

· 非主题来稿 ·

石鼓—黎明地区变沉积岩系的深熔时代和物源

王 舫¹, 刘福来¹, 刘平华¹, 蔡 佳¹, 施建荣², 冀 磊¹, 刘利双¹

(1. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘 要: 以出露于石鼓—黎明地区的黑云母石英片岩及其深熔脉体为重点研究对象, 对其中的锆石进行了阴极发光图像分析、SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究。阴极发光图像显示, 黑云母石英片岩中大部分锆石保留清晰的振荡环带; 深熔脉体中大部分锆石具有核—边结构, 核部保留清晰的振荡环带或呈灰色无分带结构, 边部较窄呈黑色。对黑云母石英片岩及其深熔脉体中锆石核部进行定年, 得到年龄范围为 2 637 ~ 743 Ma, 具有 858 ~ 852 Ma 的主要年龄峰值, 表明其主要物质来源为扬子板块西缘新元古代岩浆岩, 同时也有太古代—古元古代基底岩石的加入, 沉积时代应晚于 852 Ma。深熔脉体锆石边部的 Th/U 值较小 (< 0.1), 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 225 ~ 197 Ma 之间, 可能代表了变沉积岩的变质—深熔时代, 该年龄与金沙江—点苍山—哀牢山变质带二叠纪—三叠纪变质事件的时代相一致。

关键词: 石鼓杂岩; 变沉积岩; 黑云母石英片岩; 深熔脉体; 锆石 U-Pb 年代学

中图分类号: P588.34⁺4; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)06-0881-16

Timing of anatexis and provenance of meta-sedimentary rocks in Shigu-Liming area

WANG Fang¹, LIU Fu-lai¹, LIU Ping-hua¹, CAI Jia¹, SHI Jian-rong², JI Lei¹ and LIU Li-shuang¹

(1. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: Based on cathodoluminescence (CL) images, the authors present LA-ICP-MS and SHRIMP U-Pb zircon data of biotite-quartz schist and granitic leucosomes in the Shigu-Liming area. Most zircon grains separated from biotite-quartz schist show clear oscillatory zoning, and most of them from granitic leucosomes are characterized by core-rim structure with strongly or weakly oscillatory zoned cores and narrow black rims. Analysis of zircon cores from biotite-quartz schist and granitic leucosomes yielded U-Pb ages of 2 637 ~ 743 Ma with age peak at 858 ~ 852 Ma, indicating that their sediments were mainly transported from Neoproterozoic magmatic rocks of western Yangtze Block and also from Archean to Paleoproterozoic basement rocks and deposited after ~852 Ma. These zircon rims have low Th/U ratios (< 0.1) indicating the timing of anatexis. U-Pb analysis spots yielded ages of 225 ~ 197 Ma, and this age population is completely consistent with the age range of the Permian-Triassic metamorphic events of Jinshajiang-Diancangshan-Ailaoshan complex.

Key words: Shigu complex; meta-sedimentary rocks; biotite-quartz schist; granitic leucosomes; U-Pb zircon geochronology

收稿日期: 2019-04-29; 接受日期: 2019-09-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772193, 91855206); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600310); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-8)

作者简介: 王 舫(1981-), 女, 博士, 变质岩石学专业, E-mail: wangfang-mr@163.com。

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772193, 91855206); National Key Research and Development Project of China (2016YFC0600310); The Fund from the Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (J1901-8)

石鼓杂岩是出露于滇西北“三江”地区扬子板块与印支板块结合部位的一套重要地层单元,该变质杂岩经历了多期构造-岩浆-变质事件的改造,是研究特提斯构造演化、扬子板块与印支板块俯冲-碰撞的重要窗口。前人将该套变质杂岩称之为“石鼓群”。石鼓群原指丽江市石鼓以西一带的浅变质岩系,创名初称为“石鼓片岩”,时代划为元古代。1965年云南区测队将“石鼓片岩”改称为“石鼓群”,将其时代归属于早古生代;之后将其划出羊坡组、陇巴组和塔城组3个组,其中羊坡组时代为古元古代(翟明国等,1993),而陇巴组和塔城组归为新元古代。1990年,云南地矿局《云南省岩石地层》将其划为震旦系。1:25万中甸县、贡山县幅将石鼓群解体为古元古代的石鼓岩群(羊坡岩组和露西岩组)和新元古代的巨甸岩群(陇巴岩组和塔城岩组)(李昆琼,2003;姚雪等,2014)。罗改等(2017)通过对石鼓镇仁义村附近石鼓岩群变质基性岩中锆石进行U-Pb定年,首次在石鼓岩群中划分出新元古代的变质基性岩。沙绍礼等(2014)在1:20万西幅^①填图的基础上,将石鼓群重新进行了划分,自下而上划分为古元古代黎明岩群、中元古代新主岩群(哈吉洛岩组和露西岩组)和新元古代巨甸岩群(陇巴岩组和塔城岩组)。有关石鼓杂岩的归属问题,沙绍礼等(2014)在归纳整理了上世纪80、90年代资料的基础上,指出石鼓杂岩应归属于甘孜-理塘板块的结晶基底,并且认为新主岩群、巨甸岩群可与苍山岩群中的龙泉峰岩组、中和寺岩组以及北部的乐平山岩组对比,而苍山群的沟头箐岩群可与哀牢山群和雪龙山群对比;杨敬奎(2014)通过对石鼓杂岩上段变沉积岩岩石学、岩相学、地球化学特征综合研究,结合锆石年代学结果,认为石鼓杂岩具有亲扬子构造属性;也有研究者通过石鼓变质带和点苍山变质带的原岩建造、岩石组合和同位素年代学方面的对比研究,认为石鼓和点苍山变质岩系具有相同的岩石建造,两者在洱源地区相接,同属扬子板块结晶基底(翟明国等,1993;崔峻豪等,2014)。虽然都将石鼓杂岩划归为扬子板块结晶基底,但是,翟明国等(1993)认为石鼓

变质带属滇东变质岩区点苍山-石鼓变质带的一部分,而哀牢山变质带和点苍山变质带之间在变质特征、原岩建造、火山岩形成时代等方面存在着差异;崔峻豪等(2014)认为石鼓杂岩属于石鼓-点苍山-哀牢山变质带一部分,认为哀牢山变质带可与石鼓变质带和点苍山变质带相对比。

目前有关石鼓杂岩的年代地层归属存在较大的分歧,有研究者通过对石鼓杂岩中斜长角闪岩Nd同位素研究,结果得到1369.8 Ma和1343.8 Ma的模式年龄,认为石鼓杂岩属于中元古界(翟明国等,1993);但有研究者认为该年龄可能代表了石鼓杂岩的变质变形时代,而其原岩形成时代可能为古元古代(李昆琼,2003);罗改等(2017)对石鼓杂岩中原岩为玄武岩的变质基性岩进行定年,得到 833.9 ± 3.5 Ma的年龄,认为该年龄代表了石鼓杂岩的年龄。此外,石鼓杂岩变质作用研究也相对薄弱,对其下部二云斜长片麻岩中白云母K-Ar年代学研究,得到258 Ma的主要变质作用年龄^①;同时,根据石鼓变质带内三叠纪地层发生变质,以及带内少量印支期花岗岩脉的侵入,推测石鼓杂岩遭受了印支期弱变质作用的改造(沙绍礼,1989;杨敬奎,2014)。本文选取石鼓-黎明地区石鼓杂岩中黑云母石英片岩及其深熔脉体中锆石开展详细的年代学研究,通过对继承锆石和深熔锆石进行SHRIMP和LA-ICP-MS U-Pb年代学测试,探讨研究区石鼓杂岩变沉积岩的物质来源以及变质-深熔时代,为反演其构造演化过程提供科学依据。

1 地质背景与样品描述

石鼓杂岩位于滇西北“三江”地区,沿金沙江两岸分布于丽江市石鼓镇至塔城乡一带,向北延伸可至德钦县拖顶附近,向南延伸至丽江石鼓附近,两侧为大的走向断层分割(李昆琼,2003)。西侧以金沙江断裂带为界与昌都-兰坪地块相邻,东侧以甘孜-白汉场断裂为界与上扬子陆块相邻(罗改等,2017)。

原石鼓群,主要岩性包括黑云斜长片麻岩、二云

^① 云南省地质矿产局区域地质调查队四分队. 1984. 1:20万维西幅区调报告.

斜长片岩、石英岩、二云片岩等,现解体为石鼓岩群和巨甸岩群(姚雪等, 2014; 罗改等, 2017; 图1)。石鼓岩群为一套中深变质岩系,自上而下可划分为露西岩组和羊坡岩组。露西岩组主要岩石组合为二云石英片岩、二云斜长石英岩和少量黑云变粒岩及绿泥钠长片岩;羊坡岩组主要岩石组合为黑云斜长片麻岩、斜长二云石英片岩和少量变粒岩、斜长角闪岩等。巨甸岩群为一套中浅变质岩系,自下而上可划分为塔城岩组和陇巴岩组。塔城岩组主要为千枚岩及少量变质长石石英砂岩、钠长绿泥片岩等,以含较多的变质中基性火山岩为特征;陇巴岩组以千枚

岩、变质石英粉砂岩为主,见少量含硅泥质板岩,以普遍含碳质为特征。本研究主要对石鼓-黎明地区石鼓岩群羊坡岩组的两处露头进行了详细观察,野外露头可见深熔现象,大小不等的浅色长英质脉体呈椭球状或不规则透镜体沿片理/片麻理方向分布于变沉积岩中。由于石鼓镇核桃坪附近石榴二云母石英片岩(SG2-1)(图2a、2c、2e)中长英质透镜体规模较小,故主要对其进行野外观察,手标本及镜下鉴定;而对黎明乡北黑云母石英片岩(SG1-1)及其深熔脉体(SG1-2)(图2b、2d、2f)进行了系统采样,并对两件样品中分选出的锆石进行了SHRIMP和LA-

