂

Fig.1 Tectonic schematic map of Sanjiang-Southeast Asia showing major faults, shear zones and the metamorphic complexes located in the area (modified after references [28-29])

高黎贡山剪切带沿高黎贡山山脉发育,被认为是三江地区发生“大陆逃逸”与地块旋转的西边界,带内出露的岩石被定义为“高黎贡山岩群”,剪切带内的岩石普遍发育近水平右行剪切构造,部分岩石同时发育右行剪切和熔融作用,变质作用时间为 68 ~ 40 Ma, 32 ~ 13 Ma<sup>[25-27]</sup>。花岗质糜棱岩 11GLG16-1 采自高黎贡山剪切带北段称杆乡公路剖面(图 1),剖面呈东西向横穿整个高黎贡山变质带,露头良好,出露的岩石类型有花岗岩、花岗片麻岩、黑云斜长片麻岩、条带状混合岩化片麻岩、眼球状片麻岩、糜棱岩等。剖面最西部为未变质变形的花岗岩,往东岩石逐渐变形变质,发育片麻状构造、眼球状构造,长石旋转残斑和石英拔丝拉长等典型的糜棱岩构造;中部面理不发育,线理非常发育,为典型的 L-型构造岩;东部则又出现片麻状构造、眼球状构造,长石旋转残斑和石英拔丝拉长等典型的糜棱岩构造。花岗质糜棱岩 11CGX16-1 采样点地理坐标为(26°17.27'N, 98°50.14'E, 1457 m),岩石呈灰白色,长石、石英强烈拔丝拉长定向,线理非常发

育,倾伏角度小( $154^{\circ} \angle 11^{\circ}$ ),面理不发育,矿物均已细粒化,为典型的 L 型构造岩(图 2a、b)。

西盟穹形隆起位于滇西南西盟老县城勐卡镇一带(图 1),出露的岩石被定义为“西盟岩群”,早期认为是受逆冲推覆作用出露的基底岩石,近期研究表明为一穹形隆起构造,核部出露奥陶纪花岗质糜棱岩和未变形的新生代花岗岩,边部发育浅变质岩系,新生代糜棱岩构造作用时间为 23 ~ 20 Ma、16 ~ 8 Ma<sup>[23, 30-33]</sup>。花岗质糜棱岩 12XM04-1 采自西盟县老县城勐卡镇—新厂弹石路阿莫村小学篮球场西南采石场,采样点地理坐标为(22°48.88'N, 99°26.94'E, 1639m)。野外露头上构造面理非常发育,倾向 326°,倾角 24°,线理中等发育,倾伏向 340°,倾伏角 13°。岩石主要由长石、石英、云母及少量的电气石等矿物构成。长石部分呈残斑状,大多数拉长定向排列,石英、云母等矿物几乎全部拔丝拉长,部分长石残斑拖尾及发育的“S-C”组构指示岩石遭受了顺时针方向的剪切作用(图 2c、d)。用于石英组构 EBSD 分析的样品 11XM04-1 采自同一露头位置。

