

# 滇东南瑶山群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学 及其地质意义

廖震<sup>1,2,3</sup>, 刘玉平<sup>1</sup>, 李正祥<sup>4</sup>, 叶霖<sup>1</sup>, 李朝阳<sup>1,5</sup>, 王大鹏<sup>1</sup>

1.中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 4.Curtin 科技大学应用地质系, Bentley, WA6102, 澳大利亚; 5 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 430026

**摘要:** 为探讨滇东南瑶山群的原岩年龄以及后期经历的岩浆-变质-构造事件年龄, 本文开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年。结果表明, 阴极发光 (CL) 分析和光学显微分析显示瑶山群的锆石组成比较复杂, 可以分为继承锆石、变质锆石、深熔锆石/岩浆锆石等几大类。除少量测点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为新元古代外, 继承锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄变化范围集中在  $235 \pm 1.7 \text{ Ma} \sim 261 \pm 3.6 \text{ Ma}$ , 加权平均值为  $250.8 \pm 9.8 \text{ Ma}$  ( $N=4$ ,  $\text{MSWD}=4.1$ ); 深熔/岩浆锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄显示出  $\sim 85 \text{ Ma}$  和  $\sim 75 \text{ Ma}$  两个峰值; 变质增生锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为  $49 \text{ Ma} \sim 30 \text{ Ma}$ , 且主要集中在  $32 \text{ Ma}$  和  $42 \text{ Ma}$  左右。结合区域地质情况, 初步推测:  $250.8 \pm 9.8 \text{ Ma}$  的继承锆石峰值年龄表明, 瑶山群主体的原岩时代可能不早于二叠纪。变质锆石、深熔锆石/岩浆锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄可分为  $\sim 85 \text{ Ma}$ 、 $\sim 75 \text{ Ma}$ 、 $\sim 42 \text{ Ma}$ 、 $\sim 37 \text{ Ma}$  和  $\sim 32 \text{ Ma}$  等 5 组, 可能代表了红河断裂南段自燕山晚期以来 5 期较强烈构造-岩浆-变质事件的时限。

**关键词:** 瑶山群; SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学; 原岩; 岩浆-变质-构造事件; 红河断裂带; 滇东南

中图分类号: P618.5 文献标识码: A Doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.02.002

## Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of the Yaoshan Group, Southeastern Yunnan, China and Its Geological Significance

LIAO Zhen<sup>1,2,3</sup>, LIU Yu-ping<sup>1</sup>, Zheng-Xiang LI<sup>4</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, LI Chao-yang<sup>1,5</sup>, WANG Da-peng<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Non-ferrous Metal Resource Geological Survey, Beijing 100012, China; 4. Department of Applied Geology, Curtin University of Sciences and Technology, Bentley, WA6102, Australia; 5. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 430026, China

**Abstract:** The Yaoshan Group locates in the southeastern Ailao Shan-Red River strike-slip fault zone. It has experienced high-amphibolite facie metamorphism and chorismitization, thus it was thought as the Precambrian basement of the South China block in SE Yunnan region. In order to determine the ages of the protolithos, later magmatic, metamorphic and tectonic events of the Yaoshan Group, the zircon SHRIMP U-Pb dating was investigated. According to CL images and optical microscope analyses, the zircons derived from the Yaoshan

收稿日期: 2013-05-02 收到, 05-16 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40972129); 中国科学院创新项目 (KZCX2-YW-136); 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB41108); 中国科学院留学基金项目 (2003023)

第一作者简介: 廖震 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿床学、构造地质学专业. E-mail: lz@cncnm.com.

通讯作者: 刘玉平 (1971—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 矿床学、地球化学、构造地质学专业. E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn.

Group, which are very complicated with the metamorphosed re-crystal and over-growing, could be divided into inherited, metamorphic, anatectic or magmatic types. Besides a few analyzed spots with the Neo-Proterozoic ages, the inherited zircons mainly yielded  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages in the range from  $235\pm 1.7$  Ma to  $261\pm 3.6$ Ma, with a weighted mean value of  $250.8\pm 9.8$ Ma ( $N=4$ ,  $\text{MSWD}=4.1$ ). The  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of anatectic or magmatic zircons represented by two peaks of  $\sim 85$ Ma and  $\sim 75$ Ma, respectively. The  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of metamorphic zircons are in the range from 49 Ma to 30Ma, with three peaks of 32Ma, 37Ma and 42 Ma, respectively. Based on the regional geology, this study suggested that (1) the peak age of inherited zircons ( $250.8\pm 9.8$ Ma) indicated that the major protoliths of the Yaoshan Group might be formed later than the Permian period, and that (2) metamorphic, anatectic/magmatic zircons showed five  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  peak ages of  $\sim 85$  Ma,  $\sim 75$  Ma,  $\sim 43$  Ma,  $\sim 37$  Ma and  $\sim 32$  Ma might indicate five important tectonic, magmatic and metamorphic events in the south part of Red River fault since the later Yanshannian.

**Key words:** Yaoshan Group; zircon SHRIMP geochronology; protoliths; magmatic, metamorphic and tectonic events; Red River fault zone; Southeastern Yunnan

瑶山群分布于红河以北金竹坪至河口一带和蒙自绿水河一带, 主要为一套强烈变质-变形及混合岩化的片麻岩类、片岩类和变粒岩类。对于该群的研究十分薄弱, 仅有少量同位素年代学数据公开发表<sup>[1,2]</sup>, 且由于测试方法的局限性, 这些数据的可靠性值得商榷。在该群的研究中, 前人普遍将其与哀牢山群对比, 归属于中元古代<sup>[3]</sup>。本文对瑶山群进行了初步的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨瑶山群的时代归属, 并对红河断裂带南段的活动时限提供年代学制约。