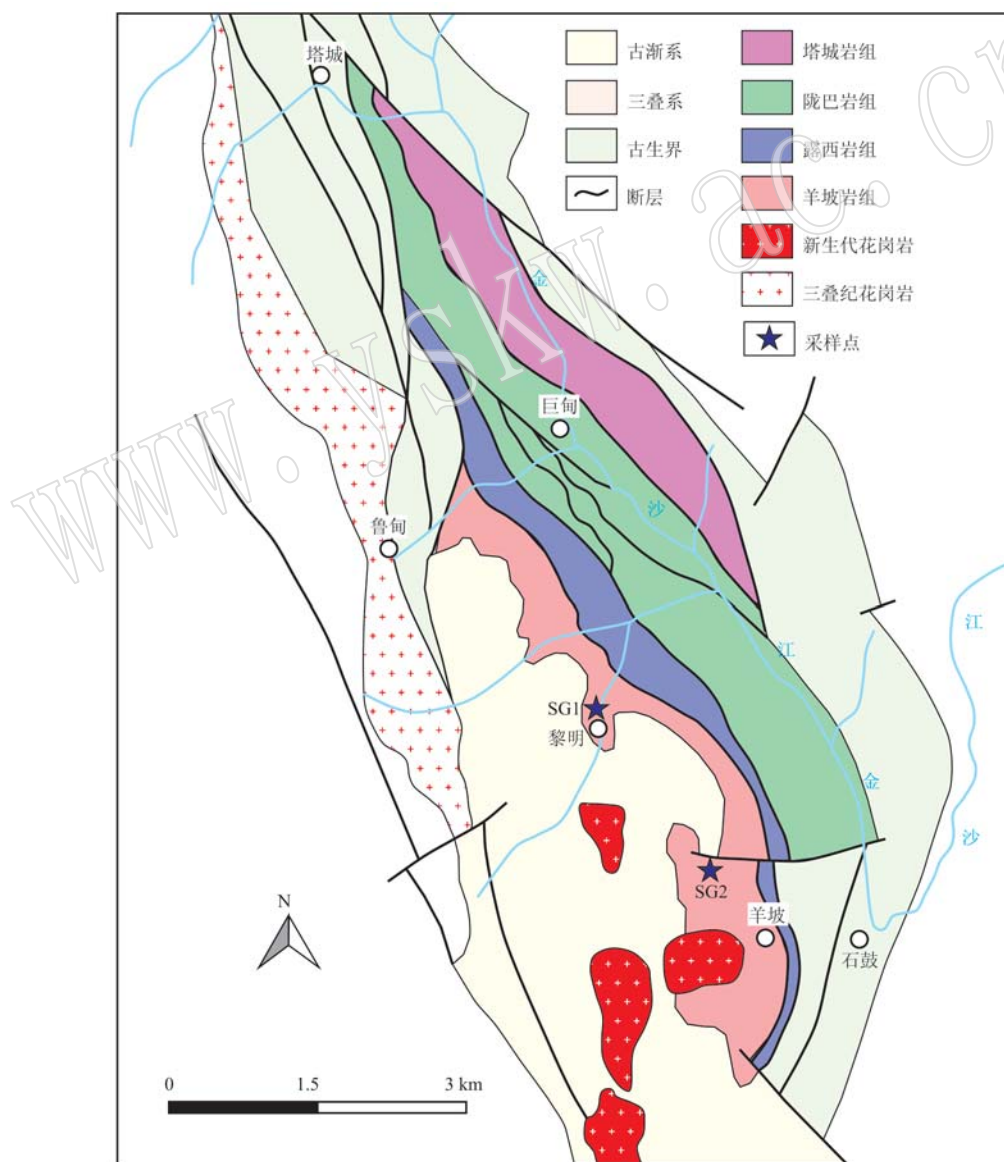


图1 石鼓-塔城地区区域地质简图以及样品分布图(据李昆琼, 2003)

Fig. 1 Regional geological map of Shigu-Tacheng area and its surrounding areas, showing the locations of major lithotectonic units and samples (after Li Kunqiong, 2003)

ICP-MS U-Pb 年代学研究,结果表明该变沉积岩遭受了三叠纪变质-深熔事件改造。

石榴二云母石英片岩(SG2),出露面积较大,在核桃坪村附近长达1 km左右的范围内露头岩性较为单一。露头呈深灰色,鳞片状、粒状变晶结构,片状构造(图2a,2c),局部可见几厘米大小的透镜体状或者不规则状的长英质细脉沿片麻理方向分布(图2a)。主要矿物包括黑云母(10%~20%)、白云母(10%~20%)、斜长石(10%~20%)和石英(40%~50%)。局部岩石可见含粗粒浑圆状或椭圆

状石榴石,裂隙发育,颗粒大小0.2~1.0 mm不等,含量10%~15%(图2c)。部分石榴石核部含有大量长英质矿物包裹体,而边部包裹体含量相对较少或基本不含矿物包裹体(图2e)。黑云母和白云母两者呈鳞片状,定向分布构成片理,局部发生褶皱变形,另外可见黑云母蚀变为绿泥石的现象(图2e)。斜长石呈不规则粒状,颗粒大小0.2~0.8 mm不等。石英呈它形,不等粒粒状结构,颗粒大小0.1~1.0 mm不等。其他矿物含量5%左右。

黑云母石英片岩(SG1-1),出露于玉龙纳西族

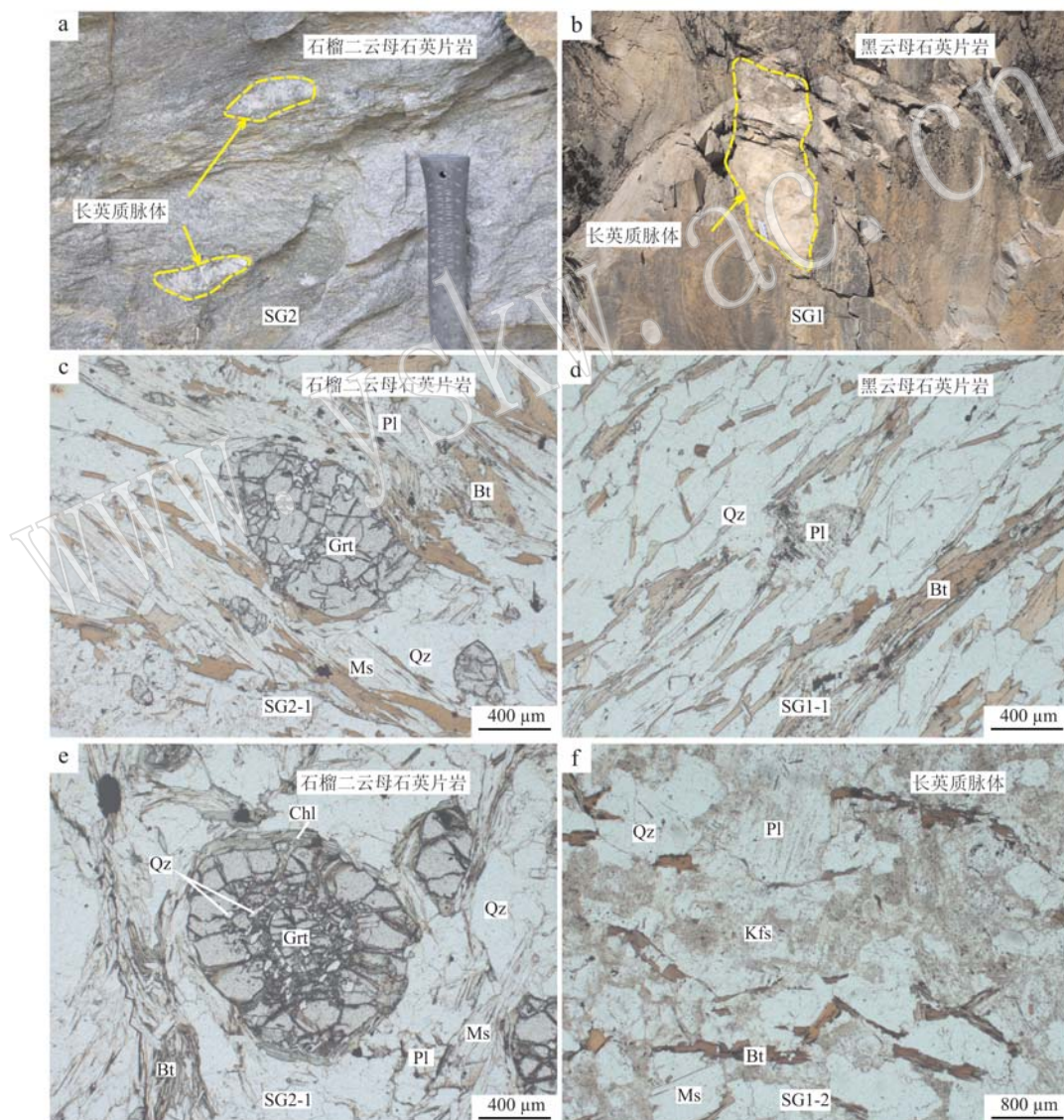


图2 石鼓-黎明地区变沉积岩及长英质脉体的野外照片及显微照片(—)

Fig. 2 Representative field photographs and microtexture photographs (—) of meta-sedimentary rocks and leucocratic felsic veins in the Shigu-Liming area, western Yunnan Province

Grt—石榴石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qz—石英; Chl—绿泥石
Grt—garnet; Bt—biotite; Ms—muscovite; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qz—quartz; Chl—chlorite

