

# 滇东南发现新元古代岩浆岩：SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据\*

刘玉平<sup>1</sup> 叶霖<sup>1</sup> 李朝阳<sup>2</sup> 宋彪<sup>3</sup> 李铁胜<sup>4</sup> 郭利果<sup>1</sup> 皮道会<sup>1</sup>

LIU YuPing<sup>1</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, LI ChaoYang<sup>2</sup>, SONG Biao<sup>3</sup>, LI TieSheng<sup>4</sup>, GUO LiGuo<sup>1</sup> and PI DaoHui<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3. 中国地质科学院北京离子探针中心, 北京 100037

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Ore Deposit Geochemistry Key Laboratory, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Institute of Guangzhou Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Beijing SHRIMP Center, Chinese Academy of Geology, Beijing 100037, China

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2005-01-31 收稿, 2006-03-30 改回.

Liu YP, Ye L, Li CY, Song B, Li TS, Guo LG and Pi DH. 2006. Discovery of the Neoproterozoic magmatics in southeastern Yunnan: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and lithochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 916-926

**Abstract** The region includes southeastern Yunnan and North Vietnam, which locates among the Nanhua, Yangtze and Indio-China Blocks, is a key target to study the tectonic evolution of South China and Southeastern Asian. There is a deformed-metamorphic dome outcrops in the Laojunshana area, Southeastern Yunnan. It had been divided into the Later Silurian Nanwenhe granite, the Neoproterozoic Xinzhai Formation and the Paleoproterozoic Mengdong Group in the recently 1/50000 regional geological surveys. The SHRIMP zircon U-Pb dating have been done first on the quartz-hornblende-plagiogneiss from the Mengdong Group, and the ages of two magmatic zircon groups are  $761 \pm 12\text{Ma}$  ( $N = 11$ ,  $\text{MSWD} = 0.85$ ) and  $829 \pm 10\text{Ma}$  ( $N = 10$ ,  $\text{MSWD} = 0.36$ ), respectively. Combined with the crystal features, CL images, concordant of U-Th-Pb ages (the D% are 2.6 and 4.8, respectively) and the correlation index (0.64 and 0.19, respectively),  $761 \pm 12\text{Ma}$  should present the crystal age, and  $829 \pm 10\text{Ma}$  should presented the age of an older magmatism. These ages suggested that there should have the Neoproterozoic magmatism in the area, and the Mengdong Group should be a Precambrian metamorphic sedimentary and magmatic complex. Besides these, the inherited zircons with  $\approx 1.83\text{Ga}$  U-Pb dating indicated that there should have the paleo-proterozoic basement rocks in this area. The coexist quartz-plagio-amphibolite have rare-earth element and trace element distribution characteristic of OIB, and the quartz-hornblende-plagiogneiss have similar geochemistry characteristics beside low  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb, Sr, Eu contents and moderate Nb-Ta negative anomaly, which should be attributed to crystal fraction and crust-contaminate. The geochemistry and tectonic setting identification of these samples suggested that their protolith should be basaltic to basaltic-andesitic magmatic series related to mantle-plume. Based on these mention above, the Laojunshan area, Southeastern Yunnan should located in the cross region of the Nanhua Rift and the Kangdian Rift during breaking-up of the Rodinian Super-continent in the Neoproterozoic.

**Key words** Neoproterozoic magmatism, SHRIMP zircon U-Pb dating, Geochemistry, Southeastern Yunnan

**摘要** 滇东南老君山地区出露了一套穹隆状变形-变质岩系, 新近完成的 1:5 万都龙幅、麻栗坡县幅区域地质矿产调查报告, 将其分解为晚志留纪南温河花岗岩、新元古界新寨岩组和古元古界猛洞岩群。首次对猛洞岩群的石英角闪斜长片麻岩

\* 国家自然科学基金项目(40302026)资助。

第一作者简介: 刘玉平, 男, 1971 年生, 博士, 副研究员, 矿床学、地球化学专业, E-mail: yuping71liu@sohu.com

进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,结合阴极发光图像分析,获得两组岩浆锆石的结晶年龄分别为  $761 \pm 12\text{Ma}$  和  $829 \pm 10\text{Ma}$ , 指示滇东南老君山地区存在新元古代岩浆活动,同时从同位素年代学上,表明猛洞岩群是一套前寒武纪的变质沉积-岩浆杂岩。此外,还获得一些年龄为  $\approx 1.83\text{Ga}$  的残留锆石,表明该区存在古元古代的结晶基底。石英角闪斜长片麻岩及共存的斜长角闪岩,它们的原岩具有大陆裂谷背景下玄武质-玄武安山质岩浆系列的地球化学特征,可能与新元古代 Rodinia 超大陆聚合-裂解过程中的岩浆活动有关,本区在新元古代可能位于南华裂谷与康滇裂谷的交汇部位。

**关键词** 新元古代岩浆活动; SHRIMP 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 滇东南

**中图分类号** P588.1; P597.3

## 1 引言

新元古代 Rodinia 超大陆 (Moores, 1991; Hoffman, 1991; Dalziel, 1991), 是近年来颇受关注的重大科学问题之一 (Zheng, 2003)。随着华南新元古代沉积作用 (Wang and Li, 2003; 郝杰等, 2004)、古地磁学 (Evans *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2004b)、尤其是岩浆岩年代学及地球化学取得的新进展, 愈发凸显出华南在 Rodinia 古陆重建中的重要地位 (Zheng, 2004)。大量新近获得的年龄数据显示, 华南新元古代岩浆活动主要集中在  $740 \sim 850\text{Ma}$  (Li *et al.*, 2003a, and references in this paper; Ling, *et al.*, 2003; Wang, *et al.*, 2003; 郑永飞等, 2004; Li, *et al.*, 2004a; 朱维光等, 2004; 尹崇玉等, 2003)。尽管对其成因尚存争议 (Zhou, *et al.*, 2002; Wang, *et al.*, 2004), 但多数学者认为与(超级)地幔柱背景下的裂谷环境有关。

华南新元古代岩浆岩广泛分布于扬子地块周缘及北部的黄陵地区, 但在扬子地块南缘—西南缘的桂西到滇南之间的大片地区, 目前尚未见有关新元古代岩浆活动的报道。上述“空白”区域核心地带的滇东南及相邻的越南北部, 即黄汲清先生 (1954) 所称的“越北古陆”, 位于华南地块、扬子地块和印支地块等几大构造单元之间, 是探讨华南大地构造格局及其演化历史的关键地区之一 (Zhong, *et al.*, 1998; 董云鹏等, 1999, 2002; 吴浩若, 2003)。在滇东南老君山地区 (图 1A), 出露了一套穹隆状变形-变质岩系, 其上与变质程度极低的下古生界地层以构造接触, 成为探索该区是否存在前寒武纪岩石的重要“窗口”。由于有关的研究十分薄弱 (张世涛等, 1998; 吕伟等, 2002), 特别是年代学研究几近空白, 对其时代归属长期存在较大争议。云南省冶金厅地质勘探公司 310 队 (1962) 将其命名为二腾岩组, 认为其属于前震旦纪<sup>①</sup>; 1:20 万马关幅区域地质调查报告 (云南省地质局第二地质大队, 1976) 将其时代推断为早寒武世—中寒武世<sup>②</sup>; 薛玺会等 (1989) 将其归属于下寒武统一震旦系 (张世涛等, 1998); 在印支三国 1:100 万地质图中, 其南延入越南北部的相应部分划归上元古界—下寒武统 (Phan, 1991)。近期完成的 1:5 万都龙幅、麻栗坡县幅区域地质调查报告, 将其解体为晚志留纪南温河序列花岗岩、新元古界新寨岩组和古元古界猛洞岩群<sup>③</sup>。