## 1 区域地质概况

瑶山群分布于扬子地块、印支地块与华南褶皱系等几大构造单元之间的哀牢山-红河构造带南段, 呈北西-南东向带状延伸, 出露面积约  $700\text{ km}^2$ 。该岩群长期被认为是华南地块在滇东南地区的前寒武纪变质基底, 总体表现为一个强变形-变质带, 主要由混合质矽线黑云片麻岩、混合岩化矽线黑云片岩、矽线黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长变粒岩等组成, 并夹少量黑云斜长角闪岩、大理岩。由于常遭混合岩化, 局部地段出现各种形态的混合岩。瑶山群的顶底均被断裂切失, 内部亦常为断层所破坏, 故出露不全, 总厚度大于  $3740\text{m}$ 。根据岩性组合, 并以延伸比较稳定的斜长角闪岩或大理岩层为标志, 可以划分为4个岩性段: 第一段( $\text{Ptys}^a$ )以混合岩化矽线黑云母片岩和混合质矽线黑云片麻岩为主, 下部夹斜长角闪岩或大理岩, 局部夹黑云斜长变粒岩。本段的顶、底均被断层所切失, 厚度大于  $800\text{m}$ ; 第二段( $\text{Ptys}^b$ )岩石组合与第一段相似, 但斜长角闪岩或大理岩夹层极少, 以混合岩化矽线斜长黑云片岩、混合质矽线黑云片麻岩为主, 夹少量混合岩化黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩, 局部夹透镜状斜长角闪岩或大理岩, 顶部为斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩或大理岩。底部与第一段呈断层接触, 厚度大于  $700\text{m}$ ; 第三段( $\text{Ptys}^c$ )下部为混合岩化(矽线)黑云斜长片麻岩、(石榴)黑云斜长变粒岩与混合质矽线黑云片麻岩互层, 上部为混合质矽线黑云片麻岩、黑云质条痕状—均质混合岩, 顶部为斜长角闪岩、大理岩, 厚度大于  $1500\text{m}$ ; 第四段( $\text{Ptys}^d$ )由混合质矽线黑云片麻岩、混合岩化(矽线)黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩及少量斜长角闪岩或大理岩构成。本段以黑云斜长变粒岩和黑云斜长片麻岩所占比例较多而区别于其余3段。本

段顶部被断层切失，或被三叠系所覆盖，厚度大于 670m。

1:20 万区域地质调查报告金平幅、河口幅<sup>[4]</sup>认为瑶山群原岩为一套沉积建造系列，包括陆源碎屑岩夹碳酸盐岩建造。根据岩相学特征及区域地质情况，初步认为瑶山群为一套经历了强烈变形-变质的碎屑岩夹碳酸盐岩、基性岩的构造混杂岩。

瑶山群分布区内还出露了不少岩浆岩，主要为中酸性侵入岩，岩浆活动时期主要为中生代，岩石类型主要为片麻状黑云花岗岩和片麻状黑云二长花岗岩。岩体与围岩的界面明显，为突变接触，但两者的片麻理产状大体一致，而不因两者界面的形状而改变方位，反映这些花岗质岩体形成于同构造期，并与瑶山群一同经历了一致的后期构造事件。研究区内还出露少量二叠纪峨眉山玄武岩，普遍遭受后期动力变质作用改造，在五道河一带由于变形-变质程度较深，其原生火成结构及矿物组分均遭受强烈改造。

由于受红河深大断裂多期活动的影响，瑶山群内的构造现象比较复杂，构造型式以褶皱、断裂为主。区内岩层呈北西-南东走向，倾角通常在 50°~60°以上，构成规模宏伟、比较紧密的线状褶皱，褶皱的轴线彼此大体平行，呈直线延伸。受红河断裂的控制，区内断裂以北西向、北北西向断裂为主，并伴有北东向、南北向断裂发育。

## 2 样品描述

本文研究的3件样品YS404、YS414、YS410，分别采自河口县达沟河瑶山群剖面的第一段 (P<sub>tys</sub><sup>a</sup>)、第三段 (P<sub>tys</sub><sup>c</sup>) 和第四段 (P<sub>tys</sub><sup>d</sup>) (图1)，对应的地理坐标分别为YS404 (E 103°40.8', N22°47.9')、YS414 (E 103°42.4', N22°48.5') 和YS410 (E 103°43.4', N22°48.6')。

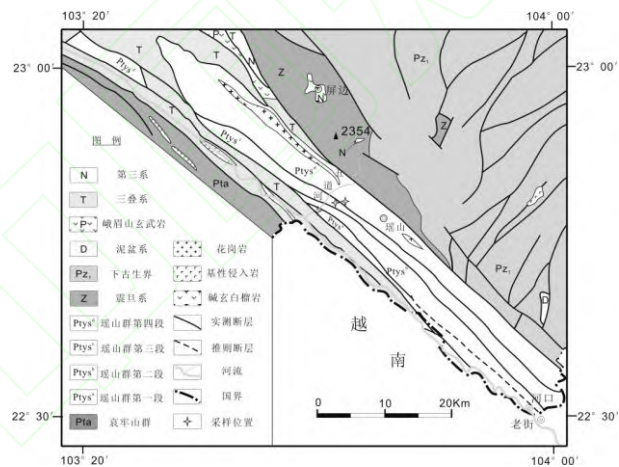
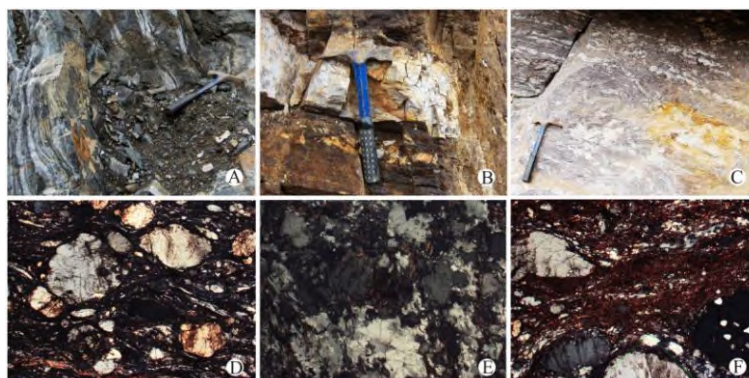