自治县黎明乡附近,露头呈灰黄色,中细粒鳞片状粒状变晶结构,片状构造(图 2b,2d),局部有十几厘米的透镜体状或者不规则状长英质细脉沿片麻理方向分布(图 2b)。主要矿物包括斜长石(5% ~ 15%)、黑云母(25% ~ 35%)和石英(40% ~ 50%)。斜长石呈不规则粒状,颗粒大小 0.2 ~ 0.6 mm 不等,可见聚片双晶(图 2d)。黑云母呈褐色,细小鳞片状,0.2 ~ 1.0 mm 不等,定向分布构成片理(图 2d)。石英呈它形,不等粒粒状结构,颗粒大小 0.1 ~ 0.5 mm 不等,正交偏光下具波状消光。其他矿物含量 5% 左右。

长英质脉体(SG1-2),在整个露头上含量 < 5%。主要矿物为黑云母(5% ~ 10%)、白云母(5% ~ 10%)、钾长石和斜长石(40% ~ 50%)、石英(40% ~ 50%),其他矿物含量 5% 左右(图 2b,2f)。黑云母和白云母呈鳞片状不规则的分布于长英质矿物之间,颗粒大小以 0.5 ~ 1.0 mm 为主(图 2f)。钾长石和斜长石呈不规则粒状、短柱状,颗粒大小 0.5 ~ 1.5 mm 不等,钾长石表面发生泥化,呈尘土状(图 2f);斜长石可见复合双晶。

2 分析方法

2.1 SHRIMP U-Pb 锆石年代学

黑云母石英片岩及长英质脉体中的锆石分选工作在河北省廊坊区调院矿物分离实验室完成。采用磁选和重液分选出锆石颗粒,然后在双目镜下挑选出颗粒相对完整的锆石晶体,与 TEMORA(Black *et al.*, 2003)标样一起粘贴、抛光,制成 SHRIMP 定年的锆石靶。制靶完成后进行透反射光和阴极发光照相,观察锆石表面形态及内部结构。

锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成。分析流程参考 Williams(1998),数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2001)。实验分析中一次流 O^{2-} 强度为 3 ~ 5 nA,束斑大小为 25 ~ 30 μm 。每个分析点采用 5 组扫描。标样 M257($U = 840 \times 10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008)和 TEM($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 417 Ma, Black *et al.*, 2003)分别用于锆石的 U 含量和年龄的校正。使用实测 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正。同位素比值和单点年龄误差为 1σ 。

2.2 LA-ICP-MS U-Pb 锆石年代学

在采用上述方法所制成的 SHRIMP 靶上,对黑

云母石英片岩及长英质脉体中锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 原位定年,分析在南京聚谱检测科技有限公司完成。193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由 Teledyne Cetac Technologies 制造,型号为 Analyte Excite。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技(Agilent Technologies)制造,型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,能量密度为 $6.0 \text{ J}/\text{cm}^2$,束斑直径为 25 μm ,频率为 6 Hz,共剥蚀 45 s,剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标准锆石 GJ-1 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标(Liu *et al.*, 2010a; Hu *et al.*, 2011)。数据处理采用 ICPMSDataCal 软件离线处理(Liu *et al.*, 2010a, 2010b)。年龄数据的 U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算同样采用的是 Isoplot v. 3.23 程序(Ludwig, 2003)。同位素比值和年龄误差均为 1σ 。

3 锆石 U-Pb 年代学结果

3.1 黑云母石英片岩(SG1-1)

该样品中锆石多呈椭球状或浑圆状,部分锆石破碎呈不规则状。颗粒相对完整的锆石颗粒长轴以 150 ~ 200 μm 为主,短轴以 80 ~ 120 μm 为主,长宽比约为 1.5 ~ 2.0。阴极发光图像显示大部分锆石保留清晰的振荡环带,少部分锆石环带较弱或呈灰色无分带结构,极少数锆石发育灰色/黑色边部(图 3a)。

本研究对 14 颗锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年(表 1、图 4a),14 个测试点中除了 2 个测试点(图 4a 中编号为 3、5)明显不谐和,其余 12 个测试点均分布在谐和线附近。所有谐和测试点中有 5 个测试点分析在灰色/黑色锆石边部(点号为 SG1-1-1、SG1-1-7、SG1-1-8、SG1-1-9 和 SG1-1-13),它们的 U 含量较高,为 $801 \times 10^{-6} \sim 2417 \times 10^{-6}$,Th/U 比值较低为 0.01 ~ 0.07, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $864.3 \pm 9.2 \text{ Ma} \sim 784.7 \pm 7.8 \text{ Ma}$ 之间(表 1)。另外 7 个分析在弱环带的部位(点号为 SG1-1-2、SG1-1-4、SG1-1-6、SG1-1-10、SG1-1-11、SG1-1-12 和 SG1-1-14),具有相对较低的 U 含量,为 $246 \times 10^{-6} \sim 1464 \times 10^{-6}$,Th/U 比值较高为 0.11 ~ 0.76, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $881.9 \pm 9.6 \sim 806.5 \pm 8.9 \text{ Ma}$ 之间(表 1)。

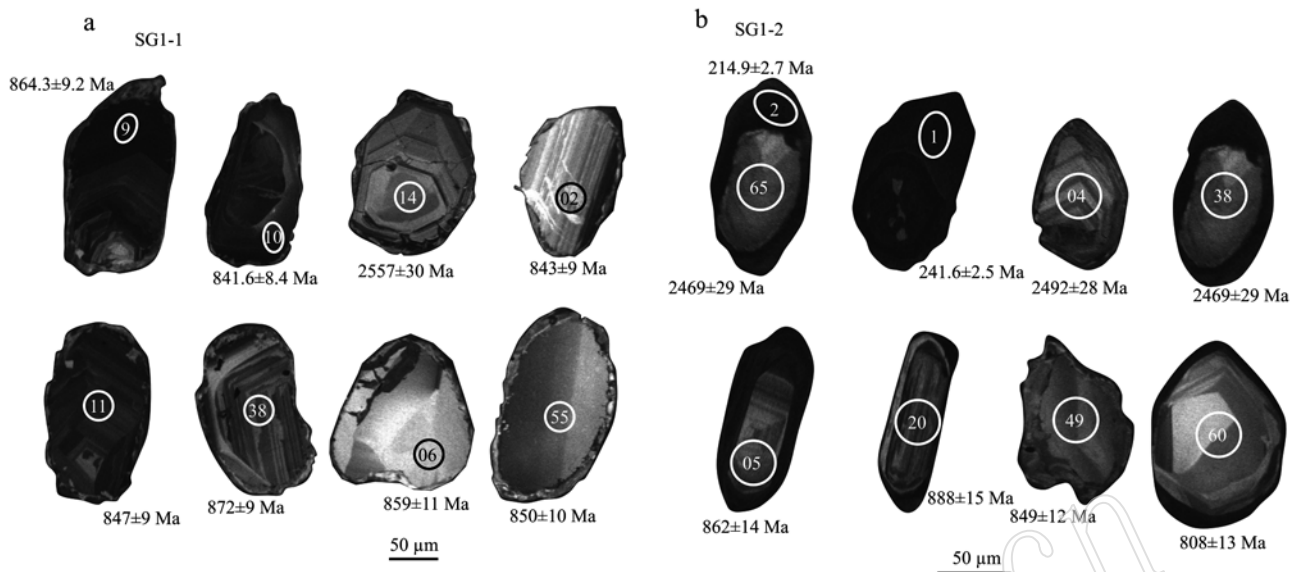


图3 石鼓-黎明地区黑云母石英片岩及其长英质脉体中锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from biotite quartz schist and leucocratic felsic vein in the Shigu-Liming area
圆大小为 30 μm , 椭圆长、短轴分别为 30 μm 、20 μm , 代表年龄分析点位; U-Pb 年龄结果亦在图中标出

Circles (30 μm) and ellipses (length = 30 μm , width = 20 μm) show positions of U-Pb analytical sites, U-Pb ages are also plotted

同时,对该样品中阴极发光图像显示环带较弱或呈灰色无分带结构的锆石微区,进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年(图 3a),48 个测试点获得了谐和年龄(表 2、图 4b)。除 1 颗谐和锆石核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,557 \pm 30\text{ Ma}$ (图 3a 中编号为 14),其余锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄主要集中在 914 ~ 811 Ma 之间, U 含量变化范围较大为 $74 \times 10^{-6} \sim 1\,854 \times 10^{-6}$,具有较高的 Th/U 值,范围为 0.06 ~ 1.28。在锆石 U-Pb 年龄频率直方图中显示明显的 ~ 858 Ma 的年龄峰值(图 5a)。

由此可见,分析在灰色/黑色锆石边部的 5 个 SHRIMP 年龄结果与分析在弱环带的部位或无分带锆石微区(除 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,557 \pm 30\text{ Ma}$)的 54 个年龄(7 个 SHRIMP 年龄和 47 个 LA-ICP-MS 年龄)结果具有一致性。但是,5 个 SHRIMP 年龄结果具有相对较高的 U 含量和相对较低的 Th/U 值,表明其锆石形成于岩浆演化晚期,受到自身变质作用的影响。

3.2 长英质脉体(SG1-2)

该样品中锆石多呈半自形、椭球状,少量锆石呈浑圆状。大部分锆石颗粒长轴以 60 ~ 120 μm 为主,短轴以 30 ~ 60 μm 为主,长宽比约为 1.5 ~ 2.0。阴极发光图像显示,大部分锆石具有核-边结构(图

3b),其核部保留清晰的振荡环带或呈灰色无分带结构,边部呈黑色普遍较窄(均小于 40 μm)。

对 16 颗锆石边部进行了 SHRIMP U-Pb 定年(表 3、图 4c),大部分年龄结果落在谐和线附近。其中 11 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $241.6 \pm 2.5\text{ Ma} \sim 174.4 \pm 4.1\text{ Ma}$ 之间(表 3),其 Th 和 U 含量变化范围较大,分别为 $29 \times 10^{-6} \sim 4\,349 \times 10^{-6}$ 和 $295 \times 10^{-6} \sim 6\,221 \times 10^{-6}$,Th/U 值变化范围为 0.02 ~ 0.72。另外 Th/U 值较小(<0.1)、在谐和图上分布比较集中的 5 个测点(点号为 SG1-2-1、SG1-2-3、SG1-2-10、SG1-2-11 和 SG1-2-15),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $224.5 \pm 3.3\text{ Ma} \sim 197.0 \pm 3.0\text{ Ma}$ 之间,可能代表了该长英质脉体的深熔时代。