本文采用 SHRIMP 方法, 首次对猛洞岩群中的石英角闪

斜长片麻岩进行了较系统的锆石 U-Pb 定年, 获得其原岩形成的同位素年代学证据, 并开展了初步的岩石地球化学研究, 进而探讨原岩的成因和大地构造意义。

## 2 地质背景和样品描述

滇东南老君山穹隆状变形-变质岩系, 出露于 NW 向文山-麻栗坡断裂和 NNE 向马关-莲花塘断裂之间, 云南省麻栗坡县、马关县与越南接壤的地带。根据岩石变形-变质特征, 发育在核部岩系中的剥离断层系和盖层岩系中的叠瓦状正断层系等构造形迹及其组合特征, 李东旭等 (1995) 首先将其命名为“老君山变质核杂岩”。1:5 万都龙幅、麻栗坡县幅区域地质调查报告, 将其命名为“南温河变质核杂岩” (图 1)。其南延入越南北部的部分, 称为“Song Chay dome” (Roger *et al.*, 2000) 或“Song Chay massif” (Maluski *et al.*, 2001)。鉴于两者实际上是统一的整体, Liu *et al.* (2003) 统称其为“Laojunshan-Song Chay metamorphic core complex” (图 1B 中的 LS MCC)。

猛洞岩群出露于老君山变质核杂岩核部, 包括南秧田岩组和酒西岩组。南秧田岩组为二云片岩、二云石英片岩、石英片岩夹少量斜长角闪岩、斜长片麻岩及斜长变粒岩; 酒西岩组以黑云变粒岩、条带状变粒岩与石英岩为主, 次为浅粒岩、斜长角闪岩、斜长片麻岩及少量钙硅酸盐岩。

本文样品采自位于老君山变质核杂岩的中心地带的猛洞乡老鸪山南 ( $E104^{\circ}41.5', N22^{\circ}53.6'$ )。在该地带外围出露大面积的南温河片麻状花岗岩, 南秧田岩组呈孤岛状残留体产出 (图 1A), 与南温河片麻状花岗岩具有一致的片麻理产状, 反映两者经历了统一的后期变形-变质作用。本文研究的石英角闪斜长片麻岩呈浅灰色透镜状—似层状产出, 中—粗粒含斑结构、片麻状构造, 矿物定向排列明显。显微镜下观察, 主要矿物组合为斜长石 (为中长石—拉长石, 含量约 60%) + 角闪石 (为富铝钙质角闪石系列的浅闪石-韭闪

① 云南省冶金厅地质勘探公司 310 队, 1962. 麻栗坡南秧田白钨矿床普查报告。

② 云南省地质局第二区域地质测量大队, 1976. 中华人民共和国区域地质调查报告 (1:20 万) 马关幅。

③ 云南省地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队, 1999. 中华人民共和国地质图说明书 (1:5 万) 老君山幅、麻栗坡县幅。

石,含量约25%) + 石英(含量约20%),副矿物组合为锆石、金红石、榍石、夕线石、褐帘石、铁钛氧化物、磷灰石等。斜长角闪岩呈灰黑色透镜状产出,中—细粒结构、片麻状构造,矿物定向排列明显。显微镜下观察,主要矿物组合为角闪石(为富铝钙质角闪石系列的浅闪石-普通角闪石,含量约65%) + 斜长石(为中长石-拉长石,含量约20%) + 石英(含量约5%) + 黑云母(含量约5%),副矿物组合为榍石(含量可高达2%)、金红石、褐帘石、铁钛氧化物、及少量的磷灰石、锆石等。在石英角闪斜长片麻岩和石英斜长角闪岩中,均可见粒状半自形榍石包裹金红石和/或钛铁矿构成的包含结构,板片状他形—半自形榍石与长柱状自形角闪石构成的

共结结构,以及石英波状消光和拉长拔丝等变形结构,表明岩石经历了降温减压变质-变形过程,从中—下地壳经韧性剪切而隆升至上地壳。

由于斜长角闪岩的锆石含量低、采集样品量较少,所以未能分选足够的锆石。而从约3kg的DN052号石英角闪斜长片麻岩样品中,通过常规选矿方法分选出较多的锆石。在双目显微镜下,这些锆石表现出两种不同的结晶学特征:大多数锆石呈浅棕褐色短柱状,透明度高、晶形较完整、表面较光滑;少数锆石呈深棕褐色粒状或短柱状,透明度低、晶形不完整、表面发育熔蚀凹坑。

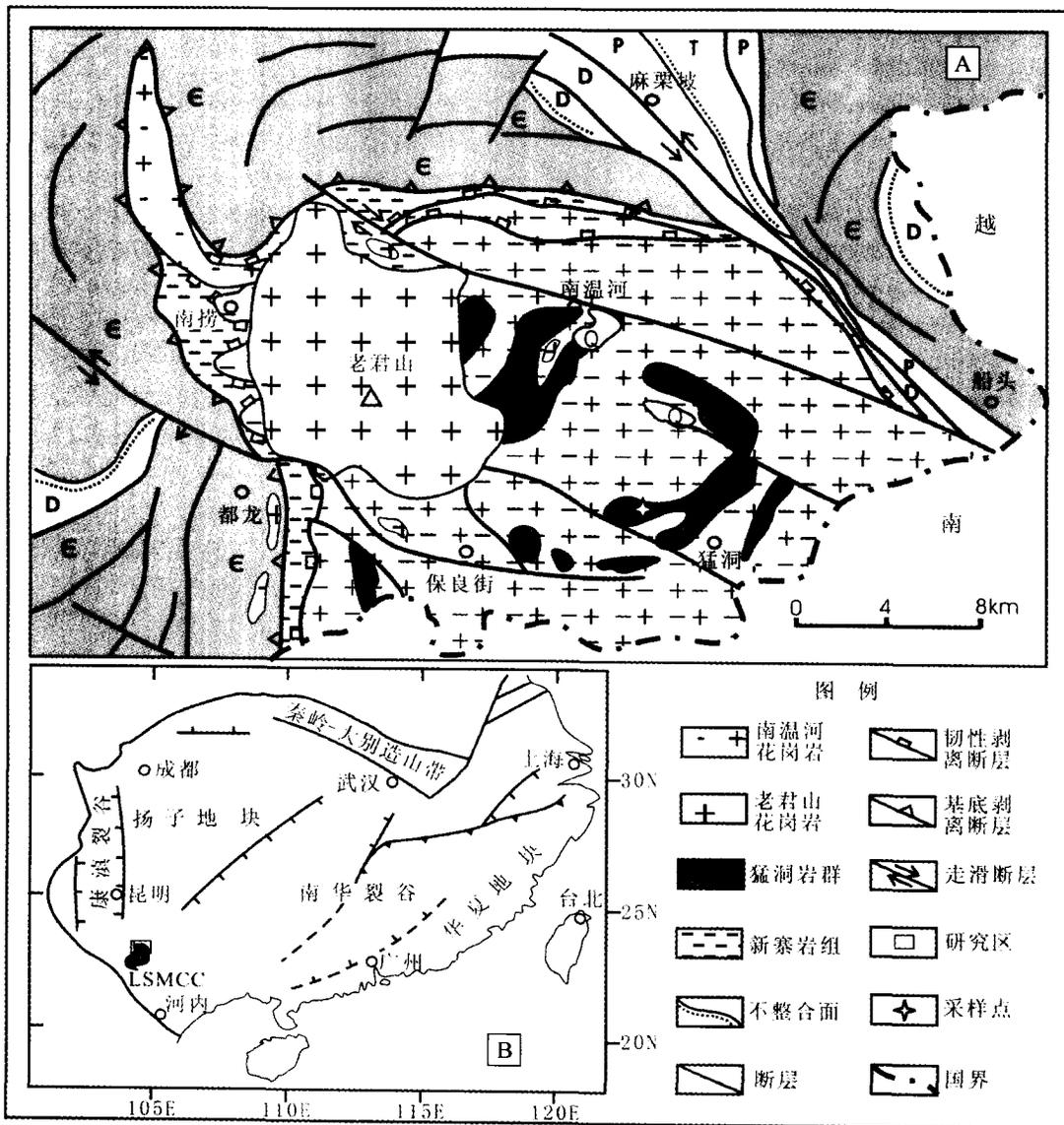


图1 老君山地区区域地质略图

(A 据1:20万和1:5万地质图<sup>②,③</sup>简化编绘; B 示意研究区在华南大地构造中位置,底图据 Li et al. (2003) 和 Wang et al. (2003))