图1 研究区地质略图及采样位置

Fig.1 Geological sketch of the study area, showing sampling sites

YS404和YS414分别为夕线黑云斜长混合质片麻岩 (图2A、D) 和石榴黑云斜长混合质片麻岩 (图2C、F)，区别主要为矽线石与石榴石的含量不同。岩石呈灰黑-灰褐色，片麻状-眼球状-条带状构造，纤状-鳞片花岗变晶结构，主要矿物组合类似，为石英 (25%~35%) + 斜长石 (25%~40%) + 黑云母 (15%~30%) + 白云母 (0~15%) + 石榴石 (0~10%) + 矽线石 (0~10%) + 普通角闪石 (0~10%)，副矿物有锆石、磷灰石、独居石、榍石及金属矿物。由于受混合岩化的影响，而含有不等量的钾长石斑晶。斜长石呈他形不规则粒柱状，具聚片双晶及钠长石-肖钠长石联合双晶；黑云母呈半自形-自形叶片状，黄褐色-浅黄色多色性；石英呈他形粒状，具波状消光；石榴石呈半自形粒状，粒度较大者构成变斑晶，

常有石英包粒；矽线石呈定向排列的自形针状、纤维状，一般分布在黑云母周围；普通角闪石呈定向排列的短柱状，蓝绿-黄绿-淡黄绿多色性；钾长石呈不规则状分布于斜长石、石英粒间，有时呈细脉状充填于斜长石的裂隙，具隐蔽型格子双晶。



A,D-夕线黑云斜长混合质片麻岩；B,E-夕线黑云斜长混合质片麻岩中的长英质脉体；C,F-石榴黑云斜长混合质片麻岩（显微照片倍率均为 $2.5\times 10$ ，糜棱岩化、S-C结构指示强烈的左行剪切）

图2 野外露头及显微镜照片

Fig.2 Outcrop photographs and microscope photographs

YS410为夕线黑云斜长混合质片麻岩中的长英质脉体（图2B、E），主要矿物为石英（30%~40%）+斜长石（30%~40%）+钾长石（15%~25%）+云母（10%~15%），副矿物主要为锆石、电气石和磷灰石，粗粒含斑构造，花岗变晶结构，斑晶主要为石英和长石。

### 3 分析方法

将岩石样品粉碎后采用常规的重-磁选方法，除去石英、长石、云母等比重较轻的矿物及一些磁性矿物，然后在双目镜下挑选出测年所需的锆石。将挑选出来的几类锆石和标准锆石TEMORA（年龄为417Ma）在玻璃板上用环氧树脂固定，抛光到暴露出锆石的中心面，接着进行锆石的反射光、透射光、阴极发光（CL）的照相和分析，以检查锆石的内部结构，确定合适的测点位置。同位素分析所用仪器为SHRIMP II，详细的实验流程和原理参见文献[5~7]。采用的标准锆石为CZ3（年龄为564Ma， $U=551\times 10^{-6}$ ）和TEMORA（年龄为417Ma）。前者用于标定U、Th和Pb的含量，后者用于校正年龄。束斑直径约为 $25\mu\text{m}$ ，测定结果用实测的 $^{204}\text{Pb}$ 进行普通Pb的校正。数据处理及U-Pb谱和图绘制采用Ludwig编写的SQUID 1.02和ISOPLLOT 2.49程序<sup>[8,9]</sup>。锆石制靶和光学显微照相在中国地质科学院北京离子探针中心完成，阴极发光图像分析（CL）在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成，同位素测试在Curtin科技大学西澳离子探针中心完成。

### 4 分析结果

光学显微分析和CL图像分析（图2）显示，瑶山群锆石组成比较复杂，可以分为继承锆石、变质锆石、深熔/岩浆锆石等几大类，说明样品中的锆石是多期地质作用的产物。三件样品的SHRIMP分析测试结果见表1，表1中所列单个数据点的误差均为 $1\sigma$ 。样品年龄计算采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄，其加权平均值为95%的置信度。

#### 4.1 YS404夕线黑云斜长混合质片麻岩

该样品的锆石，多呈半自形-自形长柱状、柱状。CL图像显示，锆石组成复杂，具明显

的多层结构特征（图2），核部为形状不规则的继承锆石，边部为多期的变质增生层。边部锆石具岩浆锆石特征的振荡环带结构，结合岩石样品特征分析，可能是混合岩化作用造成的深熔增生的结果，符合深熔锆石的特征<sup>[10-12]</sup>。在锆石光学显微照相和CL图像分析的基础上，选择合适的位置，对该样品7粒锆石进行了24个点分析（表1、图3）。24个分析点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄变化范围为28.9±0.2~260.8±3.6Ma，可以分为3个年龄组：第一组包括5个分析点，测点位于锆石的核部，Th含量为（137~614）×10<sup>-6</sup>，U含量为（218~1002）×10<sup>-6</sup>，Th/U比值为0.34~0.86，显示岩浆锆石特征。其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为234.8±1.7~260.8±3.6Ma，去除谐和性较差的测点A-3-2后，4个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄加权平均值为250.8±9.8Ma（MSWD=4.1），可能反映了原岩的年龄信息；第二组包括2个分析点，Th的含量分别为394×10<sup>-6</sup>和295×10<sup>-6</sup>，U的含量分别为73×10<sup>-6</sup>和71×10<sup>-6</sup>，Th/U比值分别为0.19和0.25，<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄分别为107.9±1.4Ma和147.9±2.3Ma。其中，107.9±1.4Ma这个测点位于谐和线上；而147.9±2.3Ma这个测点偏离谐和线，位于谐和线下方。由于该组年龄对应的测点位置位于锆石核部与边部的过渡带，且得出的年龄数据分散，所以其年龄的地质意义尚不明确，是否反映区内存在燕山早-中期一次较强的构造热事件，有待进一步研究；第三组包括17个分析点，测点位置主要位于锆石的边部，其Th的含量为（39~823）×10<sup>-6</sup>，U含量明显高于前述两组为（717~16666）×10<sup>-6</sup>，Th/U比值为0.02~0.06，具变质锆石的Th/U比值特征，可能是多期变质增生、流体改造作用产物。该组锆石测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为28.9±0.2~49.0±0.6Ma，其年龄频率统计显示可以分为两个亚组，加权平均值分别为32.4±1.2Ma（N=13，MSWD=182）和43.9±5.3Ma（N=4，MSWD=36）。剔除离散测点后，两个亚组的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄加权平均值分别为31.7±0.6Ma（N=8，MSWD=15）和42.3±0.5Ma（N=3，MSWD=0.47）。该组年龄基本上落在谐和线上或其附近，谐和关系较好，可能代表了锆石晶体的变质增生或强烈的流体改造作用时间。