同时,对该样品中阴极发光图像保留清晰的振荡环带或呈灰色无分带结构的锆石核部,进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年(图 3b)。55 个测试点获得了谐和年龄(表 4、图 4d), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2 637 ~ 743 Ma,其 Th 和 U 含量变化范围较大,分别为 $1 \times 10^{-6} \sim 934 \times 10^{-6}$ 和 $80 \times 10^{-6} \sim 1\,730 \times 10^{-6}$,Th/U 比值变化范围较大为 0.003 ~ 4.23(表 4)。在锆石 U-Pb 年龄频率直方图中明显呈 ~ 852 Ma 的年龄峰值,另外还具有 1 840 ~ 1 670 Ma 和 ~ 2 495 Ma 的年龄次峰(图 5b)。

表 1 石鼓-黎明地区黑云母石英片岩 (SG1-1) 中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学

Table 1 SHRIMP U-Pb data of zircons from biotite quartz schist (sample SG1-1) of the Shigu-Liming area

样品点号	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$w_B/10^{-6}$		$^{206}\text{Pb}^*$		Th/U	同位素比值				errcorr	年龄/Ma		Disc/%	
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		
SG1-1-1	-	801	53	96.7	0.07	0.067 75	0.70	1.313	1.3	0.140 5	1.1	0.842	847.6 ± 8.7	861 ± 15	2
SG1-1-2	-	1 206	162	152	0.14	0.067 99	0.67	1.374	1.3	0.146 6	1.2	0.865	881.9 ± 9.6	868 ± 14	-2
SG1-1-3	2.88	2 774	768	162	0.29	0.067 4	2.5	0.614	2.7	0.066 1	1.2	0.428	412.6 ± 4.7	850 ± 51	51
SG1-1-4	-	952	139	116	0.15	0.068 15	0.63	1.337	1.2	0.142 3	1.1	0.865	857.8 ± 8.7	873 ± 13	2
SG1-1-5	0.53	579	62	52.0	0.11	0.067 9	1.5	0.972	1.9	0.103 9	1.1	0.594	637.0 ± 6.9	866 ± 32	26
SG1-1-6	0.08	256	188	31.4	0.76	0.068 10	1.3	1.343	1.8	0.143	1.2	0.679	862 ± 10	871 ± 28	1
SG1-1-7	0.25	2 417	14	285	0.01	0.067 42	0.58	1.271	1.2	0.136 7	1.1	0.878	825.9 ± 8.3	851 ± 12	3
SG1-1-8	0.11	1 787	82	199	0.05	0.067 93	0.6	1.212	1.2	0.129 4	1.1	0.869	784.7 ± 7.8	866 ± 13	9
SG1-1-9	0.11	2 178	50	269	0.02	0.067 96	0.54	1.344	1.3	0.143 5	1.1	0.902	864.3 ± 9.2	867 ± 11	0
SG1-1-10	0.02	1 464	227	175	0.16	0.067 63	0.60	1.300	1.2	0.139 5	1.1	0.873	841.6 ± 8.4	857 ± 12	2
SG1-1-11	0.05	817	85	100	0.11	0.068 08	0.73	1.338	1.3	0.142 5	1.1	0.829	859.0 ± 8.8	871 ± 15	1
SG1-1-12	0.22	246	124	30.4	0.52	0.068 3	1.6	1.354	2.0	0.143 7	1.2	0.596	865.8 ± 9.8	879 ± 34	1
SG1-1-13	-	993	51	122	0.05	0.067 89	0.66	1.336	1.3	0.142 8	1.1	0.855	860.3 ± 8.7	865 ± 14	1
SG1-1-14	-	335	140	38.4	0.43	0.067 89	1.1	1.247	1.6	0.133 3	1.2	0.718	806.5 ± 8.9	865 ± 24	7

注: $^{206}\text{Pb}_c$ 表示 ^{206}Pb 中普通 ^{206}Pb 的比例, * 表示放射成因 Pb , 单点年龄误差为 1σ 。Disc(%) = $100 \times (1 - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄})$ 。

表2 石鼓黎明地区黑云母石英片岩(SG1-1)中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from biotite quartz schist (sample SG1-1) of the Shigu-Liming area

样品点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	比值				误差相关		年龄/Ma				不谐和度/%		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	系数	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1 σ	
SG1-1-01	206	1 651	0.12	0.001 27	1.283 83	0.023 54	0.127 67	0.001 62	0.691 94	1 006	35	839	10	775	9	8
SG1-1-02	85	185	0.46	0.001 89	1.367 28	0.036 59	0.139 70	0.001 61	0.431 00	952	55	875	16	843	9	4
SG1-1-03	143	209	0.69	0.001 70	1.376 52	0.033 10	0.141 41	0.001 71	0.502 74	946	49	879	14	853	10	3
SG1-1-04	121	648	0.19	0.001 31	1.422 79	0.027 88	0.141 06	0.001 58	0.572 23	1 009	42	899	12	851	9	5
SG1-1-05	80	206	0.39	0.001 75	1.371 85	0.032 97	0.139 38	0.001 68	0.501 15	970	50	877	14	841	10	4
SG1-1-06	16	74	0.21	0.002 61	1.388 57	0.050 70	0.142 50	0.001 99	0.383 21	961	75	884	22	859	11	3
SG1-1-07	99	186	0.53	0.002 16	1.423 12	0.044 85	0.144 26	0.002 07	0.456 10	973	63	899	19	869	12	3
SG1-1-08	101	184	0.55	0.002 38	1.292 98	0.047 75	0.133 62	0.002 08	0.421 29	929	70	843	21	808	12	4
SG1-1-09	42	563	0.07	0.008 87	1.361 75	0.028 67	0.143 61	0.001 80	0.594 24	894	73	873	12	865	10	1
SG1-1-10	65	284	0.23	0.009 63	1.381 23	0.033 57	0.144 11	0.001 81	0.516 09	917	44	881	14	868	10	1
SG1-1-11	195	939	0.21	0.008 07	1.319 90	0.025 88	0.140 35	0.001 59	0.579 32	872	35	854	11	847	9	1
SG1-1-12	264	391	0.68	0.006 41	1.256 09	0.028 37	0.137 09	0.001 53	0.495 04	820	43	826	13	828	9	0
SG1-1-13	85	562	0.15	0.005 42	1.266 03	0.027 77	0.140 64	0.001 84	0.595 37	787	44	831	12	848	10	-2
SG1-1-14	84	110	0.76	0.009 97	1.349 85	0.022 88	0.148 85	0.006 39	0.677 69	2 557	30	2 552	18	2 548	28	0
SG1-1-17	112	959	0.12	0.005 94	1.222 85	0.027 95	0.133 89	0.001 72	0.562 49	806	46	811	13	810	10	-1
SG1-1-18	61	365	0.17	0.007 79	1.323 55	0.028 65	0.141 33	0.001 62	0.529 38	861	44	856	13	852	9	1
SG1-1-20	47	186	0.25	0.006 19	1.349 13	0.034 45	0.145 30	0.001 90	0.513 23	843	51	867	15	875	11	-4
SG1-1-21	46	724	0.06	0.008 52	1.383 32	0.028 05	0.145 95	0.001 85	0.624 36	883	34	882	12	878	10	1
SG1-1-22	652	1 066	0.61	0.009 98	1.360 49	0.028 55	0.140 23	0.001 88	0.637 59	928	32	872	12	846	11	9
SG1-1-23	127	192	0.66	0.007 73	1.338 96	0.030 88	0.142 77	0.001 83	0.442 11	861	17	863	17	860	10	0
SG1-1-24	219	743	0.30	0.006 13	1.364 54	0.030 08	0.144 47	0.001 74	0.547 49	872	44	874	13	870	10	0
SG1-1-25	88	465	0.19	0.008 01	1.353 09	0.033 60	0.143 26	0.001 76	0.494 31	878	48	869	15	863	10	2
SG1-1-26	43	104	0.41	0.006 68	1.407 32	0.042 97	0.149 47	0.002 02	0.443 47	900	73	892	18	898	11	0
SG1-1-27	37	479	0.08	0.070 82	1.459 71	0.028 86	0.148 80	0.001 61	0.547 43	954	34	914	12	894	9	6
SG1-1-28	54	130	0.42	0.070 65	1.418 61	0.048 15	0.144 86	0.001 97	0.400 83	947	67	897	20	872	11	8
SG1-1-29	160	933	0.17	0.006 28	1.271 97	0.023 51	0.134 57	0.001 59	0.639 86	877	40	833	11	814	9	7
SG1-1-32	131	646	0.20	0.006 74	1.308 41	0.026 28	0.142 05	0.001 76	0.618 12	831	44	849	12	856	10	-3
SG1-1-33	712	1 854	0.38	0.006 81	1.302 64	0.023 85	0.141 05	0.001 50	0.581 43	831	35	847	11	851	8	-2
SG1-1-35	159	368	0.43	0.007 61	1.399 62	0.033 01	0.149 98	0.001 77	0.499 33	857	46	889	14	901	10	-5
SG1-1-36	195	268	0.73	0.009 34	1.383 33	0.029 31	0.144 84	0.001 60	0.520 93	909	44	882	13	872	9	4
SG1-1-37	83	336	0.25	0.008 82	1.352 93	0.029 56	0.142 58	0.001 45	0.465 20	894	42	869	13	859	8	4
SG1-1-39	78	789	0.10	0.009 59	1.346 88	0.029 37	0.139 91	0.001 69	0.554 26	917	45	866	13	844	10	8
SG1-1-40	112	300	0.37	0.008 81	1.363 74	0.036 52	0.143 20	0.001 68	0.437 77	894	53	873	16	863	9	4
SG1-1-41	122	569	0.22	0.070 27	1.393 49	0.030 09	0.143 69	0.001 65	0.531 45	936	48	886	13	865	9	8
SG1-1-44	155	383	0.40	0.008 40	1.356 17	0.029 69	0.143 52	0.001 63	0.517 78	880	43	870	13	865	9	2
SG1-1-45	111	87	1.28	0.009 37	1.357 18	0.047 98	0.141 73	0.002 00	0.399 62	909	75	871	21	854	11	6
SG1-1-46	79	214	0.37	0.008 37	1.366 59	0.035 02	0.145 11	0.001 63	0.438 52	880	53	875	15	874	9	1
SG1-1-47	113	647	0.17	0.009 53	1.370 27	0.029 86	0.144 56	0.001 79	0.575 78	915	39	885	13	870	10	5
SG1-1-49	147	345	0.43	0.008 08	1.370 27	0.033 40	0.145 47	0.001 77	0.499 30	872	42	876	14	876	10	0
SG1-1-52	264	577	0.46	0.007 67	1.340 79	0.026 71	0.143 43	0.001 71	0.597 23	857	38	864	12	864	10	-1
SG1-1-54	200	992	0.20	0.007 53	1.296 40	0.024 70	0.138 66	0.001 47	0.556 04	854	40	844	11	837	8	2
SG1-1-55	96	206	0.46	0.006 40	1.313 52	0.035 08	0.140 91	0.001 78	0.471 96	850	52	852	15	850	10	0
SG1-1-56	191	979	0.19	0.007 90	1.278 22	0.028 28	0.135 90	0.001 62	0.537 99	865	36	836	13	821	9	5
SG1-1-57	364	885	0.41	0.009 83	1.359 36	0.028 34	0.140 78	0.001 70	0.482 77	924	42	872	12	849	8	8
SG1-1-58	54	234	0.23	0.006 21	1.301 12	0.034 05	0.142 05	0.001 70	0.458 17	813	52	846	15	856	10	-5
SG1-1-59	323	1 510	0.21	0.006 98	1.352 32	0.027 40	0.145 57	0.002 05	0.694 68	839	32	869	12	876	12	-4
SG1-1-60	84	446	0.19	0.070 09	1.360 53	0.027 95	0.139 99	0.001 44	0.500 36	931	35	872	12	845	8	9
SG1-1-61	568	564	1.01	0.066 18	1.295 80	0.024 88	0.141 05	0.001 29	0.476 51	813	39	844	11	851	7	-5

