

文章编号: 1000-4734(2011)01-0062-08

中-浅正变质岩锆石 SHRIMP 法与 TIMS 法 测年结果不一致处理

——以滇东南南温河花岗岩为例

谭洪旗^{1,2}, 刘玉平^{1*}, 徐伟³, 郭利果⁴, 叶霖¹, 李朝阳⁴

(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, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国地质科学院 矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 3. 胜利油田股份公司, 山东 东营 557000;
4. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 410640)

摘要: 变质岩中的锆石大多遭受变质热事件的改造, 但中-浅变质岩一般不甚发育新生锆石或变质增生边, 不易通过现有的锆石测年技术获得该岩石的变质年龄。中-浅正变质岩的锆石为岩浆锆石与变质增生锆石的混合物, 其 U-Pb 同位素组成可以采用二端元混合模式来表达。利用同位素稀释法(TIMS)可以获得混合锆石 U-Pb 年龄及对应的同位素组成; 结合 CL 等内部结构分析, 利用离子探针法(SHRIMP)可以获得岩浆锆石 U-Pb 年龄及对应的同位素组成, 进而推算出变质增生锆石 U-Pb 年龄对应的同位素组成。在对滇东南南温河花岗岩锆石 U-Pb 年代学的研究中, 我们发现同一样品的 SHRIMP 与 TIMS U-Pb 法测年结果不一致, 根据上式推算出后期主变质年龄约为 230 Ma, 与前人利用其它测年方法获得的结果基本一致, 符合研究区主变质期为印支期的区域地质背景。该方法为中-浅正变质岩年代学研究提供了一种新思路。

关键词: 中-浅正变质岩; 锆石; U-Pb 年龄; SHRIMP 法; TIMS 法; 南温河花岗岩; 滇东南

中图分类号: P579; P597; P588.34 文献标识码: A

作者简介: 谭洪旗, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 矿物岩石矿床学专业. E-mail: hongqitan@163.com

锆石作为一种常见的含铀矿物, 具有很高的物理、化学稳定性, 普通铅含量较低, 且其中铅的扩散封闭温度高达 900 °C^[1-2], 是确定各种岩浆岩结晶年龄和高级变质作用峰期年龄的理想对象。而中-低级变质岩中的锆石及其 U-Pb 同位素体系, 受变质作用的影响较小, 不易通过现有的 U-Pb 测年方法获得变质年龄。因此, 中-浅变质作用的年龄一般通过其他方法来获得。

我们在对经历了中-浅变质的滇东南南温河花岗岩开展锆石 U-Pb 年代学研究中, 发现同一样品的 SHRIMP 与 TIMS 锆石 U-Pb 测年结果不一致, 结合锆石内部结构 CL 图像分析, 对发育变质增生边的岩浆锆石 U-Pb 同位素组成进行了推算,

获得了与前人在该区研究基本一致的变质年龄, 并为中-浅正变质岩年代学研究提供了一种新思路。

1 原理及方法

变质锆石主要有 2 类, 变质过程中新生长的锆石和对原有锆石的改造(包括变质增生锆石)^[3-4]。中高级变质岩中, 上述 2 类锆石均较发育。而中-浅变质锆石由于经历的变质峰期温度较低, 难以形成新生锆石, 而以一定程度的变质改造及增生为主, 形成核-边结构, 但改造边或增生边的宽度往往较小。目前, 锆石 U-Pb 高精度定年主要有单颗粒锆石 TIMS 法、离子探针法(SHRIMP)及激光等离子体质谱法(LA-ICP-MS)等。其中, 精度最高的 TIMS 法难以进行微区原位分析; 而能进行微区原位分析的 SHRIMP 法和 LA-ICP-MS 法, 要获得精确同位素组成, 束斑直径通常大于 20 μm。因此, 通过上述测年技术均难以直接获

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 973 项目(批准号: G2007CB411408); 国家自然科学基金项目(批准号: 40302026, 40972129); 矿床地球化学国家重点实验室自主选题项目(编号: KCZX20090106)

* 通讯作者, E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

得中-浅变质岩的年龄。适用于中-高级变质作用测年的锆石 U-Pb 不一致线,以及在此基础上由陈能松等^[5]提出的 U-Pb 不一致线多边形准则,均需要对样品中多期次单颗粒锆石进行仔细分类,从而避免人为因素的影响。