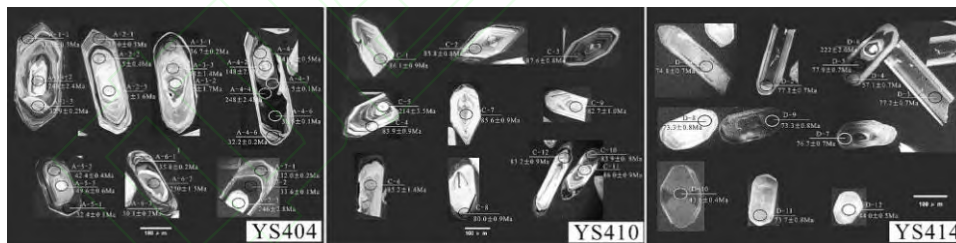


图3 瑶山群代表性锆石的阴极发光图像及测点年龄

Fig.3 CL images and U-Pb data of selected zircons from the Yanshan Group

#### 4.2 YS410夕线黑云斜长混合质片麻岩中的长英质脉体

该样品中的锆石主要呈长柱状、短柱状自形晶，CL图像显示典型的振荡环带结构，符合岩浆锆石的特征（图2）。部分锆石颗粒具有双层结构，核部为形状不规则的继承锆石。对该样品10粒锆石的12个测点进行了分析（表1、图4）。其中，测点C-5位于继承锆石上，其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为214±3.5Ma，偏离谐和线较大，代表Pb丢失年龄或混合年龄，没有实际地质意义。其余11个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄集中于80.0±0.9~86.1±0.9Ma，Th含量为（96~429）×10<sup>-6</sup>，U含量为（652~3787）×10<sup>-6</sup>，Th/U比值为0.12~0.49，Th、U含量及Th/U比值与年龄值无明显的相关关系，基本符合岩浆锆石的Th/U比值特征。去除偏离谐和线的C-8测点，其余10个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄加权平均值为84.7±0.8Ma（MSWD=1.7）。由于该样品为混合质片麻岩中的长英质脉体，应为混合岩化-岩浆作用形成的原地-半原地型酸性岩浆

结晶的产物，因此该年龄可以代表深熔/岩浆锆石的结晶年龄。在该采样点北侧，呈北西-南东向出露的燕山晚期片麻状二云花岗岩，与瑶山群具有一致的片麻理，反映两者经历了相同的后期动力变质作用。该花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $82.4 \pm 1.9\text{Ma}$ （本课题组数据，另文发表），与YS410锆石年龄在误差范围内一致，表明两者可能为同一期岩浆作用产物。

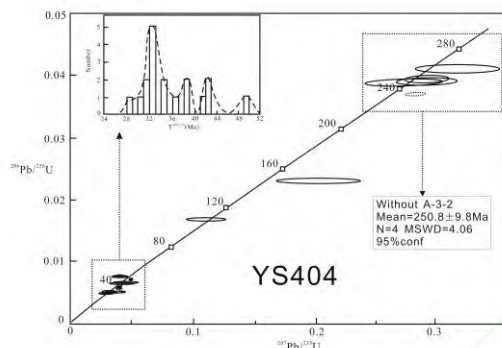


图4 样品YS404锆石SHRIMP数据的U-Pb谐和图（小插图为累计概率统计图）

Fig.4 The U-Pb concord figures of the SHRIMP data of zircons from the Sample YS404

#### 4.3 YS414石榴黑云斜长混合质片麻岩

样品YS414中的锆石主要呈柱状、浑圆状和面状半自形-他形晶。锆石棱角不明显，边缘带可见宽度变化的浅色环带，与高角闪岩相-麻粒岩相变质锆石类似<sup>[10-12]</sup>，说明遭受过后期高级变质作用的改造。对该样品10粒锆石的12个测点进行了分析（表1、图5），Th含量为 $(5 \sim 121) \times 10^{-6}$ ，U含量为 $(613 \sim 3447) \times 10^{-6}$ ，Th/U值为 $0 \sim 0.04$ 。其中大部分Th/U值为0.01，具明显的变质锆石Th/U比值特征。其中，点D-6为核部继承锆石，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $221.5 \pm 2\text{Ma}$ ，偏离谐和线较大，代表Pb丢失年龄或混合年龄；其余11个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄可以划分为3组：第一组包括2个分析点（测点D-10和D-12），年龄范围为 $42.4 \pm 0.4 \sim 44.0 \pm 0.5\text{Ma}$ ，均落在谐和曲线上，谐和关系良好，该组年龄与YS404的第三组年龄范围基本一致，可能反映了同一期构造-热事件；第二组只包括1个测点D-4，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $57.1 \pm 0.7\text{Ma}$ 。由于该测点位于锆石的边缘部分，CL图相（图6）显示其经历过流体改造作用，且该点在谐和图上位于谐和曲线的上方，指示该年龄值应为锆石的Pb丢失年龄；第三组包括8个分析点， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $72.6 \pm 0.7 \sim 77.4 \pm 0.7\text{Ma}$ ，均位于谐和线上或附近，加权平均值为 $75.2 \pm 1.5\text{Ma}$ （ $N=8$ ， $\text{MSWD}=6.1$ ），可能指示燕山晚期的一次区域构造-热活动事件，即高角闪岩相变质或混合岩化的年龄。