表 3 石鼓-黎明地区长英质脉体(SG1-2)中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学
Table 3 SHRIMP U-Pb data of zircons from leucocratic felsic veins (sample SG1-2) of the Shigu-Liming area

样品点号	$^{206}\text{Pb}/\%$	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				err/corr	年龄/Ma		Disc/%
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{236}\text{Pb}$	
SG1-2-1	0.83	2 311	35	76.4	0.052 1	2	0.274 1	2.3	0.038 19	1.1	0.466	241.6 $\pm$ 2.5	288 $\pm$ 46	16
SG1-2-2	14.19	1 438	188	46.5	0.051 1	18	0.227	18	0.032 29	1.5	0.083	204.8 $\pm$ 3.0	244 $\pm$ 410	16
SG1-2-3	16.84	2 614	113	83.8	0.050 6	18	0.216	18	0.031 03	1.5	0.084	197.0 $\pm$ 3.0	221 $\pm$ 420	11
SG1-2-4	6.12	1 631	100	50.2	0.052 8	8.8	0.245	8.8	0.033 65	1.2	0.141	213.4 $\pm$ 2.6	322 $\pm$ 200	34
SG1-2-5	1.15	1 722	188	140	0.064 6	2.2	0.833	2.5	0.093 6	1.1	0.443	576.9 $\pm$ 6.0	760 $\pm$ 47	24
SG1-2-6	3.02	295	29	9.26	0.053 6	13	0.262	13	0.035 43	1.5	0.111	224.5 $\pm$ 3.3	354 $\pm$ 300	37
SG1-2-7	31.78	6 221	4 349	215	0.071	24	0.268	24	0.027 43	2.4	0.097	174.4 $\pm$ 4.1	956 $\pm$ 500	82
SG1-2-8	21.16	3 085	667	98.8	0.053	21	0.216	21	0.029 4	1.7	0.082	186.8 $\pm$ 3.2	340 $\pm$ 470	45
SG1-2-9	4.74	1 998	113	211	0.066 5	4	1.076	4.2	0.117 3	1.1	0.27	715.2 $\pm$ 7.6	822 $\pm$ 84	13
SG1-2-10	1.65	1 165	95	35.1	0.050 9	4.4	0.242	4.6	0.034 5	1.2	0.268	218.6 $\pm$ 2.7	238 $\pm$ 100	8
SG1-2-11	9.33	2 049	142	65.8	0.050 6	11	0.237	11	0.033 89	1.3	0.115	214.9 $\pm$ 2.7	223 $\pm$ 250	4
SG1-2-12	0.16	1 470	274	172	0.067 47	0.76	1.262	1.3	0.135 7	1.1	0.82	820.2 $\pm$ 8.4	852 $\pm$ 16	4
SG1-2-13	25.04	2 948	501	98.1	0.06	29	0.24	29	0.029 04	2.3	0.078	184.5 $\pm$ 4.2	599 $\pm$ 630	69
SG1-2-14	4.13	1 797	106	153	0.063 6	3.6	0.834	3.8	0.095	1.1	0.291	585.3 $\pm$ 6.2	730 $\pm$ 77	20
SG1-2-15	2.05	390	10	14.8	0.054 4	6.7	0.323	7	0.043 13	1.9	0.27	272.2 $\pm$ 5.0	386 $\pm$ 150	29
SG1-2-16	23.25	3 465	947	113	0.062	20	0.248	20	0.029 13	1.9	0.096	185.1 $\pm$ 3.4	669 $\pm$ 420	72

表4 石鼓-黎明地区长英质脉体(SG1-2)中锆石 LA-ICP-MS U-P 年代学
Table 4 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from leucocratic felsic veins (sample SG1-2) of the Shigu-Liming area

样品点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	比值				误差相关系数		年龄/Ma				不谐和度/%			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
				1σ	1σ	1σ	1σ										
SG1-2-01	110	146	0.75	0.109 94	0.002 55	4.509 48	0.103 87	0.300 45	0.005 15	0.743 52	1 798	37	1 733	19	1 694	26	6
SG1-2-02	89	88	1.00	0.131 49	0.002 72	6.643 75	0.156 97	0.367 17	0.006 34	0.730 42	2 118	36	2 065	21	2 016	30	5
SG1-2-03	209	405	0.51	0.165 63	0.002 67	10.604 69	0.204 18	0.463 68	0.006 97	0.780 76	2 514	28	2 489	18	2 456	31	2
SG1-2-04	154	250	0.62	0.163 53	0.002 71	9.484 26	0.187 54	0.419 68	0.006 29	0.757 72	2 492	28	2 386	18	2 259	29	9
SG1-2-05	92	187	0.49	0.065 53	0.001 63	1.293 06	0.036 16	0.143 09	0.002 42	0.603 80	791	52	843	16	862	14	-2
SG1-2-07	94	296	0.32	0.178 23	0.003 14	12.363 96	0.245 12	0.501 78	0.007 61	0.765 13	2 637	29	2 632	19	2 621	33	1
SG1-2-08	293	240	1.22	0.102 68	0.002 20	4.411 06	0.106 38	0.311 96	0.005 73	0.761 23	1 673	45	1 714	20	1 750	28	-5
SG1-2-09	227	315	0.72	0.094 50	0.001 85	3.608 44	0.078 60	0.276 05	0.004 39	0.730 65	1 518	37	1 551	17	1 571	22	-4
SG1-2-10	53	115	0.46	0.105 11	0.002 34	4.534 67	0.111 72	0.312 33	0.005 36	0.696 26	1 717	45	1 737	21	1 752	26	-2
SG1-2-11	133	159	0.84	0.093 12	0.001 84	3.635 52	0.077 00	0.281 89	0.003 89	0.650 80	1 500	37	1 557	17	1 601	20	-7
SG1-2-12	600	595	1.01	0.066 04	0.001 27	1.264 83	0.030 20	0.137 85	0.002 23	0.677 21	809	44	830	14	832	13	0
SG1-2-13	102	182	0.56	0.094 71	0.001 83	3.632 61	0.082 99	0.277 05	0.004 66	0.736 52	1 524	36	1 557	18	1 576	24	-3
SG1-2-14	145	274	0.53	0.106 48	0.001 87	4.378 01	0.082 80	0.297 41	0.004 40	0.782 56	1 740	31	1 708	16	1 678	22	4
SG1-2-15	274	390	0.70	0.103 32	0.001 77	4.125 36	0.079 79	0.289 29	0.005 03	0.899 55	1 685	31	1 659	16	1 638	25	3
SG1-2-16	402	454	0.88	0.064 22	0.001 32	1.281 12	0.028 18	0.144 63	0.002 45	0.768 71	750	43	837	13	871	14	-4
SG1-2-17	52	465	0.11	0.068 24	0.001 48	1.162 89	0.027 87	0.123 23	0.002 09	0.709 20	876	44	783	13	749	12	4
SG1-2-18	89	374	0.24	0.109 83	0.001 96	5.167 84	0.103 07	0.341 14	0.006 65	0.978 01	1 798	32	1 847	17	1 892	32	-5
SG1-2-19	545	427	1.28	0.063 99	0.001 32	1.249 69	0.029 79	0.140 88	0.002 43	0.725 06	743	43	823	13	850	14	-3
SG1-2-20	570	398	1.43	0.073 53	0.001 48	1.505 29	0.035 38	0.147 69	0.002 61	0.750 88	1 028	73	933	14	888	15	5
SG1-2-21	934	221	4.23	0.065 71	0.001 81	1.302 66	0.038 43	0.142 87	0.002 36	0.560 12	798	57	847	17	861	13	-2
SG1-2-22	199	291	0.68	0.067 33	0.001 59	1.112 13	0.026 82	0.119 62	0.001 92	0.664 40	848	50	759	13	728	11	4
SG1-2-23	86	96	0.89	0.098 40	0.002 52	3.732 84	0.097 67	0.275 65	0.004 87	0.674 85	1 594	48	1 578	21	1 569	25	2
SG1-2-24	548	1 061	0.52	0.074 78	0.001 64	1.459 79	0.039 72	0.140 30	0.002 71	0.710 67	1 063	44	914	16	846	15	7
SG1-2-25	35	247	0.14	0.069 11	0.001 70	1.416 83	0.036 52	0.148 61	0.002 53	0.661 47	902	52	896	15	893	14	0
SG1-2-26	203	400	0.51	0.110 49	0.001 89	5.005 87	0.093 92	0.326 42	0.004 49	0.733 50	1 809	31	1 820	16	1 821	22	-1
SG1-2-27	137	379	0.36	0.066 51	0.001 30	1.387 34	0.032 20	0.150 17	0.002 41	0.690 33	833	41	884	14	902	13	-2
SG1-2-28	111	121	0.92	0.068 87	0.002 04	1.404 73	0.040 68	0.149 16	0.002 83	0.654 69	894	62	891	17	896	16	-1
SG1-2-30	53	125	0.42	0.161 55	0.002 68	10.215 91	0.200 84	0.455 76	0.007 21	0.804 34	2 472	28	2 455	18	2 421	32	2
SG1-2-32	241	856	0.28	0.152 77	0.002 43	8.466 64	0.159 67	0.398 78	0.005 97	0.793 68	2 377	28	2 282	17	2 163	28	9
SG1-2-34	166	287	0.58	0.105 97	0.001 80	4.300 94	0.080 36	0.293 81	0.004 74	0.864 12	1 731	31	1 694	15	1 661	24	4