Fig. 1 Regional geological sketch of the Laojunshan area

### 3 分析方法

锆石的处理、光学显微镜照相和同位素测试在中国地质科学院北京离子探针中心完成,阴极发光(CL)图像分析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。将样品中两类锆石和标准锆石 TEMORA(年龄为 417Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光、进行反射光和透射光显微镜照相,进行阴极发光(CL)图像分析,以检查锆石的内部结构。同位素分析所用仪器为 SHRIMP II,测试时所用的标准锆石为 SL13 和 TEMORA,前者用于标定 U、Th 和 Pb 的含量,后者用于校正年龄(推荐值为 417Ma)。束斑直径约为 25 $\mu$ m。测定结果用实测的<sup>206</sup>Pb 进行普通 Pb 的校正,数据处理采用 Ludwig 编写的 SQUAD 1.0(2001)和 Isoplot 程序(1999)。

DN052 和 DN4075 号样品的主元素、微量元素分别由中国科学院地质与地球物理所 XRF 实验室和 ICP-MS 实验室完成;DL1278 和 DL1279 号样品的主元素、微量元素分别由中国科学院地球化学研究所化学分析实验室和 ICP-MS 实验室完成。根据 GSR-3、GSR-9 等标样的测试结果,主元素的精度大多数优于 2%,微量元素的精度大多数优于 5%。

### 4 分析结果

#### 4.1 锆石 CL 分析和 SHRIMP 法 U-Pb 测年

CL 分析显示出大多数锆石颗粒内部具有典型的振荡环带结构,而少量锆石具有冷杉叶状、斑块状、面状分带等结构,结合结晶形态可以分为岩浆锆石和继承锆石两类。同时,所有的锆石颗粒均发育有厚度不大的增生边或蚝晶边(图 2)。上述特征表明样品中锆石颗粒以岩浆锆石为主,并遭受一定程度的后期变质作用改造的特征(Vavra *et al.*,

1999; Wu *et al.*, 2004)。

在锆石光学显微镜照相和 CL 图像分析的基础上,选择合适的位置,对 30 粒锆石进行了 32 个点分析(包括 2 个重复检验点)。SHRIMP 分析结果(表 1 和图 3),显示出大多数位于 U-Pb 谐和线上及其附近。岩浆锆石多数为半自形—自形短柱状晶体,并以 CL 图像显示出明显的振荡环带为特征。21 个岩浆锆石颗粒的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄变化范围为 726 $\pm$ 20~852 $\pm$ 24Ma,年龄频率统计显示出 $\approx$ 800Ma 的“谷”,据此进一步分为两组:第一组锆石( $N=11$ )的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U、<sup>208</sup>Pb/<sup>232</sup>Th 和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>Pb 表面年龄加权平均值,分别为 761 $\pm$ 12Ma(MSWD=0.85),758 $\pm$ 14Ma(MSWD=0.42)和 781 $\pm$ 271Ma(MSWD=0.69),偏离度 D% 为 2.6(表示<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄与<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>Pb 年龄的偏离程度);第二组锆石( $N=10$ )分别为 829 $\pm$ 10Ma(MSWD=0.36),823 $\pm$ 22Ma(MSWD=1.21)和 869 $\pm$ 38Ma(MSWD=2.05),偏离度 D% 为 4.8。两组锆石的 U、Th 含量( $100 \times 10^{-6}$ ~ $500 \times 10^{-6}$ )和 Th/U 比值(0.30~1.65,多数大于 0.40)均比较接近,但第一组 U-Th 含量表现出一定的正相关性( $R^2=0.64$ ),而第二组 U-Th 含量之间相关性不明显( $R^2=0.19$ )。根据 U-Th-Pb 年龄的谐和度、U-Th 含量的相关性,我们认为,761 $\pm$ 12Ma 代表了岩浆结晶年龄,而 829 $\pm$ 10Ma 的年龄值可能反映了岩浆源区存在另一期早的岩浆活动所形成的地壳组分。

9 粒残留锆石构成一条上交点 1952 $\pm$ 128Ma,下交点 839 $\pm$ 85Ma 的不一致线(MSWD=6.10)。下交点年龄与上述岩浆锆石的年龄在误差范围内一致;位于谐和线上交点附近的 3 粒锆石获得<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>Pb 年龄加权平均值为 1831 $\pm$ 15Ma,与上述不一致线上交点年龄在误差范围内一致,结合部分残留锆石的 CL 图像仍可分辨出振荡环带,并具有趋近于谐和线的 U-Pb 同位素组成等特点,我们认为新元古代岩浆侵入过程中捕获了古元古代末—中元古代初形成的地壳岩石。

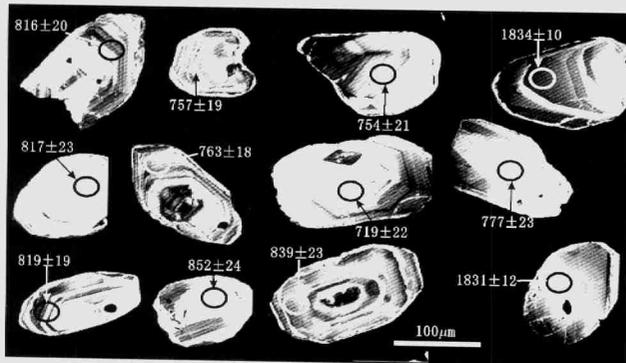


图 2 石英角闪斜长片麻岩代表性锆石颗粒的阴极发光图像及测点年龄(Ma)

Fig. 2 CL images of selected zircons from the quartz-hornblend-plagioclase gneiss

表1 DN052号石英角闪斜长片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果  
Table 1 SHRIMP Zircon U-Pb dating of DN052 quartz-hornblende-plagiogneiss