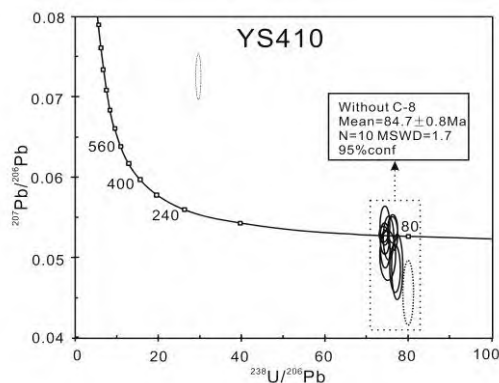


图5 样品YS410锆石SHRIMP数据的U-Pb谐和图

Fig.5 The U-Pb concord figures of the SHRIMP data of zircons from the Sample YS410

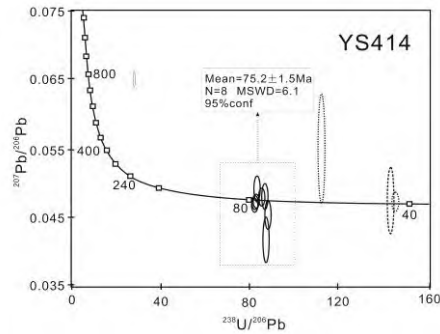


图6 样品 YS414 锆石 SHRIMP 数据的 U-Pb 谐和图

Fig.6 The U-Pb concord figures of the SHRIMP data of zircons from the Sample YS414

## 5 讨论

### 5.1 关于瑶山群原岩形成时代的讨论

在对瑶山群的研究中，由于缺乏系统的年代学资料和化石记录，前人普遍认为该群归属于中元古界，与红河南侧的哀牢山群同为测区的最古老地层<sup>[1-4]</sup>。邹日等根据瑶山群与哀牢山群具有相似的岩石组合、变质变形特征，及二者在空间上的紧密相邻关系，认为两群为同一套地层，获得大理岩Pb-Pb等时线年龄为 $1360 \pm 60 \text{ Ma}$ ，并使用“哀牢山岩群”来统一命名，认为二者的分离是由于受后期地质作用的影响造成的<sup>[1]</sup>。朱炳泉等<sup>[2]</sup>进一步支持上述观点，认为哀牢山群和瑶山群由古元古代至新元古代（2000~800 Ma）的构造岩片组成，主体岩石形成于1300~1600 Ma，而不存在太古宙基底。近年来，对哀牢山群变质岩的精细年代学研究结果<sup>[13-15]</sup>，并不支持其属于元古代的传统认识。同时，在缺少充分的地质年代学证据的条件下，简单地把哀牢山群跟瑶山群划分为同一地层单位，并由此得出瑶山群属于元古代的观点也值得怀疑。

本文对瑶山群样品SHRIMP锆石U-Pb测年中发现，除2个测点显示出新元古代年龄外（YS410，C-5测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 $852 \pm 29 \text{ Ma}$ ；YS414，D-6测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄 $777 \pm 25 \text{ Ma}$ ），其余继承锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化范围集中在 $235 \pm 1.7 \text{ Ma} \sim 261 \pm 3.6 \text{ Ma}$ 。其中，谐和性较好的4个测点的加权平均值为 $250.8 \pm 9.8 \text{ Ma}$ （ $N=4$ ， $\text{MSWD}=4.1$ ），可与哀牢山-金沙江构造带糜棱状花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果 $250.2 \pm 2.1 \text{ Ma}$ 和 $247.2 \pm 2.3 \text{ Ma}$ 对比<sup>[15]</sup>。研究表明<sup>[3,16,17]</sup>，峨眉山玄武岩的南界可跨过中越边境，延伸到越南境内。哀牢山-红河断裂及其附近区域，位于峨眉山玄武岩出露的集中区内。研究区内，五道河一带出露厚约200m的峨眉山玄武岩夹海相沉积岩，由于遭受强烈的变质作用，形成微粒角闪岩夹少量大理岩、含十字石斜长黑云片岩。研究区北西侧的蒙自马茨邑一带，也出露了厚度约1000m、浅变质的峨眉山玄武岩。瑶山群继承锆石年龄，与峨眉山玄武岩的主喷发时限（约257~259Ma）在误差范围内一致<sup>[17]</sup>。因此，上述继承锆石的年龄，在一定程度上反映了瑶山群的原岩可能与峨眉山玄武岩及其风化剥蚀产物有关。

根据岩相学特征及结合区域地质情况，初步认为瑶山群为一套经历了强烈变形-变质的陆源碎屑岩夹碳酸盐岩、基性岩的构造混杂岩。本文所测继承锆石年龄可能代表了瑶山群玄武质原岩的形成年龄。瑶山群五道河一带零星出露的峨眉山玄武岩，与瑶山群标准剖面的岩性有一定的可比性，只是变质程度稍低。区域上，沿红河断裂分布的下三叠统洗马塘组、永宁镇组跟瑶山群呈断层接触，其岩性与瑶山群原岩性质相似，它们可能本属于同一时期的沉

积地层，只是瑶山群岩石所处位置构造活动更强烈，使得它们最终的岩性差别较大。综上所述，本文推测瑶山群主体的原岩时代可能不早于二叠纪。诚然，由于本文研究的样品有限，本文认识不一定正确。我们拟结合锆石Hf-O同位素和微量元素研究，开展进一步的年代学工作。

## 5.2 对红河断裂带活动时限的制约

位于印支地块和扬子地块间红河断裂带（RRFZ）是目前亚洲最活动的断裂带之一，该断裂带主要由红河断裂和哀牢山断裂组成。关于该断裂带的形成，大陆挤出假说<sup>[18-21]</sup>认为是由于印度板块与欧亚板块的碰撞造成的印支地块被顺时针旋转挤出的结果，该挤出作用还导致了南海的打开。

关于红河断裂带活动的时限，目前存在着较大的争论。大量研究<sup>[19,21-25]</sup>认为红河断裂带的左行走滑活动时限为35~17 Ma，与南海的打开时间（32~17Ma）一致；张进江等<sup>[26,27]</sup>认为红河断裂带在60Ma左右就开始了活动，并得出3期左行走滑的形成时代分别为58~56 Ma、27~22 Ma和13~12 Ma；孙珍等<sup>[28]</sup>把红河断裂带在新生代的演化大致分成4个阶段：