续表 4
Continued Table 4

样品号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	比值				误差相关系数		年龄/Ma				不谐和度/%		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
SG1-2-36	84	91	0.92	0.069 01	0.002 24	1.419 28	0.049 97	0.148 92	0.002 67	0.509 18	67	897	21	895	15	0
SG1-2-37	102	193	0.53	0.067 76	0.002 31	1.136 66	0.040 74	0.121 58	0.002 74	0.629 54	861	771	19	740	16	4
SG1-2-38	36	210	0.17	0.161 30	0.002 74	9.470 98	0.188 17	0.425 05	0.007 00	0.828 41	2 469	2 385	18	2 283	32	8
SG1-2-40	172	247	0.70	0.103 97	0.002 22	4.263 49	0.114 30	0.298 07	0.006 87	0.859 77	1 696	1 686	22	1 682	34	1
SG1-2-42	415	830	0.50	0.103 17	0.001 62	4.192 54	0.085 67	0.293 33	0.004 85	0.809 91	1 683	1 673	17	1 658	24	1
SG1-2-43	303	359	0.84	0.079 71	0.001 43	2.236 22	0.051 13	0.202 21	0.003 40	0.734 81	1 191	1 192	16	1 187	18	0
SG1-2-44	220	681	0.32	0.107 25	0.001 62	4.642 78	0.094 49	0.311 90	0.005 08	0.799 63	1 754	1 757	17	1 750	25	0
SG1-2-45	100	203	0.50	0.125 55	0.002 25	6.161 94	0.127 87	0.355 47	0.006 13	0.831 23	2 037	1 999	18	1 961	29	4
SG1-2-46	244	588	0.42	0.067 75	0.001 32	1.263 01	0.027 18	0.134 57	0.002 00	0.691 96	861	829	12	814	11	2
SG1-2-47	161	296	0.54	0.067 03	0.001 50	1.316 02	0.032 00	0.141 71	0.002 21	0.642 65	839	853	14	854	13	0
SG1-2-49	199	252	0.79	0.068 25	0.001 68	1.330 10	0.033 39	0.140 72	0.002 12	0.599 18	876	859	15	849	12	1
SG1-2-50	103	343	0.30	0.065 57	0.001 53	1.232 14	0.030 83	0.135 75	0.002 26	0.664 53	794	815	14	821	13	-1
SG1-2-51	244	423	0.58	0.098 18	0.001 70	3.817 36	0.074 94	0.279 56	0.003 94	0.717 79	1 591	1 596	16	1 589	20	0
SG1-2-52	197	333	0.59	0.111 67	0.002 08	5.012 07	0.110 36	0.324 74	0.006 92	0.968 16	1 828	1 821	19	1 813	34	1
SG1-2-53	135	323	0.42	0.112 48	0.001 92	4.964 97	0.098 01	0.319 04	0.005 52	0.877 06	1 840	1 813	17	1 785	27	3
SG1-2-54	269	725	0.37	0.068 29	0.001 34	1.344 22	0.028 17	0.142 16	0.002 31	0.774 73	877	865	12	857	13	1
SG1-2-55	287	359	0.80	0.068 49	0.001 67	1.333 74	0.036 98	0.140 50	0.002 69	0.689 87	883	861	16	848	15	2
SG1-2-56	50	80	0.62	0.068 43	0.002 30	1.498 42	0.052 41	0.159 06	0.003 32	0.597 50	883	930	21	952	18	-2
SG1-2-57	6	140	0.04	0.070 26	0.002 04	1.475 97	0.047 49	0.151 28	0.002 80	0.575 65	1 000	921	19	908	16	1
SG1-2-59	223	666	0.33	0.068 56	0.001 41	1.324 41	0.029 32	0.139 65	0.002 43	0.785 71	887	856	13	843	14	2
SG1-2-60	1	304	0.003	0.065 00	0.001 47	1.206 23	0.029 84	0.133 48	0.002 24	0.678 55	776	803	14	808	13	-1
SG1-2-61	357	472	0.76	0.068 80	0.001 48	1.370 85	0.037 08	0.143 34	0.002 79	0.720 43	894	877	16	863	16	1
SG1-2-63	678	1 730	0.39	0.072 84	0.001 43	1.412 41	0.030 30	0.139 03	0.001 82	0.610 32	1 009	894	13	839	10	6
SG1-2-64	185	353	0.52	0.066 01	0.001 68	1.308 60	0.041 47	0.142 91	0.003 37	0.743 32	806	850	18	861	19	-1
SG1-2-66	140	317	0.44	0.067 14	0.001 60	1.339 84	0.038 23	0.142 88	0.002 46	0.604 59	843	863	17	861	14	0

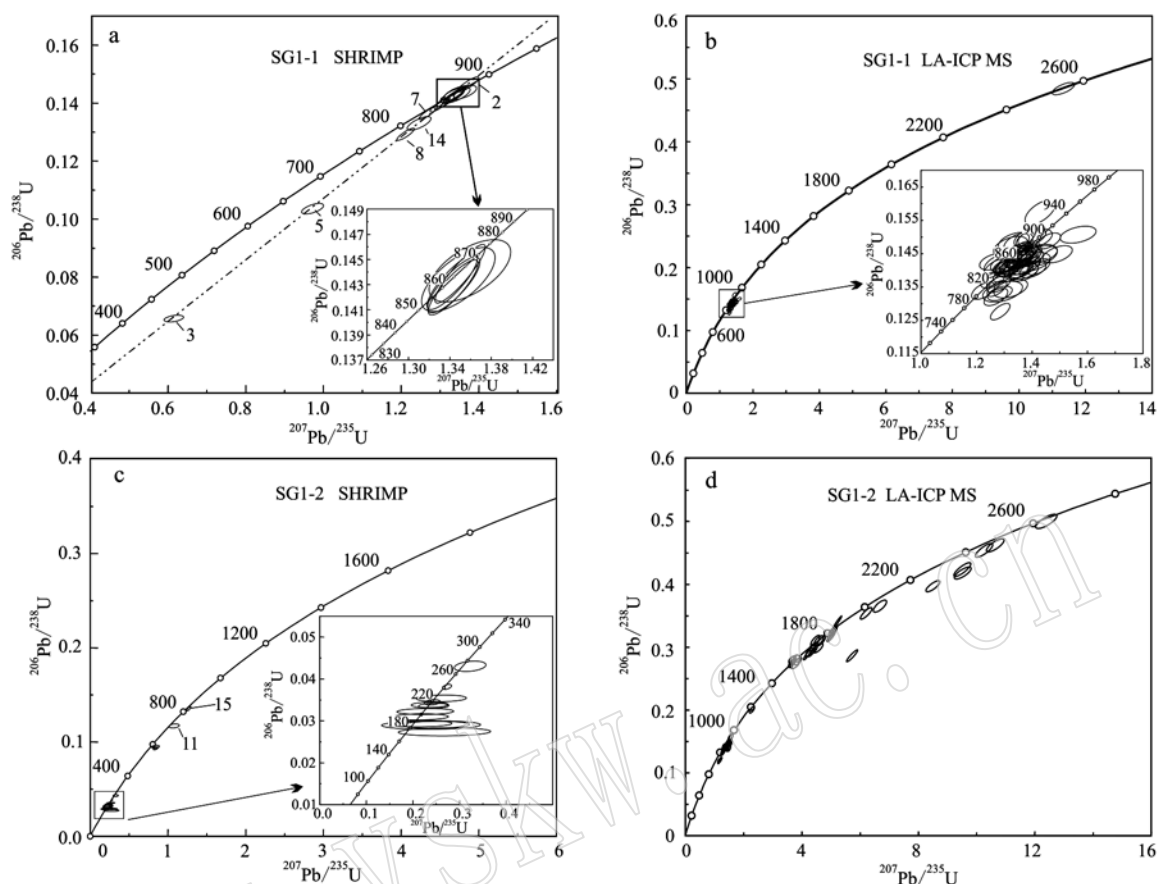


图4 石鼓-黎明地区黑云母石英片岩及其长英质脉体中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams for zircons from biotite quartz schist and leucocratic felsic vein in the Shigu-Liming area