点号	锆石类型 <sup>a</sup>	206Pbc (%)	U (×10 <sup>-6</sup> )	Th (×10 <sup>-6</sup> )	232Th/ <sup>238</sup> U	206Pb* (×10 <sup>-6</sup> )	同位素比值(1σ%)			表面年龄(1σ)/Ma		
							207Pb/ <sup>206</sup> Pb	207Pb/ <sup>235</sup> Pb	206Pb/ <sup>238</sup> U	206Pb/ <sup>238</sup> U	207Pb/ <sup>206</sup> Pb	206Pb/ <sup>232</sup> Th
G11	A	0.01	413	117	0.29	79.9	0.10811±0.69	3.36±3.2	0.2254±3.1	1,310±37	1,768±13	1,210±42
G27	A	0.82	94	77	0.84	25.5	0.1104±3.8	4.75±4.8	0.3116±3.0	1,749±45	1,807±69	1,690±86
G28	A	0.34	517	118	0.24	65.2	0.0692±8.0	1.396±1.9	0.1464±0.97	881±8	880±43	858±38
G29	A	1.55	329	209	0.66	38.3	0.0645±5.8	1.186±5.9	0.1333±1.1	807±10	985±120	888±28
G31	A	0.06	483	321	0.69	127	0.11214±0.56	4.72±3.0	0.3055±2.9	1,718±44	1,834±10	1,689±51
G33	A	0.05	324	207	0.66	87.5	0.11195±0.67	4.85±3.0	0.3143±3.0	1,762±45	1,831±12	1,769±54
G35	A	0.12	324	103	0.33	37.0	0.0681±2.5	1.246±2.7	0.1328±0.95	804±8	800±73	758±36
G40.1	A	0.08	800	125	0.16	98.7	0.0675±1.2	1.334±2.7	0.1434±2.4	864±20	852±25	861±27
G40.4	A	1.54	161	146	0.93	21.1	0.0705±8.0	1.460±9.3	0.1500±4.8	901±40	944±160	909±63
G1	B	--	437	405	0.96	51.0	0.0630±3.3	1.172±4.2	0.1350±2.6	816±20	707±70	775±26
G10	B	0.00	268	422	1.63	31.9	0.0702±2.1	1.339±3.6	0.1384±3.0	835±23	933±43	801±25
G17	B	0.06	184	183	1.03	21.7	0.0689±1.7	1.308±3.5	0.1376±3.0	831±24	897±35	850±30
G20	B	--	403	257	0.66	46.9	0.06675±1.2	1.248±3.2	0.1357±3.0	820±23	830±26	818±26
G23	B	0.21	163	76	0.48	19.0	0.0676±2.9	1.264±4.2	0.1356±3.1	820±24	857±60	861±43
G25	B	--	379	378	1.03	45.9	0.06943±1.1	1.349±3.2	0.1409±3.0	850±24	911±23	840±26
G3	B	0.07	254	161	0.65	30.9	0.06639±1.4	1.294±3.3	0.1414±3.0	852±24	819±30	843±27
G4	B	1.08	458	299	0.67	53.6	0.0705±2.8	1.316±3.8	0.1354±2.5	819±19	942±58	859±35
G8	B	0.03	505	168	0.34	60.4	0.06839±1.1	1.311±3.2	0.1391±3.0	839±23	880±24	853±28
G9 <sup>b</sup>	B	0.98	263	202	0.80	29.7	0.0681±3.3	1.231±4.2	0.1311±2.6	794±20	871±68	837±30
G9-1 <sup>b</sup>	B	0.12	232	178	0.79	27.0	0.0677±1.7	1.262±3.5	0.1352±3.0	817±23	859±36	787±26
G13	C	--	957	406	0.44	101	0.0619±2.9	1.043±3.8	0.1223±2.5	744±17	670±63	662±29
G18	C	0.00	233	332	1.47	24.8	0.0658±1.6	1.127±3.4	0.1241±3.0	754±21	801±34	741±25
G24	C	2.58	169	124	0.76	17.6	0.0683±10	1.120±11	0.1193±3.0	726±20	879±210	766±62
G26	C	0.03	692	429	0.64	76.0	0.0642±2.1	1.129±3.3	0.1276±2.5	774±18	748±45	757±27
G32	C	0.12	144	111	0.80	15.8	0.0669±2.0	1.181±3.7	0.1280±3.1	777±23	834±42	746±26
G34 <sup>b</sup>	C	0.33	111	79	0.73	11.3	0.0628±3.7	1.021±5.0	0.1180±3.3	719±22	701±79	723±31
G34-1 <sup>b</sup>	C	0.06	436	217	0.51	46.1	0.06522±1.2	1.105±3.2	0.1229±3.0	747±21	781±26	739±34
G40.2	C	0.57	385	159	0.43	42.9	0.0635±5.3	1.130±5.9	0.1292±2.5	783±19	724±110	814±40
G40.3	C	0.14	887	397	0.46	98.1	0.0641±3.9	1.136±4.6	0.1285±2.4	779±18	745±83	767±26
G40.5	C	0.92	186	105	0.58	20.0	0.0649±4.5	1.115±5.2	0.1246±2.7	757±19	772±94	775±37
G40.6	C	0.23	340	197	0.60	38.7	0.0643±3.6	1.168±7.7	0.1318±6.9	798±52	750±76	765±62
G6	C	0.62	508	426	0.87	55.0	0.0663±2.6	1.149±3.6	0.1257±2.5	763±18	816±54	773±35

a. 锆石类型: A-继承锆石; B-岩浆锆石; C-岩浆锆石 II。

b. 同一测点的平行分析结果。

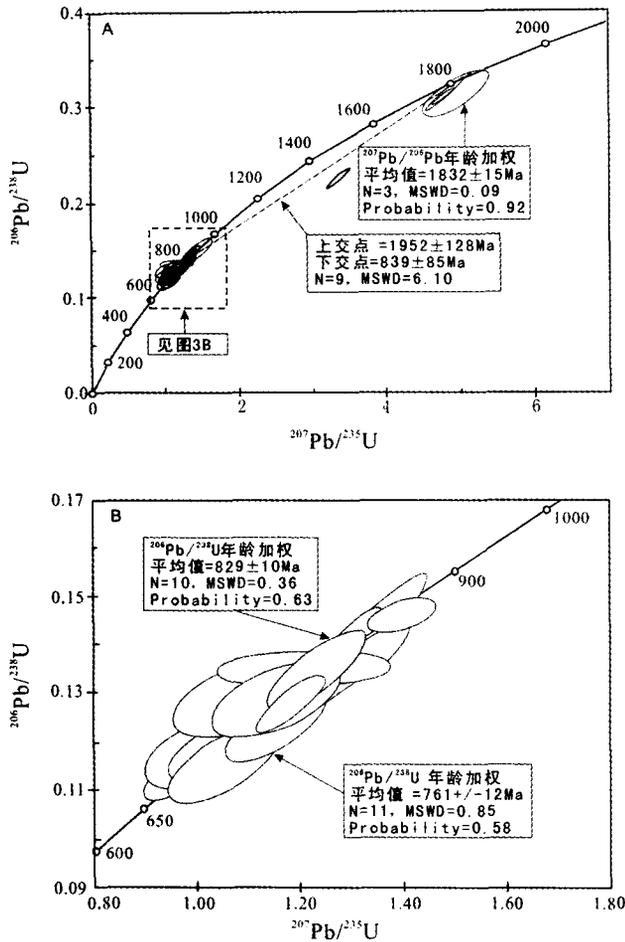


图3 锆石分析数据的 U-Pb 谱和图解

Fig. 3 The U-Pb concord figures of the zircons analysis data

4.2 岩石化学成分分析

石英角闪斜长片麻岩和石英斜长角闪岩的化学成分分析数据见表2。从表2中可以看出,石英角闪斜长片麻岩为中基性(SiO<sub>2</sub> = 53.25% ~ 55.28%)、低 TiO<sub>2</sub> (0.84% ~ 1.24%)、富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (22.87% ~ 23.38%), 偏碱性贫钾(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O = 4.82% ~ 6.19%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 19.0 ~ 25.3)、低 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.12% ~ 0.15%); 石英斜长角闪岩为基性(SiO<sub>2</sub> = 49.69% ~ 50.30%)、高 TiO<sub>2</sub> (3.40% ~ 3.47%)、亚碱性低钾(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O = 3.18% ~ 3.64%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 2.2 ~ 4.7)、低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.52% ~ 13.28%)、高 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.70% ~ 0.80%)。两类岩石的 Zr (321 × 10<sup>-6</sup> ~ 578 × 10<sup>-6</sup>)、Hf (12.9 × 10<sup>-6</sup> ~ 19.1 × 10<sup>-6</sup>)、Nb (24.5 × 10<sup>-6</sup> ~ 45.5 × 10<sup>-6</sup>)、Ta (2.37 × 10<sup>-6</sup> ~ 3.80 × 10<sup>-6</sup>) 含量和 Nb/Y (0.54 ~ 0.99)、Zr/Sm (30.9 ~ 48.2)、Zr/Y (6.9 ~ 13.5) 比值均较高,而 Zr/Nb (8.7 ~ 23.6) 和 Hf/Th (0.16 ~ 3.20) 比值较低,类似于板内玄武岩及其分异产物的特征(Condie, 1989; Wilson, 1989)。