（1）50~38 Ma期间的缓慢平移运动；（2）38~25 Ma期间的快速左行走滑运动；（3）25~5 Ma期间的左行走滑逐渐停止阶段；（4）5 Ma后的右行走滑阶段。

瑶山群位于红河断裂带内，受其活动的影响显著。本文获得的瑶山群YS404和YS414两件样品的变质增生锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为49~30 Ma，且主要集中在32 Ma、37 Ma和42 Ma左右，表明红河断裂南段在喜山早期存在强烈的构造-热活动。其中，~32 Ma的年龄可与曹淑云等<sup>[13]</sup>报道的点苍山高温糜棱岩锆石SHRIMP年龄（30.88±0.32 Ma）对比，代表了快速左行走滑运动的峰期年龄；而42 Ma可能代表了缓慢平移运动的峰期年龄。YS410深熔/岩浆锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为~85 Ma，与采样点附近中岭岗片麻状黑云花岗岩锆石SHRIMP年龄~82 Ma（另文发表）相近；YS414变质锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为~75 Ma，与侵入于瑶山群中的片麻状含石榴子石花岗岩锆石U-Pb不一致线下交点年龄75 Ma<sup>[1]</sup>一致。表明红河断裂于~85 Ma和~75 Ma存在2期强烈的构造-岩浆活动，可与Hall<sup>[29]</sup>提出的南海白垩纪末期的初始裂谷伸展对应。据此，作者认为红河断裂南段可能早在白垩纪末期（~85 Ma）便开始了活动，这可能与印度板块自晚白垩世与非洲大陆分离、加速向北漂移，导致新特提斯洋壳俯冲诱发印支地块与华南地块之间的边界重新调整有关<sup>[30-32]</sup>。

## 6 小结

（1）瑶山群锆石组成比较复杂，变质重结晶和增生现象十分普遍，可分为继承锆石、变质锆石、深熔锆石/岩浆锆石等类型，说明样品中的锆石是多期地质作用的产物；

（2）继承锆石峰值年龄为250.8±9.8 Ma（N=4，MSWD=4.1），结合区域地质背景，该继承锆石与峨眉山玄武岩同期，暗示继承锆石可能与峨眉地幔柱活动有关，据此推测瑶山群主体的原岩时代可能不早于二叠纪；

（3）瑶山群YS404、YS414变质增生锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为49~30 Ma，表明红河断裂带在该时期发生强烈的构造-热活动，~32 Ma、~37 Ma和~42 Ma可能是其活动的3次高峰。YS410深熔/岩浆锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为~85 Ma，YS414变质锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U表面年龄为~75 Ma，表明红河断裂在燕山晚期可能存在2期强烈的构造-岩浆活动，指示红河断



裂至少在其南段,可能早在晚白垩世就开始活动,这可能与印度板块加速向北运动有关。

**致谢:** Curtin 大学 John de Laeter 质谱中心 SHRIMP 实验室 Mr. A Frew 和 Dr. A Kennedy, 中国地质科学院离子探针中心刘敦一先生、陶华工程师、宋彪研究员、石玉若博士等,对锆石制靶和 SHRIMP 定年给予了指导和帮助。中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室毛骞高级工程师,对阴极发光 (CL) 分析给予了指导和帮助,在此一并致谢。

#### 参考文献 (References):

- [1] 邹日,朱炳泉,孙大中,常向阳. 红河成矿带壳幔演化与成矿作用的年代学研究[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 46—56.
- [2] 朱炳泉,常向阳,邱华宁,王江海,邓尚贤. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(2): 76—82.
- [3] 云南省地矿局. 云南省区域地质志:中华人民共和国地质矿产部地质专报[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [4] 云南省地矿局第二区域地质测量大队. 中华人民共和国区域地质调查报告金平幅-河口幅[R]. 1972.
- [5] Compton W, Williams S, Mayer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion[J]. Microprobe J. Geophys. Res., 1984, 89: B525—534.
- [6] Williams I S. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology in the study of granite rocks[J]. Rans. R. Soc. Edinburgh-Earth Sci., 1992, 3: 447—458.
- [7] 宋彪,张玉海,万渝生,简平. 锆石Shrimp样品制靶、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26—30.
- [8] Ludwig K R. ISOPLLOT / EX version 2.49: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, No 1a, 2001.
- [9] Ludwig K R. SQUID Version 1.02: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronological Centre Special Publication, No.2, 2001.
- [10] Vavra G. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: A cathodoluminescence study[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1990, 106: 90—91.
- [11] 程裕淇,刘敦一,Williams I S,简平,庄育勋,高天山. 大别山东部安徽岳西碧溪岭深色榴辉岩和含石榴石片麻状花岗质岩石SHRIMP分析:晋宁期高压-超高压变质的同位素年代学证据[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 193—205.
- [12] 简平,程裕淇,刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩U-Pb年龄解释的基本依据[J]. 地学前沿, 2001, 8(3): 184—191.
- [13] 曹淑云,刘俊来, Bernd L, Axel V, 邹运鑫,赵春强. 哀牢山-红河剪切带左行走滑作用起始时间约束:点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据[J]. 地质学报, 83(10): 1388—1400.
- [14] 李宝龙,季建清,付孝悦,龚俊峰,宋彪,庆建春,张臣,马宗晋. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系变质时限研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 595—608.
- [15] 戚学祥,朱路华,李化启,胡兆初,李志群. 青藏高原东缘哀牢山-金沙江构造带糜棱状花岗岩的LA-ICP-MS U-Pb定年及其构造意义[J]. 地质学报, 2010, 84(3): 357—369.
- [16] 林建英. 中国西南三省二叠纪玄武岩的时空分布及其地质特征[J]. 科学通报, 1985, 30(12): 929—932.
- [17] 宋谢炎,候增谦,汪云亮,张成江,曹志敏,李佑国. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因[J]. 矿物岩石, 2002, 22(4): 27—32.
- [18] Tapponnier P, Peltzer G, Ledain A Y, Cobbold P. Propagation extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 1982, 22 (4): 611—616.
- [19] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schaerer U, Zhong D, Wu H, Liu X, Ji S, Zhang L, Zhong J. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. Nature, 1990, 343 (6257): 431—437.
- [20] 钟大赉, Tapponnier P, 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, Schaerer U, Lacassin R, Leloup P. 大型走滑断层——碰撞后陆内变形的重要形式[J]. 科学通报, 1989, 7: 526—529.
- [21] Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Lovera O M, Wang J H. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. Jour. Geophys. Res., 2003, 108 (B2): Art No. 2127.