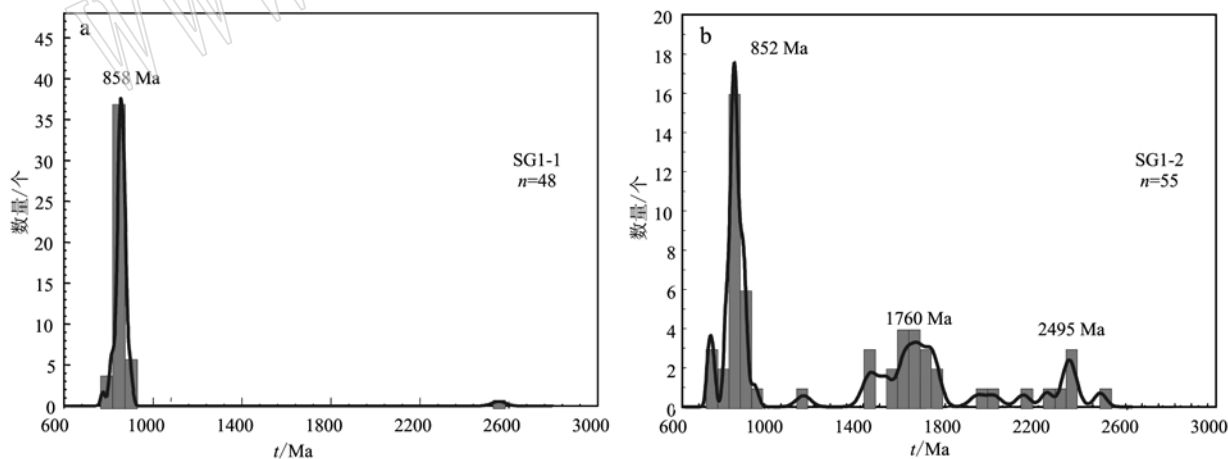


图5 石鼓-黎明地区黑云母石英片岩及其长英质脉体中锆石 U-Pb 年龄分布频率直方图

Fig. 5 U-Pb age histograms for U-Pb zircon analyses from biotite quartz schist and leucocratic felsic vein in the Shigu-Liming area

4 讨论

4.1 变沉积岩的沉积物质来源及沉积时代

沉积岩中碎屑锆石年代学研究可以为探讨源区物质组成、主要岩浆事件以及沉积盆地的构造背景

等提供重要信息(Griffin *et al.*, 2004; Condie *et al.*, 2005; Cawood *et al.*, 2012)。杨敬奎(2014)在石鼓群上段(相当于巨甸岩群塔城岩组)变沉积岩中获得~2.4 Ga 和~1.9 Ga 的古元古代碎屑锆石年龄,认为此两组年龄与扬子板块早期最具代表性的两期构造-岩浆事件时代相吻合;~1.6 Ga 和~1.4 Ga 的碎

屑锆石年龄,将其解释为石鼓群存在两期中元古代岩浆事件;1.0~0.6 Ga 的碎屑锆石年龄,表明石鼓群同样也经历了新元古代岩浆活动;另外,510~237 Ma 的锆石年龄被认为是来自冈瓦纳古大陆的物质或者与该期的岩浆事件有关。本研究对石鼓-黎明地区黑云母石英片岩中碎屑锆石进行 U-Pb 定年,得到年龄范围为 2 557~785 Ma。同时对深熔长英质脉体中锆石进行研究,阴极发光图像显示明显的核-边结构,其核部显示碎屑锆石特点(图 3b)。核部年龄范围为 2 637~743 Ma,与寄主岩石年龄一致(黑云母石英片岩,2 557~811 Ma),表明该长英质脉体中的锆石是在深熔过程中从寄主岩石中捕获的。实验结果表明,黑云母石英片岩及其深熔长英质脉体中锆石存在 858~852 Ma 的主要年龄峰值。根据前人研究资料,扬子板块西缘广泛分布新元古代中酸性和基性侵入岩(e. g. Zhou *et al.*, 2002; Li Xianhua *et al.*, 2002, 2003; Li Zengxiang *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2006; Zhao and Zhou, 2007; Huang *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2008; 刘俊来等, 2008; Wang *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2012; Cai *et al.*, 2014),其中部分岩体(例如,关刀山岩体、格宗岩体)的形成时代为~360 Ma(徐士进等, 1996; Zhou *et al.*, 2002; Sun and Zhou, 2008; 耿元生等, 2008; Du *et al.*, 2014)。同样,扬子板块西缘(例如,大红山群、河口群等)也存在大量古元古代火山岩(e. g. Greentree and Li, 2008; 杨红等, 2012; 范宏鹏等, 2015),近年来在扬子板块西缘也陆续有大量太古代-古元古代碎屑锆石年龄的报道(e. g. Sun *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010; 朱华平等, 2011; Wang *et al.*, 2013)。综合上述,表明石鼓-黎明地区出露的该套变沉积岩的主要物质来源可能为扬子板块西缘新元古代岩浆岩,同时太古代-古元古代基底岩石也为其提供了部分物质来源。

变沉积岩中最年轻一组碎屑锆石年龄可以用来限定沉积时代(刘福来等, 2015)。本研究中黑云母石英片岩及其深熔脉体最年轻一组碎屑锆石年龄峰值为 858~852 Ma,表明石鼓-黎明地区变沉积岩的沉积时代应在~852 Ma 之后。该变沉积岩系在地层划分上属于李昆琼(2003)、姚雪等(2014)划分的古元古代石鼓岩群羊坡岩组,属于沙绍礼(2014)划分的古元古代黎明岩群。由此可见,不论是以上哪种划分方案,均将该套变沉积岩系时代划归为古元古代。罗改等(2017)在羊坡岩组中识别出新元古代基

性岩。结合以往资料,本次研究结果表明,石鼓岩群羊坡岩组的形成时代需要重新限定,该岩组中至少存在部分形成于新元古代或新元古代之后的变质基性岩和变沉积岩系。

4.2 变沉积岩中生代变质-深熔事件

从黑云母石英片岩中呈透镜体状或不规则状分布的长英质脉体中分选出的锆石,其边部阴极发光图像呈灰色/黑色弱环带或者无分带结构(图 3b),并且具有较低的 Th/U 比值,表现深熔锆石特点(Rubatto *et al.*, 2001, 2009; Imayama *et al.*, 2012)。该深熔锆石边部 225~197 Ma 的定年结果,代表了熔体结晶、长英质脉体的形成年龄(Cao *et al.*, 2019)。杨敬奎(2014)对塔城岩组 2 件变沉积岩样品中锆石进行定年得到多组年龄,其中两组主要年龄之一为 300~200 Ma,认为该岩组受到该时期构造岩浆作用影响较大,推测变质时代为海西期-印支期。若该论文中 510~237 Ma、被认为是来自冈瓦纳古大陆的物质或者与该期的岩浆事件有关的锆石年龄可信,表明该变沉积岩应该形成于中三叠纪之后,其变质年龄范围应进一步限定在 237~200 Ma 之间。本文得到的石鼓岩群羊坡岩组变沉积岩深熔时代与杨敬奎(2014)得到的巨甸岩群塔城岩组变沉积岩变质时代在误差范围内一致,表明石鼓岩群和巨甸岩群变沉积岩普遍遭受了中生代变质-深熔事件的改造。

查明中生代变质-深熔事件在扬子板块西缘与印支板块之间的空间展布,建立变质-深熔事件年代格架,对深入了解古特提斯洋闭合过程具有重要意义。近年来随着变质作用以及年代学研究的深入,沿金沙江-点苍山-哀牢山变质带有多处二叠纪-三叠纪变质事件的报道。Cao 等(2015)对金沙江变质带斜长角闪岩中岩浆锆石核部进行 LA-ICP MS 分析,得到 242 Ma 的结晶年龄,对石榴片岩中白云母进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学分析,得到 224 Ma 的变质年龄,进而将金沙江变质带的峰期变质年龄限定在 242~224 Ma 之间。Liu 等(2013)和 Ji 等(2019)分别将点苍山-哀牢山变质带变质杂岩的变质时代限定在 249~230 Ma 和 227~220 Ma 之间,并通过详细的岩相学和变质作用研究,确定峰期条件可达高压麻粒岩相。根据前人观点,石鼓杂岩属于石鼓-点苍山-哀牢山变质带的一部分(崔峻豪等, 2014),其中,点苍山-哀牢山杂岩带变质杂岩普遍记录了中生代和中生代-中新世多期变质-深熔事件(Liu *et al.*,

2013, 2015; Ji *et al.*, 2019)。本文研究表明石鼓岩群羊坡岩组变质杂岩遭受中生代变质-深熔事件改造,而石鼓岩群是否存在古新世-中新世多期变质-深熔事件的记录,还有待于进一步工作。

5 结论

(1) 石鼓-黎明地区变质杂岩普遍发生深熔。变沉积岩深熔脉体中锆石边部阴极发光图像呈弱环带或者无分带结构,并具有较高的 Th/U 值。对该类深熔锆石微区进行定年,得到年龄范围为 225 ~ 197 Ma,代表了该区变沉积岩的深熔时代。