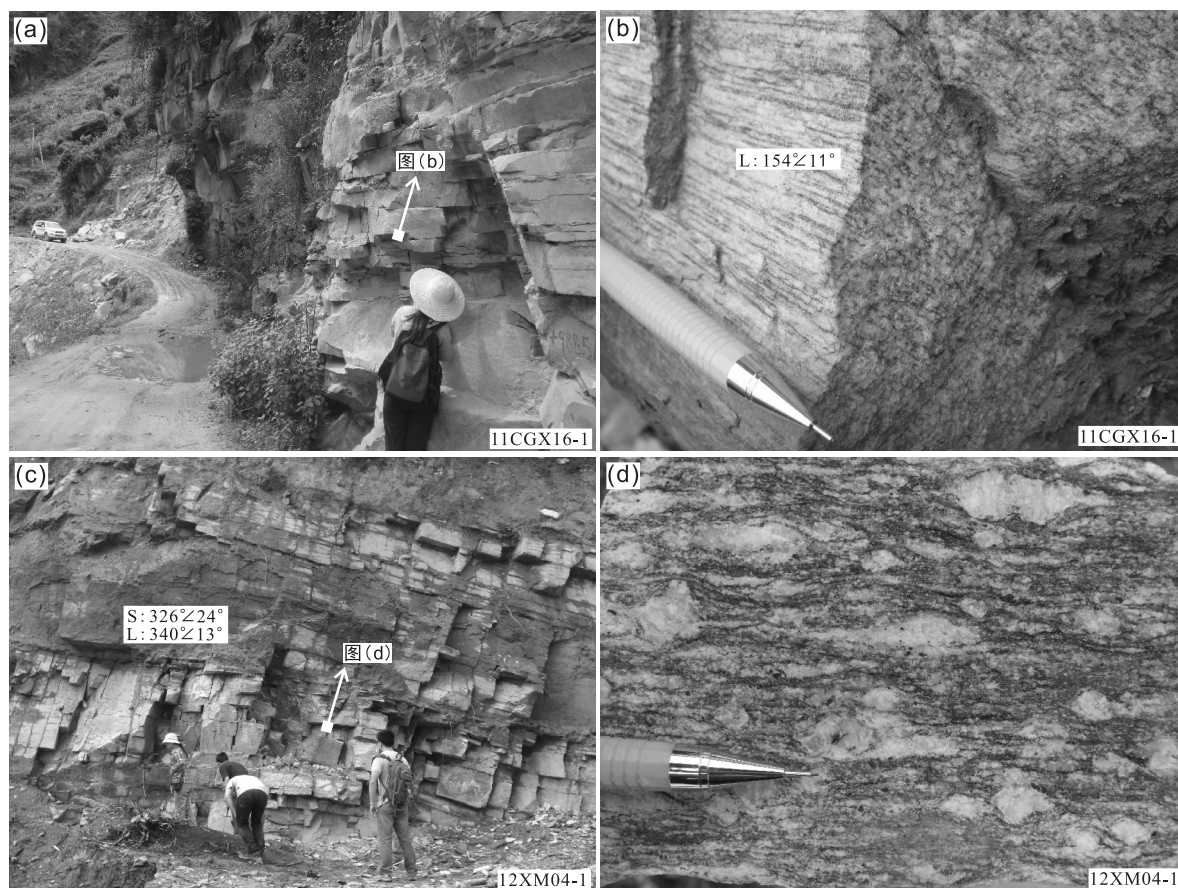


图 2 糜棱岩露头及岩石剪切特征。(a), (b). 高黎贡;(c), (d). 西盟

Fig. 2. Field outcrop and shear structure of mylonites in the Gaoligong (a and b) and Ximeng (c and d)



## 2 岩石显微构造与温度条件

温度和压力是影响岩石和矿物变形的重要因素,在不同的温压条件下,受不同变形机制的控制,会显示出不同的变形行为和变形现象<sup>[13]</sup>。对变形岩石进行详细地显微构造变形现象观察,可以大致估算其变形温压条件。

高黎贡花岗质糜棱岩(11CGX16-1)主要由石英、长石及少量黑云母组成,显微镜下总体上呈现由矩形石英多晶条带和长石多晶条带组成的显微分层,黑云母晶体呈片状不连续定向排列(图3a)。长石多晶条带中为完全重结晶的细小新晶粒集合体(图3a,红色箭头所示)。石英条带中的新晶粒呈现出多边形粒状形态,局部可见重结晶新颗粒( $Qz_2$ )内含有老颗粒残晶( $Qz_1$ )(图3b),表明其主要是由颗粒边界迁移重结晶作用形成,推测其变形温度为高温条件( $500 \sim 700^\circ\text{C}$ )<sup>[13-15]</sup>。

西盟花岗质糜棱岩(12XM04-1)主要由石英、长石及少量白云母组成(图3c、d)。长石为残斑状且长轴定向排列,晶体边缘发生膨凸重结晶作用而表

现出核幔构造(图3d)。石英呈矩形多晶条带,或绕长石残斑发育,或平行于长石残斑长轴定向的方向发育;条带内部的锯齿状颗粒形态表明颗粒边界迁移重结晶作用在变形过程中占主导地位。白云母晶体或呈鱼状,或平行于石英条带连续定向排列。石英发生颗粒边界迁移重结晶作用也指示其经历了高温条件下( $500 \sim 700^\circ\text{C}$ )的塑性变形作用<sup>[13-15]</sup>。

## 3 石英 EBSD 组构分析与温度条件

矿物晶内变形过程中温度常常影响着不同滑移系类型的发育,进而影响着晶体组构型式<sup>[13, 15]</sup>。在非共轴变形环境下,石英的组构与温度关系密切,两者有较好的对应关系<sup>[34-36]</sup>。石英的晶体内部可以出现滑移系有底面 $\langle a \rangle$ 、菱面 $\langle a \rangle$ 、柱面 $\langle a \rangle$ 和柱面 $\langle c \rangle$ <sup>[37]</sup>;石英的C轴组构图有点极密、大圆环带、小圆环带、交叉环带等四种基本类型。利用电子背散射衍射仪(EBSD)对变形石英进行组构分析,可以有效揭示变形温度条件。在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室对研究的糜棱岩石英进行电子背散射(EBSD)组构分析。