- [22] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Scharer U, Zhong D L, Liu X H, Zhang L S, Ji S C, Trinh P T. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 3—84.
- [23] Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Tapponnier P, Lacassin R, Chen W. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone. Yunnan and Vietnam[A]. Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*[M]. New York: Cambridge University Press, 1996: 208—226.
- [24] 张连生, 钟大赟. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. *地质科学*, 1996, 31(4): 327—341
- [25] Wang P L, Lo C H, Lee T Y, Chung S L, Lan C Y, Nguyen T Y. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan-Red River shear zone: A perspective from Vietnam[J]. *Geology*, 1998, 26: 887—890
- [26] 张进江, 钟大赟, 周勇. 东南亚及哀牢山红河构造带演化的讨论[J]. *地质评论*, 1999, 45(4):337—344.
- [27] 张进江, 钟大赟, 桑海清, 周勇. 哀牢山—红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J]. *地质科学*, 2006, 41(2): 291—310.
- [28] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 丘学林, 吴世敏. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2): 1—9
- [29] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 353—431.
- [30] Storey M, Mahoney J J, Saunders A D, Duncan R A, Kelley S P, Coffin M F. Timing of hot-spot related volcanism and the breakup of Madagascar and India[J]. *Sciences*, 1995, 267: 852—855.
- [31] Torsvik T H, Tucker R D, Asawal L D, Carter L M, Jamtveit B, Vidyadharan K T, Venkataramana P. Late Cretaceous India-Madagascar fit and timing of break-up related magmatism[J]. *Terra Nova*, 2000, 12: 220—224
- [32] 钟大赟, 季建清. 新特提斯洋俯冲时间:变质洋壳残片 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 微区年龄[J]. *科学通报*, 1999, 44: 1782—1785.

表 1 瑶山群 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb dating of the Yaoshan Group

Spot	<sup>206</sup> PbC%	U (10 <sup>-6</sup> )	Th (10 <sup>-6</sup> )	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Age	1s err	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb Age	1s err	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th Age	1s err	D %	<sup>238</sup> U/ <sup>206</sup> Pb*	%err	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb*	%err	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U	%err	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U	%err	err corr
YS404 混合质夕线黑云斜长片麻岩																				
A-1-1	0.45	1773	70	0.04	31.0	0.3	-180	384			117	207.46	1.1	.0428	15.4	0.03	15.4	.0048	1.1	.073
A-1-2	-0.46	337	185	0.57	247.7	2.4	329	162	278	14	25	25.53	1.0	.0530	7.2	0.29	7.2	.0392	1.0	.134
A-1-3	-0.59	3467	166	0.05	32.2	0.2	313	139	59	16	89	195.64	0.7	.0526	6.1	0.04	6.2	.0051	0.7	.110
A-2-1	0.29	2449	135	0.06	32.0	0.3	-3	211	23	17	1277	200.93	0.8	.0460	8.7	0.03	8.8	.0050	0.8	.095
A-2-2	-0.30	1440	57	0.04	42.5	0.4	357	96	71	13	88	151.12	0.8	.0537	4.2	0.05	4.3	.0066	0.8	.193
A-2-3	-0.78	218	181	0.86	260.8	3.6	477	218	276	15	45	24.23	1.4	.0566	9.9	0.32	10.0	.0413	1.4	.141
A-3-1	-0.35	6038	154	0.03	34.1	0.1	206	42	69	5	82	175.38	0.4	.0502	1.8	0.04	1.8	.0057	0.4	.229
A-3-2	-0.31	528	172	0.34	234.8	1.7	366	56	260	7	36	26.96	0.7	.0539	2.5	0.28	2.6	.0371	0.7	.275
A-3-3	0.31	394	73	0.19	107.9	1.4	119	279	194	25	9	59.27	1.3	.0484	11.8	0.11	11.9	.0169	1.3	.107
A-4-1	0.48	1282	48	0.04	41.9	0.5	-271	359			115	153.43	1.1	.0413	14.1	0.04	14.2	.0065	1.1	.077
A-4-2	-1.39	295	71	0.25	147.9	2.3	741	310	306	45	80	43.10	1.6	.0640	14.6	0.20	14.7	.0232	1.6	.107
A-4-3	-0.09	5937	164	0.03	34.7	0.1	74	50	44	5	50	173.46	0.4	.0475	2.1	0.04	2.1	.0058	0.4	.199
A-4-4	0.01	16666	823	0.05	36.0	0.1	28	29	52	3	-66	138.16	0.2	.0466	1.2	0.05	1.2	.0072	0.2	.196
A-4-5	0.05	12480	374	0.03	32.2	0.1	17	50	36	8	-128	167.05	0.3	.0464	2.1	0.04	2.1	.0060	0.3	.163
A-4-6	-0.22	2947	171	0.06	32.2	0.2	272	102	45	8	88	199.92	0.7	.0517	4.5	0.04	4.5	.0050	0.7	.152
A-5-1	0.20	6255	147	0.02	30.2	0.2	90	75	18	12	64	198.21	0.5	.0478	3.1	0.03	3.2	.0050	0.5	.145
A-5-2	-1.08	1656	75	0.05	42.4	0.4	532	196	109	37	92	151.42	1.0	.0581	8.9	0.05	9.0	.0066	1.0	.111
A-5-3	0.81	717	39	0.06	49.0	0.6	-334	304	61	30	115	131.05	1.3	.0403	11.8	0.04	11.9	.0076	1.3	.106
A-6-1	0.08	5144	151	0.03	34.1	0.2	67	90	29	14	47	179.36	0.5	.0474	3.8	0.04	3.8	.0056	0.5	.129
A-6-2	-0.14	1002	614	0.63	250.2	1.3	372	48	258	4	33	25.27	0.5	.0540	2.1	0.29	2.2	.0396	0.5	.236
A-6-3	-0.21	4131	237	0.06	28.9	0.2	101	106	42	8	70	213.86	0.6	.0480	4.5	0.03	4.5	.0047	0.6	.132
A-7-1	-0.12	3531	146	0.04	31.5	0.2	254	67	37	5	87	201.19	0.6	.0513	2.9	0.04	3.0	.0050	0.6	.203
A-7-2	-0.12	11944	525	0.05	32.2	0.1	94	42	54	4	59	166.72	0.3	.0479	1.8	0.04	1.8	.0060	0.3	.177
A-7-3	0.50	243	137	0.58	245.8	2.8	190	224	261	17	-30	25.72	1.2	.0499	9.6	0.27	9.7	.0389	1.2	.122