表2 猛犸岩群变质岩浆岩的化学成分(主成分 wt%, 微量元素 × 10<sup>-6</sup>)<sup>\*</sup>

Table 2 Chemical composition of meta-magmatites from Mengdong Group (major wt%, trace × 10<sup>-6</sup>)

岩性 样号	石英角闪斜长片麻岩		斜长角闪岩	
	DN052	DN4075	DL1278	DL1279
SiO <sub>2</sub>	53.25	55.28	50.30	49.69
TiO <sub>2</sub>	1.24	0.84	3.40	3.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.87	23.38	11.52	13.28
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.58	3.76	15.65	13.79
MnO	0.05	0.05	0.28	0.28
MgO	1.95	1.72	4.90	5.46
CaO	6.98	7.15	8.97	8.73
Na <sub>2</sub> O	5.88	4.64	2.50	2.62
K <sub>2</sub> O	0.31	0.18	1.14	0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.12	0.80	0.70
LOI	3.12	2.77	1.10	1.17
总量	99.38	99.89	100.55	99.75
Cr	67.5	24.2	53.7	49.4
Co	5.35	5.42	36.2	40.0
Ni	23.4	11.2	44.5	49.5
Cu	19.4	9.20	291	227
Zn	110	43.7	183	187
Ga	26.2	23.7	27.9	27.0
Rb	5.67	2.25	51.8	25.3
Sr	600	571	375	388
Y	42.8	57.7	47.6	42.7
Zr	578	400.	398	321
Nb	24.5	31.0	45.5	42.3
Mo	1.66	0.577	1.22	1.36
Sn	8.18	10.3	60.3	41.7
Cs	0.710	0.155	24.9	8.59
Ba	43.9	63.2	472	255
La	59.9	51.3	48.1	44.4
Ce	143	118	105	96.4
Pr	16.2	14.2	12.4	11.9
Nd	61.3	51.2	53.5	49.8
Sm	12.0	11.37	11.7	10.4
Eu	1.79	2.01	3.09	3.03
Gd	10.1	12.4	10.7	9.57
Tb	1.54	2.00	1.58	1.44
Dy	8.27	12.8	9.31	8.04
Ho	1.66	2.63	1.71	1.52
Er	4.46	7.27	4.58	3.95
Tm	0.681	1.06	0.55	0.50
Yb	4.95	6.29	3.86	3.15
Lu	0.723	0.972	0.52	0.42
Hf	14.96	12.9	13.1	19.1
Ta	2.39	3.80	2.52	2.37
Pb	197	39.5	7.46	14.5
Bi	1.23	1.08	0.40	0.50
Th	33.5	81.4	6.53	5.97
U	4.11	13.5	1.65	1.49

## 5 讨论

### 5.1 原岩的成因

考虑到岩石经历了比较复杂的变质-变形过程,低场强元素(Rb、Sr、Ba、K、Na等)可能发生了一定程度的迁移。因此,选用在变质作用中活动性较小的稀土元素和高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti、Y等)来探讨原岩的成因。

在  $Zr/(TiO_2 \times 10^4)$ - $SiO_2$  图解中(图略),石英斜长角闪岩投影于碱性-亚碱性玄武岩区,石英角闪斜长片麻岩投影于响岩区;在  $Nb/Y-Zr/(TiO_2 \times 10^4)$  图解中(图略),石英斜长角闪岩投影于碱性玄武岩区,石英角闪斜长片麻岩投影于流纹英安岩/英安岩区。由此推测,前者的原岩为亚碱性-碱性玄武质岩石,后者的原岩为碱性-亚碱性玄武安山质岩石。

在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中,石英角闪斜长片麻岩和石英斜长角闪岩总体表现出相似的右倾特征(图4),并与洋岛玄武岩(OIB)具有类似的配分模式。其中,石英角闪斜长片麻岩具有中等的Eu异常,反映原岩可能经历了斜长石的分离结晶过程。岩石的微量元素蜘蛛图解(图5),石英斜长角闪岩具有与OIB一致的MORB标准化模式,反映它们具有相似的成因。石英角闪斜长片麻岩显示出LILE(Rb、Sr、Ba、K)的亏损和Th的富集,这可能与后期的变质和蚀变作用有关;而从Ta→Yb,总体与石英斜长角闪岩及OIB接近,其中Ti、P的强负异常和Nb、Ta的弱负异常,反映了原岩可能为原始岩浆经历了钛铁矿和磷灰石等分离结晶作用,并发生了一定程度的地壳混染的产物。

在  $FeO^T$ - $MgO$ - $Al_2O_3$  图解中(Pearce *et al.*, 1977; 图略),石英角闪斜长片麻岩和石英斜长角闪岩,分别投影于大陆区和扩张中心岛屿区;在  $TiO_2$ - $10 \times MnO$ - $10 \times P_2O_5$  图解中(Mullen, 1983),均投影于洋岛碱性玄武岩区(图6);在  $2 \times Nb-Zr/4-Y$  图解(Meschede, 1986; 图7)、

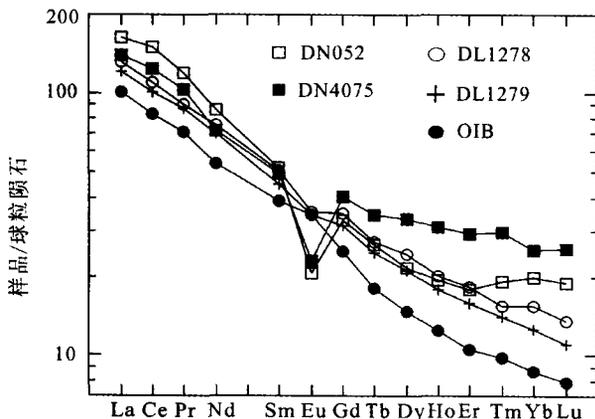


图4 球粒陨石标准化REE配分图解(图例下同)  
Fig.4 Chondrite-normalized REE spider diagram

$Zr-Zr/Y$ 图解(Pearce, 1982; 图略)和  $TiO_2-Zr$  图解(Pearce *et al.*, 1977; 图略)中,均显示出板内玄武岩的特点;在汪云亮等(2001)的  $Ta/Hf-Th/Hf$  及  $Nb/Zr-Th/Zr$  构造环境判别图解中(图略),分别投影在大陆拉张带及初始裂谷玄武岩区、陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区。综合岩石学和地球化学特征,我们认为石英斜长角闪岩和石英角闪斜长片麻岩的原岩,可能属于大陆裂谷环境下与地幔柱有关的玄武(玄武安山)质的岩浆系列。前者的原岩可能为原始岩浆结晶形成的玄武质岩石,而后者的原岩可能为前者经过结晶分异的残余岩浆、遭受一定程度地壳混染的玄武安山质岩石。