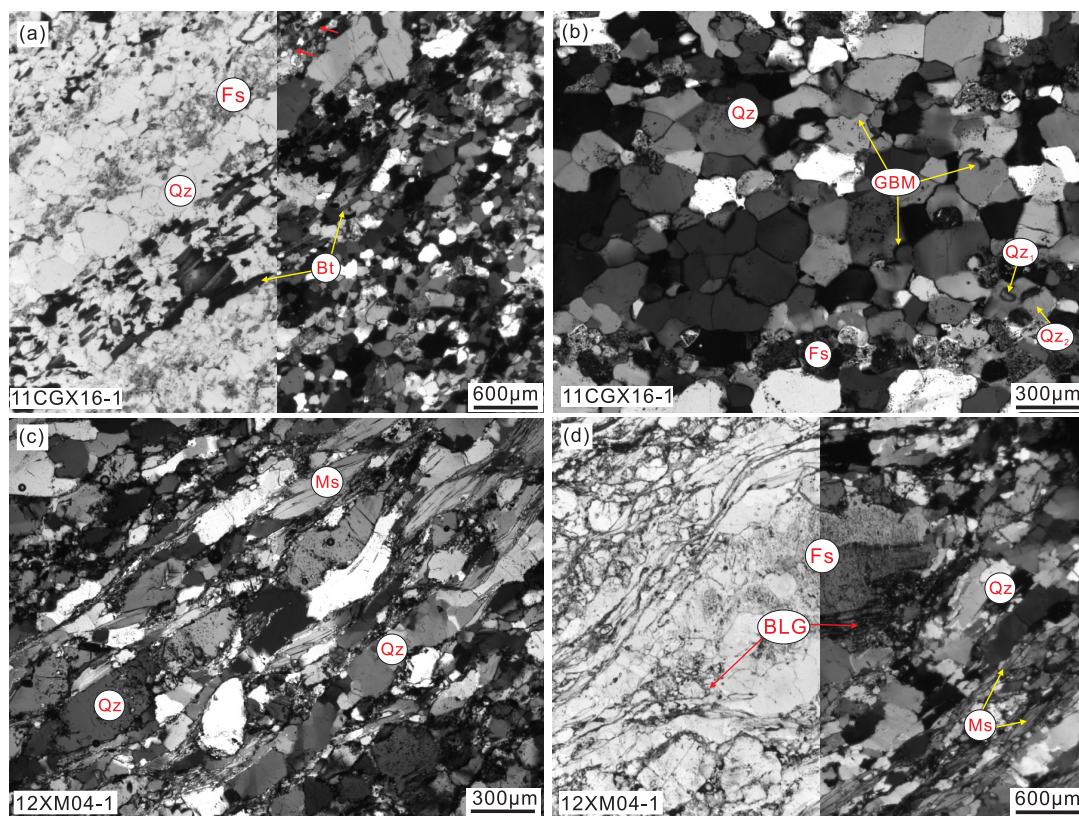


图3 糜棱岩显微构造特征

Fs. 长石, Qz. 石英, Bt. 黑云母, Ms. 白云母, GBM. 颗粒边界迁移重结晶现象, BLG. 膨凸重结晶现象, 红色箭头指示重结晶新晶粒

Fig. 3 Microstructures of the mylonites

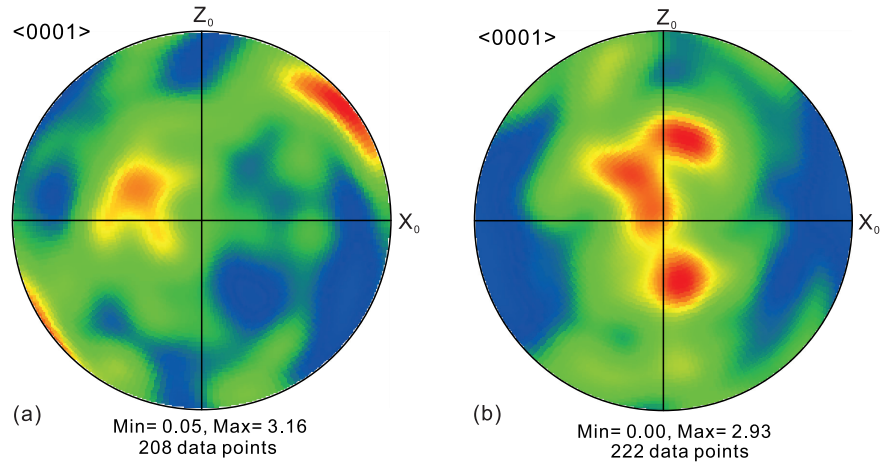


图4 高黎贡糜棱岩(11CGX16-1)(a)和西盟糜棱岩(11XM04-1)(b)石英C轴组构图

Fig. 4 Quartz c-axis fabrics of the mylonites from Gaoligong (a) and Ximeng (b)

高黎贡花岗质糜棱岩样品(11CGX16-1)的石英C轴组构图主要由位于 $X_0Z_0$ 面上I-III象限的一对极密、 $Y_0$ 轴附近极密及大圆环带叠加组成(图4a),这种组构形式为糜棱岩中常见的样式; $Y_0$ 轴附近极密为中温条件下( $550 \sim 650^\circ\text{C}$ )柱面 $\langle a \rangle$ 滑移的产物,I-III象限的一对极密偏离 $X_0$ 的角度约 $40^\circ$ ,可能为较低温度下( $400 \sim 550^\circ\text{C}$ )菱面 $\langle a \rangle$ 滑移的结果。该样品的组构样式表明其经历了早期中温到后期低温

条件的递进变形作用。

西盟花岗质糜棱岩样品(12XM04-1)的石英C轴组构图表现出 $Y_0$ 轴附近的点极密或极密群(图4b),该类组构主要形成于中等温度条件,大约为 $550 \sim 650^\circ\text{C}$ ,是由柱面 $\langle a \rangle$ 滑移完成<sup>[15, 36-37]</sup>;此外,还发育了IV型微弱极密,表明岩石后期叠加了相对低温( $400 \sim 550^\circ\text{C}$ )条件下的变形。