(续表 1)

Spot	$^{206}\text{Pb}/\text{C}\%$	U ( $10^{-6}$ )	Th ( $10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age	1s err	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age	1s err	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ Age	1s err	D %	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	%err	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	%err	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	%err	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	%err	err corr
YS410 混合质夕线黑云斜长片麻岩中的长英质脉体																				
C-1	0.16	847	399	0.49	86.1	0.9	68	65	84	2	-26	74.40	1.0	0.0474	2.7	0.09	2.9	0.0134	1	0.35
C-2	0.16	1015	326	0.33	85.8	0.8	1	81	79	3	-5666	74.62	1.0	0.0461	3.4	0.09	3.5	0.0134	1	0.283
C-3	-0.08	3787	429	0.12	85.2	0.8	101	32	88	3	14	73.11	0.9	0.048	1.4	0.09	1.6	0.0137	0.9	0.548
C-4	-0.09	830	173	0.21	83.9	0.9	127	57	82	3	34	76.37	1.0	0.0486	2.4	0.09	2.6	0.0131	1	0.391
C-5	0.18	680	51	0.08	214	3.5	852	59	670	26	75	29.63	1.7	0.0675	2.8	0.31	3.3	0.0338	1.7	0.511
C-6	0.50	652	114	0.18	85.2	1.4	-41	109	69	7	306	75.18	1.6	0.0453	4.5	0.08	4.8	0.0133	1.6	0.336
C-7	0.03	786	369	0.49	85	0.9	71	88	86	3	-19	75.37	1.0	0.0474	3.7	0.09	3.8	0.0133	1	0.27
C-8	0.65	734	96	0.14	80	0.9	-317	165	50	11	125	80.10	1.1	0.0405	6.5	0.07	6.5	0.0125	1.1	0.165
C-9	0.57	464	187	0.42	82.7	1	-119	150	75	4	170	77.47	1.3	0.0439	6.1	0.08	6.2	0.0129	1.3	0.205
C-10	0.21	1041	147	0.15	83.9	0.8	96	69	76	5	13	76.38	1.0	0.0479	2.9	0.09	3.1	0.0131	1	0.32
C-11	-0.16	801	146	0.19	86	0.9	144	77	86	5	40	74.46	1.0	0.0489	3.3	0.09	3.4	0.0134	1	0.302
C-12	0.33	755	261	0.36	83.2	0.9	-130	111	75	3	164	77.03	1.1	0.0437	4.5	0.08	4.6	0.013	1.1	0.228
YS414 混合质石榴黑云斜长片麻岩																				
D-1	0.00	1699	27	0.02	74.8	0.7	98	45	87	12	23	85.68	0.9	0.048	1.9	0.08	2.1	0.0117	0.9	0.443
D-2	0.08	3046	121	0.04	76.3	0.7	73	34	63	4	-6	82.97	0.9	0.0475	1.4	0.08	1.7	0.0121	0.9	0.525
D-3	0.03	2391	50	0.02	77.4	0.7	52	41	76	12	-48	82.74	0.9	0.0471	1.7	0.08	1.9	0.0121	0.9	0.469
D-4	-0.45	613	5	0.01	57.1	0.7	408	217	309	300	86	112.49	1.3	0.0549	9.7	0.07	9.8	0.0089	1.3	0.133
D-5	0.13	3506	76	0.02	76.3	0.7	56	38	54	13	-38	82.23	0.9	0.0471	1.6	0.08	1.8	0.0122	0.9	0.489
D-6	0.03	969	41	0.04	221.5	2	777	25	931	46	71	28.61	0.9	0.0651	1.2	0.31	1.5	0.035	0.9	0.605
D-7	-0.10	1167	13	0.01	76.7	0.7	162	49	129	15	53	83.52	1.0	0.0493	2.1	0.08	2.3	0.012	1	0.422
D-8	0.29	1450	11	0.01	72.6	0.7	-40	71	-96	-71	281	88.31	1.0	0.0453	2.9	0.07	3.1	0.0113	1	0.313
D-9	0.47	942	7	0.01	73.3	0.8	-239	130	-180	-134	131	87.49	1.0	0.0418	5.1	0.07	5.3	0.0114	1	0.198
D-10	0.12	3447	16	0.00	42.4	0.4	27	57	-62	149.30	0.9	0.0466	2.4	0.04	2.5	0.04	2.5	0.0067	0.9	0.361
D-11	-0.10	904	10	0.01	73.7	0.8	105	59	135	17	30	86.91	1.0	0.0481	2.5	0.08	2.7	0.0115	1	0.38
D-12	0.02	992	9	0.01	44	0.5	64	197			32	145.85	1.2	0.0473	8.3	0.04	8.4	0.0069	1.2	0.141

注: 实测  $^{204}\text{Pb}$ , 采用 Stacey 模式进行普通铅校正; 阴影突出显示  $U > 2500 \times 10^{-6}$  的测点,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄参照 Butera *et al.* (2001) 进行校正