经历了中-浅变质改造(包括增生)的锆石颗粒,为原岩锆石与变质锆石两类结晶域的混合。对于正变质岩而言,假定岩浆锆石、变质锆石和混合锆石对应的²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值,分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 , B_1 、 B_2 、 B_3 和 C_1 、 C_2 、 C_3 。再假定 A_1 、 A_2 、 A_3 在 C_1 、 C_2 、 C_3 中所占的比例为 X , B_1 、 B_2 、 B_3 在 C_1 、 C_2 、 C_3 中所占的比例为 $(1 - X)$, 则混合锆石的同位素组成可以表示为:

$$C_m = A_m X + B_m (1 - X) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

由上式可以推导出变质锆石的 U-Pb 同位素组成及其误差分别为:

$$B_m = (C_m - A_m X) / (1 - X) \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$$\Delta B_m = (\Delta C_m + X \Delta C_m - X \Delta A_m - \Delta X A_m - \Delta X C_m) / (1 - X) \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

式中 $m = 1 \ 2 \ 3$

利用阴极发光 (CL) 图像分析,可以获得岩浆锆石在混合锆石中所占的体积比例 X 及误差 ΔX ; 结合阴极发光 (CL) 等内部结构分析,利用锆石 SHRIMP 法(或 LA-ICP-MS 法)可直接获得岩浆锆石的同位素组成(A_m)及其误差(ΔA_m); 利用 TIMS 法可以获得混合锆石的同位素组成(C_m)及其误差(ΔC_m); 根据上述方程式②和③,可以推算出变质锆石的同位素组成(B_m)及其误差(ΔB_m)。虽然 TIMS 和 SHRIMP U-Pb 定年的锆石不是同一颗粒,但通过比较系统的镜下观察统计,表明同一样品中发育变质增生边的岩浆锆石,岩浆成因域与变质成因域这两部分的比例仅在很小范围内波动(即岩浆成因域和变质成因域两个端元的比例对于不同颗粒是基本一致的。本文所研究的样品,岩浆成因域的体积比例变化范围为 83% ~ 85%)。因此,可以认为所测样品中这一类型锆石的 U-Pb 同位素组成在误差范围内是一致的。同时,在 TIMS 和 SHRIMP U-Pb 定年之前,可以通过镜下观测、CL 观测等手段,将含有古老继承核的锆石予以剔除,以保证通过计算获得精确的变质锆石年龄。

值得注意的是,副变质岩的锆石组成复杂,虽然从理论上也可以通过本方法获得变质年龄,但需要测定足够多的锆石 TIMS 法和 SHRIMP 法数

据点,且需保证锆石 TIMS 法测定颗粒具有代表性,但这些在实际操作中难以实现。因此,本文中的推算方法限于正变质岩中,对副变质岩不一定适用。

2 滇东南南温河花岗岩年代学研究

滇东南地区位于华南褶皱带西端与扬子地块、印支地块的接合部位,是研究华南大陆形成与演化及特提斯构造域时空发展的重要地区之一。南温河花岗岩位于文山-麻栗坡断裂与红河断裂带之间的滇东南老君山变形-变质穹隆的内核部位,并向南延入越南境内,国内出露面积约 350 km²(图 1)。

样品 LJS-2 和 LJS-3 同时用 SHRIMP 法和 TIMS 法进行了锆石 U-Pb 测年。其中样品 LJS-2 采于保良街,为浅灰色斑状片麻状中细粒花岗岩,片麻状构造,具变余似斑状结构,基质为变余中细粒结构、鳞片状变晶结构; 样品 LJS-3 采于南温河,为浅灰色片麻状细粒花岗岩,具变余细粒粒状结构、鳞片粒状变晶镶嵌结构,片麻状构造。两件样品的矿物组成极为相似,主要矿物为微斜长石、斜长石、石英、白云母及黑云母,次要矿物及副矿物为锆石、磷灰石、电气石等。两者之间的主要差异为长石斑晶含量不同,前者 > 20%, 而后者 < 5%。研究表明,南温河花岗岩经历了高绿片岩相-低角闪岩相动力变质^[9-10]。

2.1 分析方法

锆石的处理、光学显微镜照相和 SHRIMP 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。SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测年所用的标准锆石为 CZ3 和 TE-MORA,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 μm。数据处理同 Williams^[11],利用 Ludwig 编写的 SQUID 1.0 和 ISOPLOT 程序^[12]。