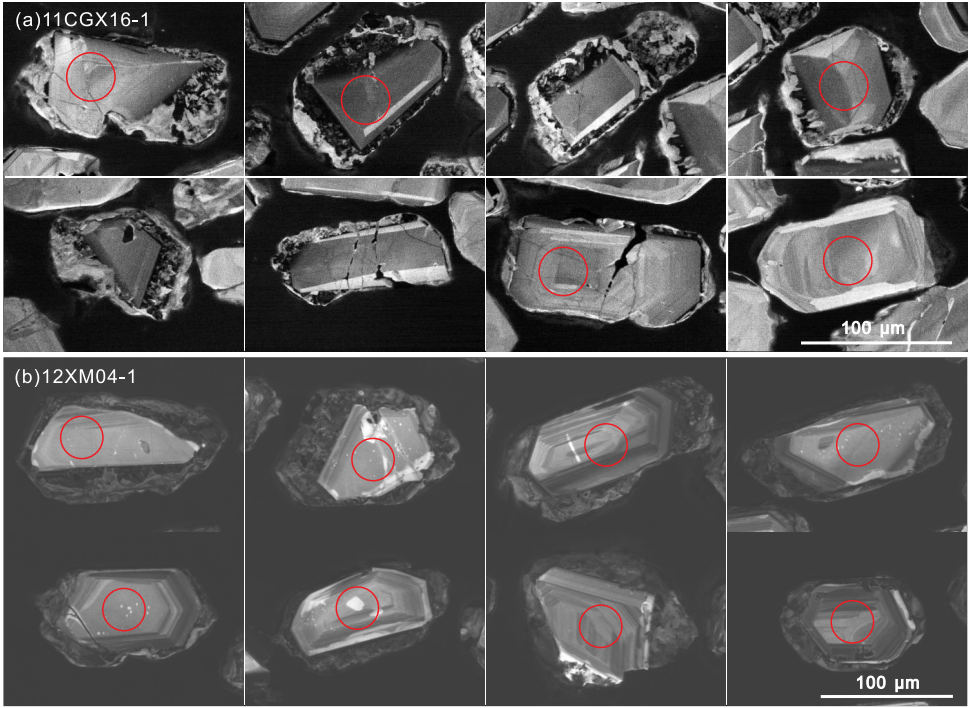


图5 高黎贡糜棱岩(a)和西盟糜棱岩(b)代表性锆石CL特征

Fig. 5. Representative CL images of zircons from Gaoligong mylonite (a) and Ximeng mylonite (b)

表 1 糜棱岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the granitic mylonite