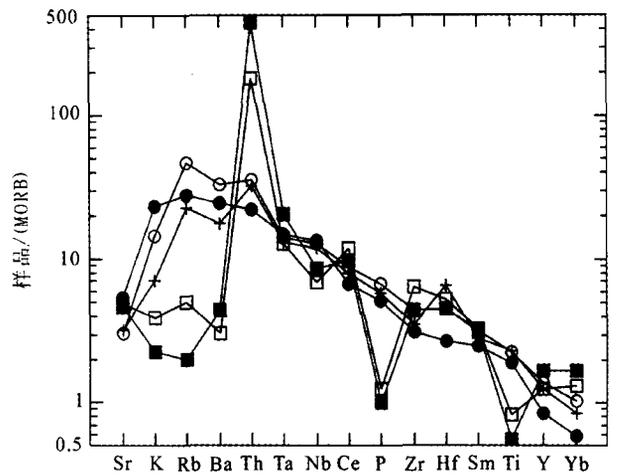


图5 MORB标准化微量元素蛛网图解  
Fig.5 MORB-normalized trace elements spider diagram

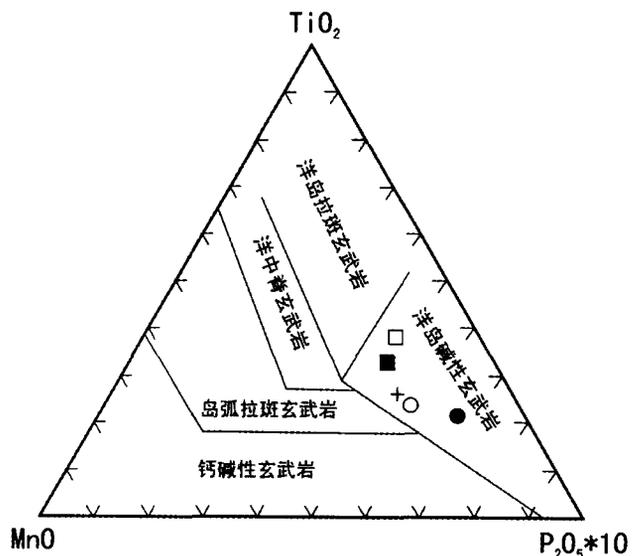
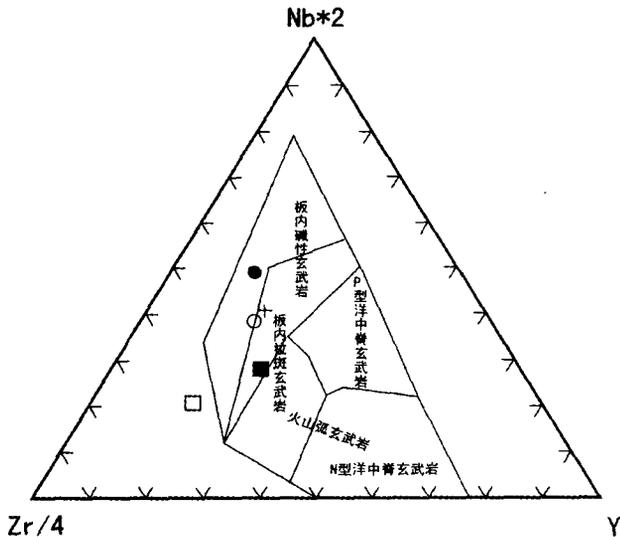


图6  $TiO_2$ - $10 \times MnO$ - $10 \times P_2O_5$ 构造环境判别图解  
Fig.6  $TiO_2$ - $10 \times MnO$ - $10 \times P_2O_5$  tectonic setting discrimination diagram

图7  $2 \times \text{Nb-Zr/4-Y}$  构造环境判别图解Fig. 7  $2 \times \text{Nb-Zr/4-Y}$  tectonic setting discrimination diagram

## 5.2 不同锆石年龄的涵义

锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年结果表明本文研究的石英角闪斜长片麻岩,具有  $761 \pm 12\text{Ma}$ 、 $829 \pm 10\text{Ma}$  和  $1831 \pm 15\text{Ma}$  三组锆石年龄。根据 U-Th-Pb 年龄的谐和度、U-Th 含量的相关性,我们认为,  $761 \pm 13\text{Ma}$  代表了原岩岩浆锆石的结晶年龄,表明猛洞岩群可能为一套发生了强烈构造变形的古元古代—新元古代沉积-火山杂岩,而不是 1:5 万区域地质调查中认为的归属于早元古代。同时,  $829 \pm 10\text{Ma}$  岩浆锆石的出现,反映了岩浆源区的地壳组分中可能存在较早的一期岩浆活动。Lan *et al.* (2001) 在越南北部的 Song Hong 杂岩中,也发现了新元古代锆石 ( $838 \pm 45\text{Ma}$ )。这些年龄数据表明,老君山地区及其所在的越北古陆可能存在两期新元古代的岩浆活动。郑永飞(2003)根据马国干等(1989)的分析数据,采用全 Pb/U 等时线获得湖北宜昌莲沱组凝灰岩夹层  $766 \pm 18\text{Ma}$  的岩浆锆石年龄和  $802 \pm 7\text{Ma}$  的继承锆石年龄,进而提出在扬子板块北缘出现过短周期的局部地壳物质再循环,表现为新生火成岩沿裂谷构造带的重融和再侵位。本文研究的石英角闪斜长片麻岩的原岩,可能也具有类似的形成机制。

$1831 \pm 15\text{Ma}$  可以代表新元古代岩浆侵位过程中捕获的古元古代末—中元古代初地壳岩石的结晶年龄,显示滇东南地区存在早元古代的结晶基底。在越南北部的 Song Hong 杂岩和 Cavinh 杂岩中,报道过  $2.90 \sim 2.36\text{Ga}$  和  $1.96\text{Ga}$  锆石年龄(Lan, 2001; Nam, 2003),进一步表明华南地块西南段存在古元古代—中太古代的结晶基底。

## 5.3 大地构造意义

目前,有关滇东南的研究主要集中于古生代、特别是晚

古生代以来的时段内,在大地构造、岩石学、沉积学等方面取得了诸多重要进展(Zhong, *et al.*, 1998; 董云鹏等, 1999, 2002; 吴根耀等, 2000, 2001; 张旗等, 2001; 吴浩若, 2000, 2003; 秦建华等, 1996; 梅冥相等, 2003; 吕洪波等, 2003), 深化了对华南大地构造格局及其演化规律的认识。我们首次利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, 获得滇东南老君山地区猛洞岩群之石英角闪斜长片麻岩的原岩岩浆锆石年龄为  $761 \pm 12\text{Ma}$ , 并获得残留锆石年龄为  $1831 \pm 15\text{Ma}$ , 从同位素年代学方面证实本区存在前寒武纪岩石, 是一个具有元古代结晶基底的陆块, 为进一步揭示华南大地构造格局及其演化规律提供了基础资料。