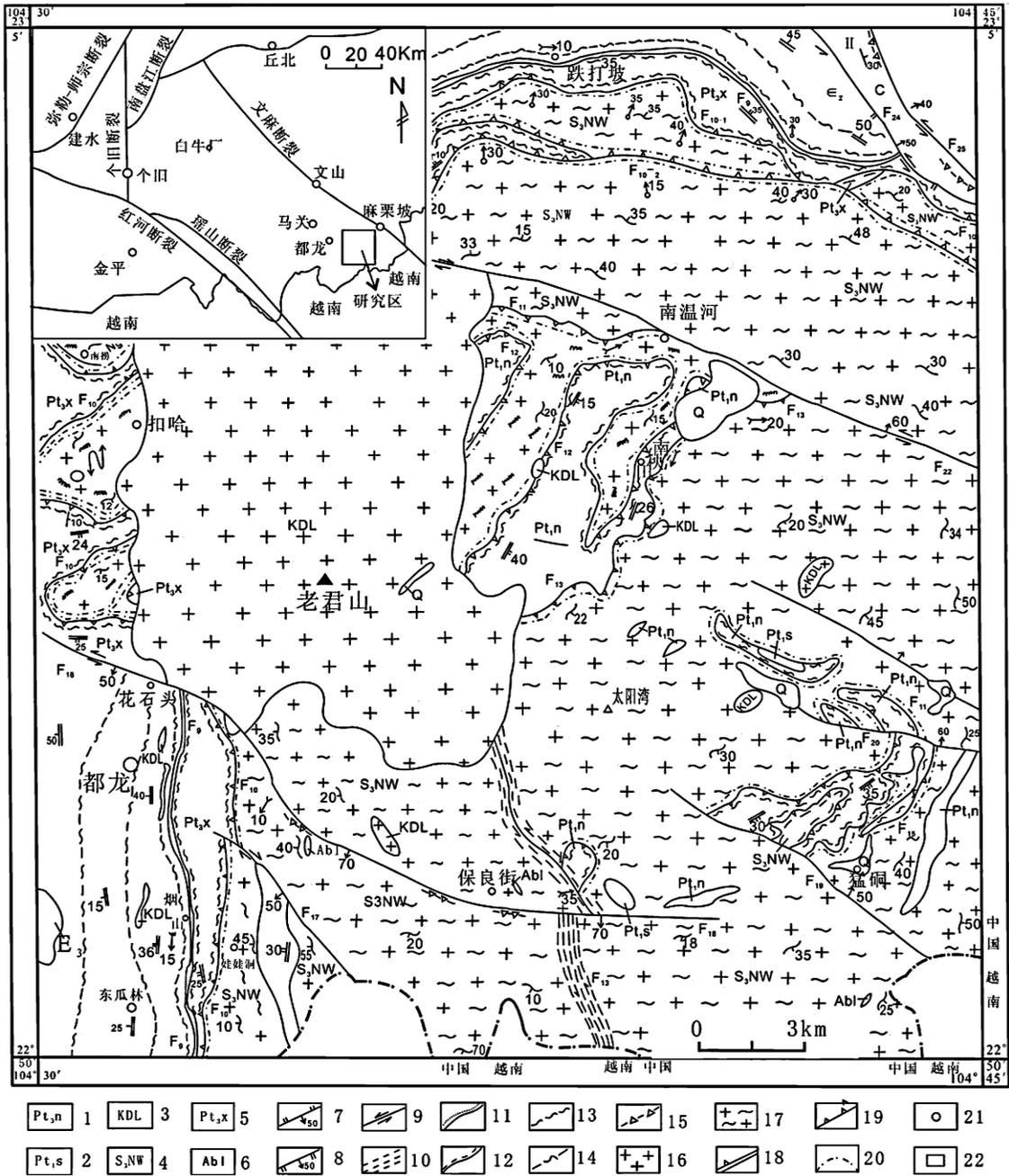
TIMS 锆石 U-Pb 同位素年代学在中国地质调查局天津地质调查中心分析测试室完成,锆石溶解和 U-Pb 分离的化学流程是在 Krogh 方法基础上改进的颗粒锆石方法^[13]。在 VG354 型热电质谱仪上用高灵敏度 Daly 检测器进行 U、Pb 同位素测定,所有 U、Pb 同位素数据均对质量歧视效应进行校正。实验室全流程 Pb 空白在 0.05 ng 以内, U 空白为 0.002 ng,数据处理使用美国地质

调查所 Ludwig 编写的 PBDAT 和 ISOPLOT 软件^[12]。

2.2 分析结果

CL 图像分析显示, 两件样品的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 2 类。同时, 所有的锆石颗粒均发育厚度不大的增生边或蜕晶边(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^[14]。



- 1-猛硐岩群南秧田组 2-猛硐岩群西老组 3-都龙超单元 4-南温河序列 5-新寨岩组 6-斜长角闪岩 7-正断层 8-逆断层
- 9-平移断层 10-脆韧性剪切带及主断面 11-不整合界线 12-平行不整合界线 13-片理化带 14-劈理化带 15-构造角砾岩带
- 16-花岗岩脉 17-片麻状花岗岩 18-主剥离断层 19-剥离断层 20-国界 21-居民点 22-研究区

图 1 滇东南老君山地区区域地质略图(据文献[6-8]修改)

Fig. 1. Geological sketch map of Laojunshan area, Southeastern Yunnan Province, China.