| 分析号               | 含量(×10 <sup>-6</sup> ) |      | Th/U | 同位素比值                                |        |                                     |        |                                     |        | 年龄(Ma)                              |      |                                     |     |
|-------------------|------------------------|------|------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-----|
|                   | Th                     | U    |      | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1σ     | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1σ     | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1σ     | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1σ   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1σ  |
| 高黎贡糜棱岩(11CGX16-1) |                        |      |      |                                      |        |                                     |        |                                     |        |                                     |      |                                     |     |
| 11CGX16-1-01      | 186                    | 370  | 0.50 | 0.0578                               | 0.0022 | 0.6755                              | 0.0242 | 0.0850                              | 0.0015 | 524                                 | 15   | 526                                 | 11  |
| 11CGX16-1-02      | 251                    | 522  | 0.48 | 0.0616                               | 0.0020 | 0.6723                              | 0.0213 | 0.0790                              | 0.0013 | 522                                 | 13   | 490                                 | 10  |
| 11CGX16-1-03      | 375                    | 550  | 0.68 | 0.0615                               | 0.0023 | 0.6986                              | 0.0249 | 0.0825                              | 0.0014 | 538                                 | 15   | 511                                 | 11  |
| 11CGX16-1-04      | 234                    | 447  | 0.52 | 0.0571                               | 0.0028 | 0.6638                              | 0.0323 | 0.0844                              | 0.0018 | 517                                 | 20   | 523                                 | 14  |
| 11CGX16-1-05      | 688                    | 1029 | 0.67 | 0.0563                               | 0.0017 | 0.6251                              | 0.0185 | 0.0802                              | 0.0013 | 493                                 | 12   | 497                                 | 10  |
| 11CGX16-1-06      | 211                    | 332  | 0.64 | 0.0593                               | 0.0027 | 0.7090                              | 0.0319 | 0.0876                              | 0.0015 | 544                                 | 19   | 541                                 | 11  |
| 11CGX16-1-07      | 145                    | 331  | 0.44 | 0.0521                               | 0.0032 | 0.5792                              | 0.0340 | 0.0808                              | 0.0017 | 464                                 | 22   | 501                                 | 14  |
| 11CGX16-1-08      | 183                    | 396  | 0.46 | 0.0619                               | 0.0027 | 0.7120                              | 0.0307 | 0.0829                              | 0.0015 | 546                                 | 18   | 514                                 | 11  |
| 11CGX16-1-09      | 119                    | 278  | 0.43 | 0.0570                               | 0.0032 | 0.6428                              | 0.0334 | 0.0825                              | 0.0019 | 504                                 | 21   | 511                                 | 15  |
| 11CGX16-1-10      | 251                    | 409  | 0.61 | 0.0580                               | 0.0020 | 0.6656                              | 0.0230 | 0.0828                              | 0.0014 | 518                                 | 14   | 513                                 | 11  |
| 11CGX16-1-11      | 283                    | 475  | 0.60 | 0.0578                               | 0.0018 | 0.6721                              | 0.0207 | 0.0841                              | 0.0013 | 522                                 | 13   | 521                                 | 10  |
| 11CGX16-1-12      | 328                    | 561  | 0.58 | 0.0579                               | 0.0016 | 0.6531                              | 0.0191 | 0.0809                              | 0.0012 | 510                                 | 12   | 502                                 | 9   |
| 11CGX16-1-13      | 154                    | 315  | 0.49 | 0.0604                               | 0.0027 | 0.7052                              | 0.0293 | 0.0853                              | 0.0018 | 542                                 | 17   | 528                                 | 14  |
| 11CGX16-1-14      | 282                    | 472  | 0.60 | 0.0605                               | 0.0022 | 0.7071                              | 0.0252 | 0.0846                              | 0.0015 | 543                                 | 15   | 523                                 | 11  |
| 11CGX16-1-15      | 165                    | 359  | 0.46 | 0.0603                               | 0.0023 | 0.6909                              | 0.0256 | 0.0827                              | 0.0014 | 533                                 | 15   | 512                                 | 11  |
| 西盟糜棱岩(12XM04-1)   |                        |      |      |                                      |        |                                     |        |                                     |        |                                     |      |                                     |     |
| 12XM04-1-01       | 40.8                   | 294  | 0.14 | 0.0557                               | 0.0026 | 0.5661                              | 0.0260 | 0.0733                              | 0.0010 | 455                                 | 16.9 | 456                                 | 6.2 |
| 12XM04-1-02       | 53.4                   | 356  | 0.15 | 0.0543                               | 0.0020 | 0.5568                              | 0.0214 | 0.0742                              | 0.0010 | 449                                 | 14.0 | 462                                 | 6.2 |
| 12XM04-1-03       | 96.0                   | 283  | 0.34 | 0.0543                               | 0.0016 | 0.5529                              | 0.0159 | 0.0735                              | 0.0008 | 447                                 | 10.4 | 457                                 | 4.9 |
| 12XM04-1-04       | 104                    | 414  | 0.25 | 0.0538                               | 0.0021 | 0.5477                              | 0.0209 | 0.0733                              | 0.0008 | 443                                 | 13.7 | 456                                 | 5.0 |
| 12XM04-1-05       | 27.3                   | 148  | 0.18 | 0.0547                               | 0.0034 | 0.5503                              | 0.0329 | 0.0743                              | 0.0012 | 445                                 | 21.5 | 462                                 | 7.3 |
| 12XM04-1-06       | 68.3                   | 457  | 0.15 | 0.0526                               | 0.0022 | 0.5387                              | 0.0229 | 0.0732                              | 0.0010 | 438                                 | 15.1 | 456                                 | 5.9 |
| 12XM04-1-07       | 52.6                   | 414  | 0.13 | 0.0551                               | 0.0020 | 0.5683                              | 0.0201 | 0.0743                              | 0.0008 | 457                                 | 13.0 | 462                                 | 4.9 |
| 12XM04-1-08       | 119                    | 286  | 0.42 | 0.0580                               | 0.0033 | 0.5873                              | 0.0308 | 0.0732                              | 0.0010 | 469                                 | 19.7 | 456                                 | 6.0 |
| 12XM04-1-10       | 95.5                   | 362  | 0.26 | 0.0569                               | 0.0031 | 0.5832                              | 0.0319 | 0.0733                              | 0.0009 | 466                                 | 20.5 | 456                                 | 5.5 |
| 12XM04-1-11       | 61.2                   | 288  | 0.21 | 0.0575                               | 0.0025 | 0.5850                              | 0.0248 | 0.0739                              | 0.0011 | 468                                 | 15.9 | 459                                 | 6.3 |
| 12XM04-1-12       | 76.3                   | 536  | 0.14 | 0.0562                               | 0.0021 | 0.5855                              | 0.0220 | 0.0747                              | 0.0010 | 468                                 | 14.1 | 464                                 | 5.8 |
| 12XM04-1-13       | 86.8                   | 732  | 0.12 | 0.0561                               | 0.0019 | 0.5764                              | 0.0196 | 0.0738                              | 0.0009 | 462                                 | 12.6 | 459                                 | 5.4 |
| 12XM04-1-15       | 94.3                   | 774  | 0.12 | 0.0560                               | 0.0017 | 0.5721                              | 0.0169 | 0.0733                              | 0.0007 | 459                                 | 10.9 | 456                                 | 4.0 |
| 12XM04-1-16       | 68.6                   | 470  | 0.15 | 0.0559                               | 0.0020 | 0.5721                              | 0.0201 | 0.0739                              | 0.0008 | 459                                 | 13.0 | 460                                 | 4.9 |
| 12XM04-1-17       | 76.1                   | 507  | 0.15 | 0.0564                               | 0.0018 | 0.5856                              | 0.0187 | 0.0745                              | 0.0009 | 468                                 | 12.0 | 463                                 | 5.1 |
| 12XM04-1-18       | 139                    | 355  | 0.39 | 0.0572                               | 0.0038 | 0.5859                              | 0.0392 | 0.0743                              | 0.0013 | 468                                 | 25.1 | 462                                 | 7.7 |
| 12XM04-1-21       | 49.6                   | 333  | 0.15 | 0.0559                               | 0.0023 | 0.5680                              | 0.0232 | 0.0736                              | 0.0008 | 457                                 | 15.0 | 458                                 | 5.0 |
| 12XM04-1-22       | 49.0                   | 239  | 0.21 | 0.0556                               | 0.0027 | 0.5662                              | 0.0264 | 0.0737                              | 0.0010 | 456                                 | 17.1 | 459                                 | 6.1 |
| 12XM04-1-23       | 54.9                   | 276  | 0.20 | 0.0565                               | 0.0025 | 0.5697                              | 0.0245 | 0.0730                              | 0.0009 | 458                                 | 15.9 | 454                                 | 5.5 |
| 12XM04-1-24       | 58.9                   | 470  | 0.13 | 0.0563                               | 0.0020 | 0.5835                              | 0.0208 | 0.0746                              | 0.0008 | 467                                 | 13.3 | 464                                 | 4.9 |