华南新元古代酸性—基性岩浆岩在时空上与大陆裂谷非常密切, 而没有同时代典型的岛弧火山岩和弧前沉积或构造, 所以不支持火山弧模式(Zhou *et al.*, 2002)。同时, 证据表明华南在新元古代曾发生显著的地壳抬升和去顶(Li *et al.*, 1999), 这与板片折沉作用及造山后“坍塌”(Wang *et al.*, 2004)在构造上的表现是截然不同的。川西下震旦统苏雄组和汉南下震旦统铁船山组双峰式火山岩中的碱性玄武岩, 具有与 OIB 和 CFB 非常相似的地球化学和同位素组成特征(李献华等, 2002; 凌文黎等, 2002), 表明扬子块体西缘和北缘约  $800\text{Ma}$  前的裂谷作用和火山活动是地幔柱活动引发的结果, 支持华南新元古代(超级)地幔柱模式(Li *et al.*, 1999, 2001, 2003)。

本文研究的石英角闪斜长片麻岩和石英斜长角闪岩的原岩, 形成于新元古代, 并具有大陆裂谷玄武岩及其分异产物的地球化学特征, 进一步支持了约  $740 \sim 825\text{Ma}$  华南(超级)地幔柱模式。考虑到晚古生代—早中生代南盘江—右江盆地的发育, 滇东南老君山地区及其所在的越北地块, 在新元古代时可能位于南华裂谷—岩浆岩带之西延与康滇裂谷—岩浆岩带之南延的交汇部位, 从而填补了桂西到滇南之间尚未有新元古代岩浆岩报道的空白, 使围绕扬子地块周缘的两大裂谷—岩浆岩带贯通相连。康滇裂谷由于奠基于地壳成熟度较高的“康滇古陆”之上, 经早震旦世的陆相火山—沉积和晚震旦世早期的冰盖沉积充填, 至晚震旦世晚期活动性减弱而夭折。而南华裂谷奠基于扬子地块与华夏地块之间地壳成熟度较低的 Grenville 期造山带之上, 新元古代之后形成一个大致沿浙、赣到桂、越(南)呈剪刀状张开的海盆(任纪舜等, 1990)。除钦州—防城一带外, 该海盆在华南地域内于早古生代中—晚期由于加里东运动而闭合(吴浩若, 2000, 2003)。

我们进一步推测与滇东南老君山地区相邻的瑶山群、哀牢山群等前寒武纪地块中, 有望找到新元古代的岩浆岩, 并通过年代学、古地磁学和地球化学研究, 进而构筑一幅更为清晰的 Rodinia 古陆聚散过程及其后的华南大地构造格局演化图。

## 6 结论

根据上述讨论,初步小结如下:

(1) 石英角闪斜长片麻岩的原岩结晶年龄为  $761 \pm 12\text{Ma}$ , 显示滇东南地区存在新元古代岩浆岩。同时,  $829 \pm 10\text{Ma}$  锆石的出现, 反映可能存在短周期的局部地壳物质再循环。年龄  $\approx 1.83\text{Ga}$  残留锆石的发现, 表明本区具有早元古代的结晶基底。

(2) 石英斜长角闪岩和石英角闪斜长片麻岩的原岩, 可能属于大陆裂谷环境下与地幔柱有关的玄武质—玄武安山质的岩浆系列。石英斜长角闪岩的原岩可能为玄武质岩石, 而石英角闪斜长片麻岩的原岩可能为前者结晶分异、并遭受一定程度地壳混染的产物。

(3) 滇东南老君山地区及其所在的越北地块新元古代岩浆锆石的发现, 表明其可能位于南华裂谷西延与康滇裂谷南延的交汇部位, 从而将扬子地块周缘的华南新元古代裂谷-岩岩带联成一体, 本文研究支持 Rodinia 大陆裂解与  $740 \sim 850\text{Ma}$  地幔柱有关的观点。

**致谢** 本文完成期间, 与西澳大学李正祥博士、中国地质调查局天津地质矿产调查中心李惠民研究员进行了深入广泛的交流, 使笔者受益匪浅。SHRIMP 分析得到国土资源部北京离子探针中心刘敦一先生、石玉若博士、陶华工程师、杨之清工程师、张玉海高级工程师、万渝生研究员等的指教和帮助, 岩石化学分析得到了中国科学院地质与地球物理研究所李禾高级工程师、闫欣高级工程师和中国科学院地球化学研究所李荪蓉高级工程师和冯家毅工程师的帮助, CL 图像分析得到了中国科学院地质与地球物理研究所徐平研究员、毛谦工程师和马玉光工程师的帮助。国家自然科学基金委及其同行评议专家给予的信任和支 持, 是本项目得以顺利开展的基础。胡瑞忠研究员和刘丛强研究员对本项目的前期工作给予了大力支持。在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Compston W, Wilhams IS, Kirschvink JL, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale. *J Geol. Soc.*, 149: 171-184
- Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the archaean-proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23: 1-18
- Dalziel IWD. 1991. Pacific margins of Laurentia and EastAntarctica - Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent. *Geology*, 19: 598-601
- Dong YP, Zhu BQ, Chang XY and Zhang GW. 2002. Geochemistry of the basalts from north of the Shizong-Mile belt, eastern Yunnan Province: Constraints on the tectonic framework of the South China Continent. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 37-46 (in Chinese with English abstract)
- Evans DAD, Li ZX, Kirschvink JL and Wingate MTD. 2000. A high-quality mid-Neoproterozoic paleomagnetic pole from South China, with implications for ice ages and the breakup configuration of Rodinia. *Precambrian Research*, 100: 313-334
- Hao J and Zhai MG. 2004. Jinning movement and simians system in China: Their relationship with Rodinia supercontinent. *Chinese J. Geology*, 39: 139-152 (in Chinese with English abstract)
- Hoffman PF. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwana land inside-out? *Science*, 252: 1409-1412
- Huang JQ. 1954. Major tectonic parts in China. Beijing: Geological Publishing House, 31 (in Chinese)
- Khain EV, Bibikova EV, Salnikova EB, Kröner A, Gibsher AS, Didenko AN, Degtyarev KE and Fedotova AA. 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 122: 329-358
- Lan CY, Chung SL, Lo CH, Lee TY, Wang PL, Li H and DV. 2001. First evidence for Archean continental crust in northern Viet Nam and its implications for crustal and tectonic evolution in Southeast Asia. *Geology*, 19: 219-222
- Li DX and Deng J. 1996. Metamorphic core complex and vortex structure in Laojunshan, Southeastern Yunnan province. *Scientia Geologica Sinica*, 5(1): 1-9
- Li WY and Yang PF. 2004. Late Neoproterozoic Sedimentations of the Carbonate-Detrital Flows in Longshou Mountains, Northwest China: Implications for Its Tectonic Environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22: 142-147 (in Chinese with English abstract)
- Li WX, Li XH and Li ZX. 2004a. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. *Precambrian Research*, in press ??? (??): ??? - ???
- Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y and Kinny PD. 2002a. 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. *Precambrian Research*, 113: 135-154
- Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y and Liang XR. 2002b. U-Pb Zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in Western Sichuan: Petrogenesis and geodynamic implications. *Earth Sci. Frontiers*, 9(4): 329-338 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, *et al.* 2001. Does it take a superplume to breakup a supercontinent? — A case for Rodinia. *Geol. Soc. Aust. Abst.*, 65: 74-77 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 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. *Precambrian Research*, 122: 85-109
- Li ZX, Evans DAD and Zhang S. 2004b. A  $90^\circ$  spin on Rodinia: possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 409-421
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, *et al.* 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet Sci. Lett.*, 173: 171-181
- Ling W, Gao S, Ouyang J, *et al.* 2002. Timing and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from the zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China (series D)*, 32: 101-112 (in Chinese)
- Ling WL, Gao S, Zhang BR, Li HM, Liu Y and Cheng JP. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122: 111-140
- Liu YP, Ye L, Li CY and Hu RZ. 2003. Laojunshan-Song Chay metamorphic core complex and its tectonic significance. *Geochem. Cosmochem. Acta*, (S1): A259
- Lü HB, Zhang YX, Xia BD, Fang Z, Zhou WM, Peng Y, *et al.* 2003. Syn-sedimentary compression structure in the middle Triassic flysch of the Nanpanjiang basin, SW China. *Geological Review*, 49(5): 449