LJS-2、LJS-3 锆石 SHRIMP 分析结果见表 1。当 SHRIMP 测点的 U 含量 $>2500 \times 10^{-6}$ 时, 需要对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值进行校正^[15-17], 经过校正后的测试结果见表 1 及图 3。

样品 LJS-2 的 Th、U 含量变化范围分别为 $60 \times 10^{-6} \sim 1963 \times 10^{-6}$ 和 $355 \times 10^{-6} \sim 4836 \times 10^{-6}$,

放射性成因 Pb 含量变化范围为 $20.9 \times 10^{-6} \sim 309 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化范围为 $0.04 \sim 0.77$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化范围为 $413.5 \pm 10 \sim 1051 \pm 24$ Ma。LJS-2-7 号测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1162 ± 26 Ma 结合其呈亮白色、无振荡分带的 CL 图象特点, 判别为继承锆石或捕获锆石, 表明源

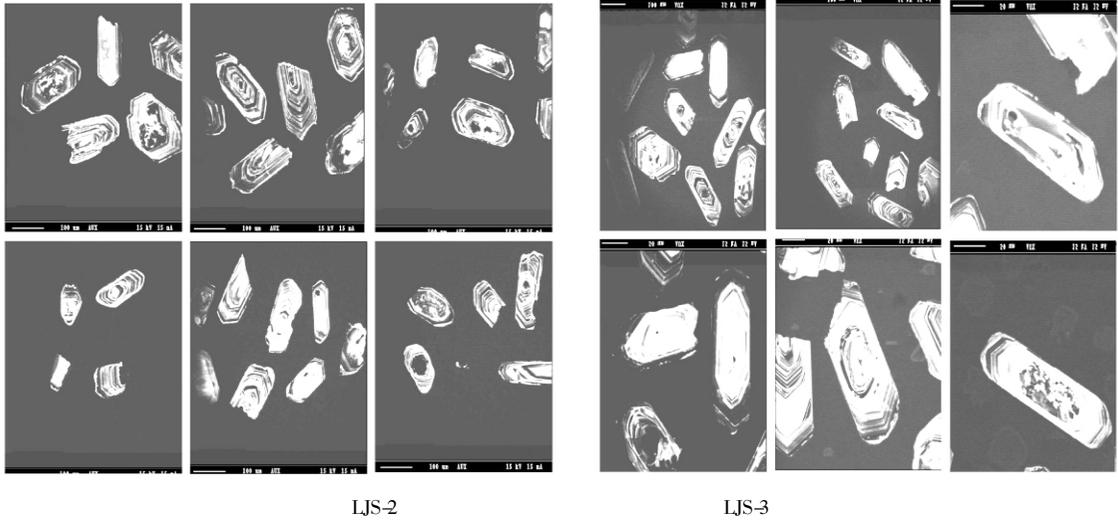


图 2 锆石阴极发光图像

Fig. 2. CL images of zircon from LJS-2 (left) and LJS-3 (right) samples.