4 锆石结构与 U-Pb 年龄

花岗质糜棱岩(11CGX16-1)中锆石非常丰富, 锆石晶体为无色透明、浅黄色,大多数为自形柱状, 长轴长 70 ~ 110 μm,长轴与短轴比例为 3:2 ~ 2:1。

随机对 150 颗锆石进行制靶和阴极发光照相(CL), 其中 108 颗锆石内部结构单一,具有微弱的岩浆结晶振荡环带,另外 42 颗锆石有核-边结构。核-边结构的锆石,核部较宽,具有微弱的岩浆结晶振荡环带;边部较窄,大多数为 1 ~ 5μm,少量为 5 ~ 10μm,



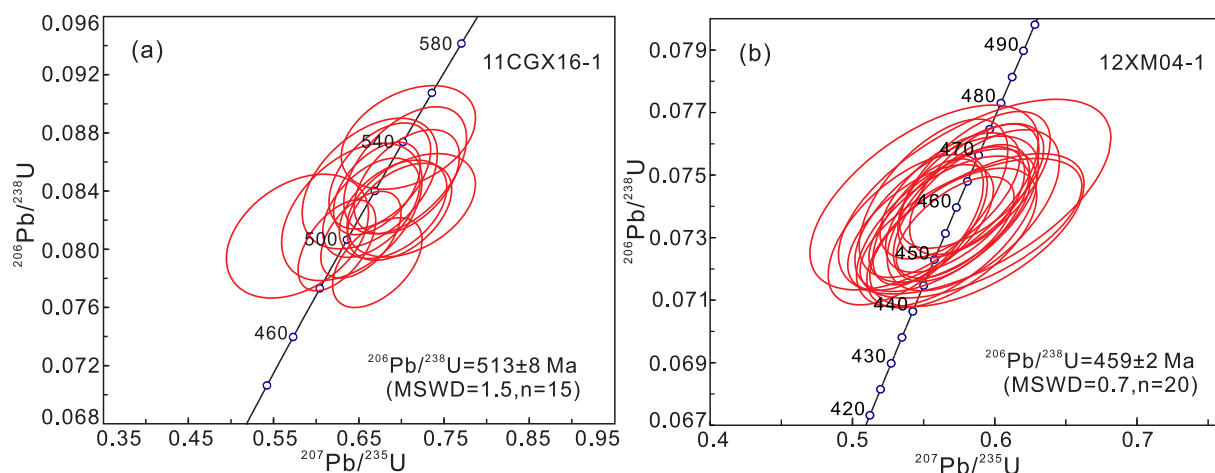


图6 高黎贡糜棱岩(a)和西盟糜棱岩(b)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams of zircons from Gaoligong mylonite (a) and Ximeng mylonite (b)

不满足定年条件(图 5a)。核-边结构的锆石总体保持了原始晶体形态,边部具有明显的海绵状结构和溶蚀结构,海绵状结构区域显示由外向内改造程度增强,这些特征指示边部是在有少量流体条件下的变质重结晶锆石<sup>[3]</sup>。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 对花岗质糜棱岩(11CGX16-1)锆石进行 U-Pb 定年,数据列于表 1(下同)。对单一岩浆结构锆石和锆石核部进行分析,分析点结果均分布在谐和线上(图 6a),Th/U 值较高(0.43 ~ 0.68), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $513 \pm 8 \text{ Ma}$  (MSWD = 1.5, n = 15),代表糜棱岩的花岗质原岩形成时代。锆石 U-Pb 定年未获得变质年龄,但根据高黎贡剪切带发生深熔变质作用和右行走滑运动时间为 68 ~ 40 Ma、32 ~ 13 Ma<sup>[25-27]</sup>,推断该糜棱岩变质时间在此范围,其明显晚于原岩时代。