- 457 (in Chinese with English abstract)
- Lü W, Feng MG and Fu CS. 2001. Metamorphism of Mengdong Lithological Group in Nanwenhe area of Southeast Yunnan. *Yunnan Geology*, 20(1): 25-33 (in Chinese with English abstract)
- Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, Carter A, Roques D, Beyssac O, Tang TT, Nguyen DT and Avigad D. 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 233-248
- Mei MX, Ma YS, Deng J, Meng QF, Yi DH and Li DH. 2003. Sequence-stratigraphic framework of the early to middle Triassic and evolution of sedimentary-facies and paleogeography in the Nanpanjiang basin and its adjacent areas: Discussion on evolutionary process from the Dianqiangui basin to the Nanpanjiang basin. *Geological J. of China Universities*, 9(3): 427-439 (in Chinese with English abstract)
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, 56:207-218
- Moores EM. 1991. Southwest U. S. East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis. *Geology* 19, 425-428
- Mullen ED. 1983. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implication for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62:53-63
- Nam TN, Toriumi M, Sano Y, Terada K and Thang TT. 2003. 2. 9, 2. 36 and 1. 96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Viet Nam; Evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications. *J. Asian Earth Sci.*, 21: 743-753
- Pearce JA, Gorman BE and Birkett TC. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36:121-132
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed). *Andesites*. Chichester: Wiley, 525-548
- Phan CT. 1991. The Geological Map of Cambodia, Laos and Vietnam (at 1:1000000 Scale), 2nd edition. Geological Survey of Vietnam
- Qin JH, Wu YL, Yan YJ and Zhu ZF. 1996. Hercynian-Indosinia sedimentary-tectonic evolution of the Nanpanjiang basin. *Acta Geologica Sinica*, 70(2): 99-107 (in Chinese with English abstract)
- Roger F, Leloup PH, Jolivet M, Lacassin R, Phan TT, Brunel M and Seward D. 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321:449-466
- Vavra G, Schmid R and Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: Geochronology of the Ivren Zone (Southern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134:380-404
- Wang J and Li ZX. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122: 141-158
- Wang J, Li XH, Duan TZ, Liu DY, Song B, Li ZX and Gao YH. 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating for the Cangshuiyu volcanic rocks and its implications for the lower boundary age of the Nanhua strata in South China. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1663-1669
- Wang X, Zhou J, Qiu J and Gao J. 2004. Geochemistry of Meso- to Neoproterozoic Basic-acid rocks from Hunan Province, South China: implications for the evolution of the western Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 2004: 79-103
- Wang YL., Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17:413-421 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC and Ridey WI (eds). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Rev. Economic. Geol.*, 7: 1-35
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A global tectonic approach*. Unwin. Hyman, London
- Wu HR. 2000. Reinterpretation of the Guangxi Orogeny. *Chinese Science Bulletin*, 45(13): 1244-1248
- Wu HR. 2003. Discussion on tectonic palaeogeography of Nanpanjiang Sea in the late Palaeozoic and Triassic. *Journal of Palaeogeography*, 5:63-76 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15), 1554-1569
- Yang ZY, Sun ZM, Yang TS, et al. 2004. A long connection (750-380Ma) between South China and Australia: Paleomagnetic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 220: 423-434
- Yin CY, Liu DY, Gao LZ, Wang ZQ, Xing YS, Jian P and Shi YR. 2003. Lower boundary age of the Nanhua System and the Gucheng glacial stage: Evidence from SHRIMP II dating. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1657-1662
- Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B, Li L and Zhao ZF. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale <sup>18</sup>O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68:4145-4165
- Zheng YF. 2003. Neoproterozoic magmatic activity and global change. *Chinese Science Bulletin*, 48:1639-1656
- Zheng YF. 2004. Position of South China in configuration of Neoproterozoic Supercontinent. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 751-753 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL, Wu GY, Ji JQ, Zhang Q and Ding L. 1999. Discovery of ophiolite in Southeastern Yunnan, China. *Chinese Science Bulletin*, 44(1): 36-40
- Zhou MF, Yan DP, Kennedy AK, Li YQ and Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196:51-67
- Zhu WG, Deng HL, Liu BG, Li CY, Qin Y and Luo YN, Li ZD and Pi DH. 2004. The age of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex in the Yanbian area, Sichuan Province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of hornblende. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 1077-1085

#### 附中文参考文献

- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 张国伟. 2002. 滇东师宗-弥勒带北段基性火山岩地球化学及其对华南大陆构造格局的制约. *岩石学报*, 18(1): 37-46
- 董云鹏, 朱炳泉. 1999. 滇东南建水岛弧型枕状熔岩及其对华南古特提斯的制约. *科学通报*, 44: 2323-2328
- 郝杰, 翟明国. 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系. *地质科学*, 39: 139-152
- 黄汲清. 1954. 中国主要地质构造单位. 北京:地质出版社. 31
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因: 滇东南老君山. 变质核杂岩的构造解析. *地质论评*, 46: 110-119
- 李文渊, 杨鹏飞. 2004. 甘肃龙首山新元古代烧火筒群沉积特征及其构造意义. *沉积学报*, 22(1): 142-147
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁继荣. 2002. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义. *地学前缘*, 9: 329-338
- 凌文黎, 高山, 欧阳建平. 2002. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约. *中国科学(D)*, 32: 101-112
- 吕洪波, 章雨旭, 夏邦栋, 方中, 周伟明, 彭阳等. 2003. 南盘江盆地中三叠统复理石中的同沉积构造. *地质论评*, 49(5): 449-457
- 吕伟, 冯明刚, 胡长寿. 2001. 滇东南南盘江地区猛硐岩群变质作用

- 特征. 云南地质, 20(1): 25-33
- 梅冥相, 马永生, 邓军, 孟庆芬, 易定红, 李东海. 2003. 南盘江盆地及邻区早中三叠世层群地层格架及其古地理演化—兼论从“滇黔桂盆地”到“南盘江盆地”的演变过程. 高校地质学报, 9(3): 427-439
- 秦建华, 吴应林. 1996. 南盘江海西-印支期沉积构造演化. 地质学报, 70(2): 99-107
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 科学出版社, 205
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 17(3): 413-421
- 吴根耀, 吴浩若, 钟大赉, 邝国敦, 季建清. 2000. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩. 现代地质, 14(4): 393-400
- 吴根耀. 2001. 滇桂交界区印支期前陆褶皱冲断带. 地质科学, 36(1): 64-71
- 吴浩若. 2000. 重新解释广西运动. 科学通报, 45(5): 555-558
- 吴浩若. 2003. 晚古生代-三叠纪南盘江海的构造古地理问题. 古地理学报, 5(1): 63-76
- 张旗, 钱青, 王焰. 1999. 扬子地块西南缘晚古生代基性岩浆岩的性质与古特提斯演化. 岩石学报, 15(4): 576-583
- 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 1998. 滇东南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17: 390-397
- 郑永飞, 吴元保, 赵子福, 龚冰. 2004. 大别山北麓发现新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆岩. 科学通报, 49(14): 1468-1470
- 郑永飞. 2004. 新元古代超大陆构型中华南的位置. 科学通报, 49(8): 715-717