(2) 石鼓-黎明地区变沉积岩及其深熔脉体中碎屑锆石定年得到 2 637 ~ 743 Ma 的年龄范围,其主要年龄峰值为 858 ~ 852 Ma,表明该套变沉积岩的沉积时代应晚于 ~852 Ma,并且其物质来源复杂,主要为扬子板块西缘新元古代岩浆岩,同时太古代-古元古代基底岩石也为其提供了部分物质来源。

致谢 感谢杨淳、刘建辉、车小超等在锆石 SHRIMP U-Pb 定年工作中给予的帮助;感谢李亮等在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年工作中的帮助。感谢编辑老师和审稿专家认真审阅本文,并提出许多宝贵的修改意见。

References

- Black L P, Kamo S L, Aleikoff J J, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1~2): 155 ~ 170.
- Cai Yongfeng, Wang Yuejun, Cawood P A, *et al.* 2014. Neoproterozoic subduction along the Ailaoshan zone, South China: geochronological and geochemical evidence from amphibolite[J]. *Precambrian Research*, 245: 13 ~ 28.
- Cao Wentao, Yan Danping, Qiu Liang, *et al.* 2015. Structural style and metamorphic conditions of the Jinshajiang metamorphic belt: Nature of the Paleo-Jinshajiang orogenic belt in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 748 ~ 765.
- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, *et al.* 2019. Timing and nature of the partial melting processes during the exhumation of the garnet-bearing biotite gneiss in the southern Altyn Tagh HP/UHP belt, Western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 274 ~ 293.
- Cawood P A, Hawkesworth C J and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 40(10): 875 ~ 878.
- Condie K C, Beyer E, Belousova E, *et al.* 2005. U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: The search for juvenile Precambrian continental crust[J]. *Precambrian Research*, 139(1~2): 42 ~ 100.
- Cui Junhao, Ren Tao, Hu Yuzhao, *et al.* 2014. A study on petrology and tectonic setting of upper member of Shigu Group: a case of Badi Region in Northwest Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(2): 199 ~ 207(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Guo Jinghui, Allen P Nutman, *et al.* 2014. Implications for Rodinia reconstructions for the initiation of Neoproterozoic subduction at ~860 Ma on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton[J]. *Lithos*, 196 ~ 197: 67 ~ 82.
- Fan Hongpeng, Zhu Weiguang and Chen Caijie. 2015. Review on Paleoproterozoic strata and magmatism in the Kangdian Area of the western margin of the Yangtze Block[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(5): 17 ~ 30.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, *et al.* 2008. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 215(in Chinese).
- Greentree M R and Li Zengxiang. 2008. The oldest known rocks in southwestern China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 289 ~ 302.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3~4): 231 ~ 282.
- Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Chen Lu, *et al.* 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(2): 425 ~ 430.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Li Xianhua, *et al.* 2008. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites from Mianning, South China[J]. *Precambrian Research*, 165(3): 190 ~ 204.
- Imayama T, Takeshita T, Yi K, *et al.* 2012. Two-stage partial melting and contrasting cooling history within the Higher Himalayan Crystalline Sequence in the forearc of the Nepal Himalaya[J]. *Lithos*, 134 ~ 135: 1 ~ 22.
- Ji Lei, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2019. Mineral phase equilibria and zircon geochronology constrain multiple metamorphic events of high-pressure pelitic granulites in south-eastern Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal*, 1 ~ 25.
- Li Kunqiong. 2003. The metamorphism, deformation and stratigraphic di-

- vision of Shigu schist in Northwest Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 22(3): 329 ~ 335(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 113: 135 ~ 154.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang and Ge Wenchun. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 122(1~4): 45 ~ 83.
- Li Zengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, *et al.* 2003. 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]. *Precambrian Research*, 122: 85 ~ 109.
- Lin T H, Chung Sunlin, Chiu Hanyi, *et al.* 2012. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from the Ailao Shan-Red River shear zone on the tectonic and crustal evolution of southwestern China[J]. *Chemical Geology*, 291: 23 ~ 37.
- Liu Fulai, Wang Fang, Liu Pinghua, *et al.* 2013. Multiple metamorphic events revealed by zircons from the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 24(1): 429 ~ 450.
- Liu Fulai, Wang Fang, Liu Pinghua, *et al.* 2015. Multiple partial melting events in the Ailao Shan-Red River and Gaoligong Shan complex belts, SE Tibetan Plateau: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within migmatites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 151 ~ 169.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji progenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 816 ~ 2 846(in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Wang Anjian, Cao Shuyun, *et al.* 2008. Geochronology and tectonic implication of migmatites from Diancangshan, Western Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 413 ~ 420(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *et al.* 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537 ~ 571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535 ~ 1 546.
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A User's Manual*[M]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 1 ~ 19.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.00*, a geochronology toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication.
- Luo Gai, Zhang Tong, Xiong Changli, *et al.* 2017. Zircon U-Pb dating and geological significance for Neoproterozoic metabasite of the Shigu Group in Northwestern Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 53(4): 643 ~ 656(in Chinese with English abstract).
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of Zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247 ~ 265.
- Rubatto D, Williams I S and Buick I S. 2001. Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 458 ~ 468.
- Rubatto D, Hermann J and Berger A. 2009. Protracted fluid induced melting during Barrovian metamorphism in the Central Alps[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(6): 703 ~ 722.
- Sha Shaoli. 1989. The general characteristics of Shigu metamorphic belt in western Yunnan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 5(1): 78 ~ 83(in Chinese with English abstract).
- Sha Shaoli, Chen Xiaolin and Jia Tan. 2014. A probe into the division and metamorphic feature of Shigu group[J]. *Yunnan Geology*, 33(1): 1 ~ 5(in Chinese with English abstract).
- Sun Weihua and Zhou Meifu. 2008. The ~ 860 Ma, Cordilleran-type Guandaoshan dioritic pluton in the Yangtze Block, SW China: Implications for the origin of Neoproterozoic magmatism[J]. *The Journal of Geology*, 116(3): 238 ~ 253.
- Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, *et al.* 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the Western Yangtze Block, SW China[J]. *Precambrian Research*, 172(1~2): 99 ~ 126.
- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, *et al.* 2013. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the Northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 261 ~ 1 272.
- Wang Peiling, Lo Chinghua, Lan Chingying, *et al.* 2011. Thermochronology of the PoSen complex, northern Vietnam: implications for tectonic evolution in SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 1 044 ~ 1 055.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. Mckibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*[C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1 ~ 35.

- Xu Shijin, Wang Rucheng, Shen Weizhou, *et al.* 1996. U-Pb and Rb-Sr isotopic dating of the Jinning granites in the Songpan-Ganzi orogenic belt and their tectonic significance[J]. *Science in China (Series D)*, 26(1): 52 ~ 58(in Chinese).
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze Block, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 994 ~ 3 014(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingkui. 2014. Research on the Geochemistry Characters of Metamorphic Series in Upper Shigu Group, Badi Region, Northwestern Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Yao Xue, Liu Yanwei and Yan Chengmin. 2014. New understanding of basic geological research of Northwest Yunnan Weixi region[J]. *Value Engineering*, 33(9): 298 ~ 300(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Cong Bolin. 1993. The Diancangshan-Shigu metamorphic belt in west Yunnan, China: Their geochemical and geochronological characteristics and division of metamorphic domains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 227 ~ 239(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precambrian Research*, 152(1 ~ 2): 27 ~ 47.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, *et al.* 2008. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment[J]. *Chemical Geology*, 257: 1 ~ 15.
- Zhao Xingfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 182(1 ~ 2): 57 ~ 69.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1 ~ 2): 51 ~ 67.
- Zhou Meifu, Ma Yuxiao, Yan Danping, *et al.* 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 144: 19 ~ 38.
- Zhu Huaping, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, *et al.* 2011. Detrital zircon U-Pb dating by LA-ICP-MS and its geological significance in Western margin of Yangtze Terrane[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(1): 70 ~ 74(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Xianhua, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. *Precambrian Research*, 164: 66 ~ 85.

附中文参考文献

- 崔峻豪, 任涛, 胡煜昭, 等. 2014. 滇西北石鼓群上段变质岩岩石学和地球化学研究: 以巴迪地区为例[J]. *矿物学报*, 34(2): 199 ~ 207.
- 范宏鹏, 朱维光, 陈才杰. 2015. 扬子地块西缘康滇地区古-中元古代地层和岩浆活动研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 37(5): 17 ~ 30.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 215.
- 李昆琼. 2003. 滇西北石鼓片岩变质变形特征及其划分[J]. *云南地质*, 22(3): 329 ~ 335.
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 31(10): 2 816 ~ 2 846.
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等. 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域内涵[J]. *岩石学报*, 24(3): 413 ~ 420.
- 罗改, 张彤, 熊昌利, 等. 2017. 滇西北石鼓岩群新元古代变质基性岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质与勘探*, 53(4): 643 ~ 656.
- 沙绍礼. 1989. 滇西石鼓群变质带基本特征[J]. *岩石学报*, 5(1): 78 ~ 83.
- 沙绍礼, 陈晓林, 贾昱. 2014. 石鼓群的划分及变质特征探讨[J]. *云南地质*, 33(1): 1 ~ 5.
- 徐士进, 王汝成, 沈渭洲, 等. 1996. 松潘-甘孜造山带中晋宁期花岗岩的 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素定年及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 26(1): 52 ~ 58.
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 2012. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 28(9): 2 994 ~ 3 014.
- 杨敬奎. 2014. 滇西北巴迪地区石鼓群上段变质岩系地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 姚雪, 刘艳伟, 严城民. 2014. 滇西北维西地区基础地质调研的新认识[J]. *价值工程*, 33(9): 298 ~ 300.
- 翟明国, 从柏林. 1993. 对于点苍山-石鼓变质带区域划分的意见[J]. *岩石学报*, 9(3): 227 ~ 239.
- 朱华平, 周邦国, 王生伟, 等. 2011. 扬子地台西缘康滇克拉通中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 31(1): 70 ~ 74.