西盟花岗质糜棱岩(12XM04-1)中锆石较多,为无色透明、浅黄色晶体,大多数为自形柱状,长轴长 100 ~ 150  $\mu\text{m}$ ,长轴与短轴比例为 2:1 ~ 3:1。200 颗锆石 CL 图像显示所有锆石有核-边结构,核部较宽,具有岩浆结晶振荡环带;边部较窄,大多数宽为几个微米,少量可达 10 ~ 15  $\mu\text{m}$ (图 5b)。锆石保持了原有的晶体形态,边部具有明显的海绵状结构,海绵状结构区域与未改造的岩浆振荡环带区域呈斜切状、港湾状接触,这些特征说明边部为有少量流体活动的变质重结晶锆石<sup>[3]</sup>。对锆石核部进行 U-Pb 定年分析,分析点均分布在谐和线上(图 6b),Th/U 值为 0.12 ~ 0.42, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $459 \pm 2 \text{ Ma}$  (MSWD = 0.7, n = 20),代表花岗质糜棱

岩的原岩时代。未获得锆石变质年龄,前人对西盟杂岩研究表明变质时代为 23 ~ 20 Ma、16 ~ 8 Ma<sup>[23, 33]</sup>,推断该糜棱岩变质时间在此范围。

## 5 糜棱岩锆石稳定性及重结晶温度

高黎贡、西盟地区的糜棱岩显微结构、锆石结构和 U-Pb 年代学揭示出以下几个事实:(1)糜棱岩由早古生代( $513 \pm 8 \text{ Ma}$ 、 $459 \pm 2 \text{ Ma}$ )的花岗岩受新生代构造变形变质作用形成;(2)早期花岗岩的长石、石英、云母等主要矿物几乎全部发生了变形和重结晶作用,而锆石仅有边部被改造,但核部仍然保留了原始结构和 U-Pb 同位素体系,部分单颗粒锆石完全没有受到影响;(3)受到影响的锆石是在有少量流体条件下发生的变质重结晶。由此可见,锆石是一种很稳定的副矿物,其稳定性远远超过常见造岩矿物长石、石英、云母等,在理想晶体或正常的岩浆体系下锆石 U-Pb 同位素体系封闭温度可以用实验封闭温度 ~ 900°C 来约束。糜棱岩化过程中微量流体对锆石的变质重结晶起到了促进作用。

糜棱岩中石英显微结构显示其变形机制为颗粒边界迁移重结晶作用,指示发生变形温度范围为 500 ~ 700°C。石英晶体优选方位(组构)记录了早期变形变质温度为 550 ~ 650°C,晚期叠加变形变质温度为 400 ~ 550°C。我们选择较高的温度 550 ~ 650°C 作为对自然条件下糜棱岩化过程中锆石 U-Pb 同位素体系重结晶温度的约束。

## 6 结论

(1)高黎贡和西盟地区花岗质糜棱岩中锆石能

够以独立晶体或残留核的形式保存原始岩浆结构和 U-Pb 同位素体系,糜棱岩化过程中微/少量流体会促进锆石发生重结晶作用。

(2)自然条件下糜棱岩化过程中温度在 550 ~ 650°C 时锆石就会发生变质重结晶,该温度可对自然条件下糜棱岩锆石 U-Pb 同位素体系封闭温度范围作大致约束。

## 参考文献:

- [1] Hanchar J M, Hoskin P W O. Zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53: V ~ VII.
- [2] Harley S L, Kelly N M. Zircon Tiny but Timely [J]. *Elements*, 2007, 3(1): 13 ~ 18.
- [3] Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(5): 1554 ~ 1569.
- [4] Lee J K, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 159 ~ 162.
- [5] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 2000, 172(1-2): 5 ~ 24.
- [6] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton [J]. *Geology*, 2006, 34(6): 417 ~ 420.
- [7] Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago [J]. *Nature*, 2001, 409: 175 ~ 178.
- [8] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of > = 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton [J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339 ~ 342.
- [9] Wu Y B, Gao S, Zhang H F, et al. Timing of UHP metamorphism in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China; evidence from zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2008, 155(1): 123 ~ 133.
- [10] Zong K Q, Liu Y S, Gao C G, et al. In situ U-Pb dating and trace element analysis of zircons in thin sections of eclogite: Refining constraints on the ultra high-pressure metamorphism of the Sulu terrane, China [J]. *Chemical Geology*, 2010, 269: 237 ~ 251.
- [11] Rizvanova N G, Levchenkov O A, Belous A E, et al. Zircon reaction and stability of the U-Pb isotope system during interaction with carbonate fluid; experimental hydrothermal study [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 139(1): 101 ~ 134.
- [12] Geisler T, Ulonska M, Schleicher H, et al. Leaching and differential recrystallization of metamict zircon under experimental hydrothermal conditions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(1): 53 ~ 65.
- [13] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 变形显微构造识别手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1 ~ 96.
- [14] 向必伟, 朱光, 王勇生, 等. 糜棱岩化过程中矿物变形温度计 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(2): 126 ~ 135.
- [15] Passchier C W, Thouw R A J. *Microtectonics* [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 1 ~ 366.
- [16] 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 775 ~ 786.
- [17] 范承钧, 张翼飞. 云南西部地质构造格局 [J]. *云南地质*, 1993, 12(2): 139 ~ 147.
- [18] Leloup P H, Harrison T M, Ryerson F J, et al. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan [J]. *Journal of geophysical research*, 1993, 98(B4): 6715 ~ 6743.
- [19] Harrison T M, Chen W J, Leloup P H, et al. An Early Miocene Transition in Deformation Regime within the Red River Fault Zone, Yunnan, And Its Significance for Indo-Asian Tectonics [J]. *Journal of geophysical research*, 1992, 97(B5): 7159 ~ 7182.
- [20] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343: 431 ~ 437.
- [21] Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, et al. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(1-2): 65 ~ 77.
- [22] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 1 ~ 217.
- [23] 唐渊, 王冬兵, 廖世勇, 等. 滇西三江地区西盟群的再认识——来自构造变形特征及锆石 U-Pb 年代学的证据 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(7): 2054 ~ 2072.
- [24] 王冬兵, 罗亮, 王保弟, 等. 昌宁-孟连结合带斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2017, 37(4): 15 ~ 28.
- [25] 唐渊, 王冬兵, 廖世勇, 等. 滇西高黎贡山变质岩带南段淡色花岗岩脉年代学特征及构造意义 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(8): 2347 ~ 2366.
- [26] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Kinematics and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China; Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 2006, 418(3-4): 235 ~ 254.
- [27] Lin T H, Lo C H, Chung S L, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(5): 674 ~ 685.
- [28] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society, London, Special Publications* [J], 1986, 19(1): 113 ~ 157.
- [29] Leloup, P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-



- Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 3-84.
- [30] Wang Y J, Xing X W, Cawood P A, et al. Petrogenesis of early Paleozoic peraluminous granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and diachronous accretionary orogenesis along the northern margin of Gondwana [J]. *Lithos*, 2013, 182-183: 67-85.
- [31] 邢晓婉, 张玉芝. 滇西南西盟群帕可组沉积时代厘定及构造意义: 锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素证据 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 936-948.
- [32] 邢晓婉, 张玉芝, 王岳军, 等. 西盟地区奥陶纪花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成特征及其大地构造意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(3): 470-480.
- [33] Chen X Y, Liu J L, Qi Y C, et al. Miocene structural evolution and exhumation of the Ximeng dome in Yunnan, Southeastern Tibet: implication for intraplate deformation during extrusion of the Sundaland block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 141: 194-212.
- [34] 夏浩然, 刘俊来. 石英结晶学优选与应用 [J]. *地质通报*, 2011, 30(1): 58-70.
- [35] Vincenzo Festa. C-axis fabrics of quartz-ribbons during high-temperature deformation of syn-tectonic granitoids (Sila Massif, Calabria, Italy) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 341(7): 557-567.
- [36] Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(12): 1861-1884.
- [37] Neumann, B. Texture development of recrystallised quartz polycrystals unravelled by orientation and misorientation characteristics [J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(11-12): 1695-1711.

## Stability of zircon during mylonitization: a case study of granitic mylonite in Gaoligong and Ximeng, Southwest China

Wang Dongbing<sup>1</sup>, Tang Yuan<sup>1</sup>, Wang Baodi<sup>1</sup>, Luo Liang<sup>1</sup>, Liao Shiyong<sup>2</sup>

(1. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China*; 2. *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China*)

**Abstract:** The stability of zircon under natural conditions is of great significance for reasonable interpretation of zircon age and further understanding of zircon isotopic chronology. In this paper, the microstructure and zircon U-Pb chronology of granitic mylonites in Gaoligongshan and Ximeng areas of the Sanjiang orogenic belt in the southwestern China have been studied. Minerals feldspar, which are the main rock-forming quartz and mica in granitic mylonite from the Gaoligong and Ximeng areas were significantly deformed and recrystallized, while zircon preserved the original structure in the form of independent crystal or residual core. The zircon U-Pb ages of the Gaoligongshan and the Ximeng mylonites are  $513 \pm 8$  Ma and  $459 \pm 2$  Ma, respectively, which represent the age of granitic protolith. Influenced by the Cenozoic tectonic metamorphism, some zircon grains developed spongy structure and dissolution structure at the rim, indicating the metamorphic recrystallization under the condition of a small amount of fluid. The metamorphic mechanism of quartz is grain boundary migration recrystallization, which indicates that the deformation temperature is 500-700 °C. Quartz c-axis fabrics revealed by the electron backscatter diffraction (EBSD) technique reflect two stages of metamorphic temperature in the mylonites: the early stage of 550-650 °C and the late stage of 400-550 °C. The results of rock microstructure, zircon structure and chronology show that the crystal structure of zircon is destroyed and metamorphic recrystallization occurred at 550-650 °C in the process of mylonitization with a small amount of fluid involved. These conditions provide important constraints for the interpretation of zircon ages under complex natural conditions.

**Key words:** Zircon; stability; recrystallization temperature; mylonitization; granitic mylonite; Sanjiang orogenic belt