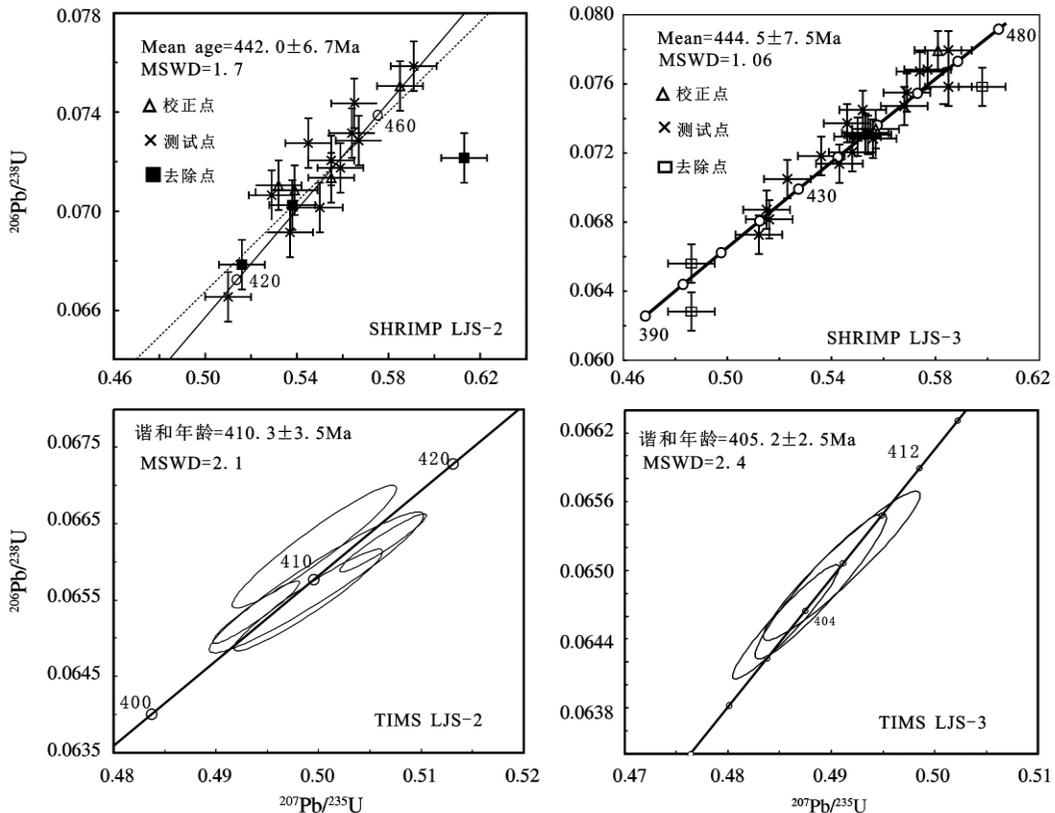


图 3 南温河花岗岩 LJS-2 和 LJS-3 样品的 SHRIMP 及 TIMS 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3. SHRIMP and TIMS Zircon U-Pb Concordia plots of the Nanwenhe Granites.

表 1 南温河花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果
Table 1. Zircon SHRIMP U-Pb isotopic data of the Nanwenhe granites

测点	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	^{232}Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*$	$\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*$	$\sigma/\%$	err-corr	年龄/ Ma			
				^{238}U	10^{-6}	^{235}U		^{238}U	$^{206}\text{Pb}^*$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
2-3.1	0.44	724	102	0.15	43.8	0.550	4.3	0.0701	2.4	.0568	3.6	0.566	437 ± 10	445 ± 15	439 ± 79
2-3.2	0.59	744	70	0.10	44.5	0.537	5.8	0.0691	2.5	.0564	5.3	0.424	431 ± 10	436 ± 21	468 ± 120
2-4	0.63	1705	1265	0.77	107	0.564	3.4	0.0731	2.4	.0560	2.3	0.721	455 ± 11	454 ± 12	452 ± 51
2-6	0.42	1675	1224	0.76	104	0.555	2.8	0.0720	2.4	.0559	1.5	0.846	448 ± 10	448 ± 10	449 ± 33
2-7	0.79	651	249	0.39	99.2	1.92	2.8	0.1771	2.5	.0786	1.3	0.888	1051 ± 24	1088 ± 19	1162 ± 26
2-7.1	0.22	1707	112	0.07	103	0.538	5.8	0.0702	5.7	.0555	1.3	0.973	437 ± 24	437 ± 21	433 ± 29
<u>2-8</u>	0.02	2814	961	0.35	173	0.555	2.7	0.0713	2.4	.0565	1.2	0.901	444 ± 10	448 ± 10	472 ± 27
<u>2-9</u>	0.21	4836	1716	0.37	309	0.539	2.5	0.0708	2.4	.0551	0.73	0.956	441 ± 11	439 ± 9	417 ± 16
<u>2-10</u>	0.17	3033	1247	0.42	198	0.585	2.8	0.0750	2.4	.0565	1.5	0.846	466 ± 11	468 ± 11	473 ± 33
<u>2-11</u>	0.03	3650	1963	0.56	228	0.532	3.4	0.0710	2.4	.0544	2.4	0.697	442 ± 11	433 ± 12	388 ± 54
2-12	0.20	1399	60	0.04	85.0	0.529	3.2	0.0706	2.4	.0544	2.0	0.765	440 ± 10	431 ± 11	388 ± 45
2-13	0.08	1112	237	0.22	63.7	0.510	3.1	0.0665	2.5	.0556	1.8	0.805	414 ± 10	418 ± 11	436 ± 40
2-14	1.20	593	285	0.50	37.0	0.613	3.8	0.0721	2.5	.0617	2.8	0.663	449 ± 11	486 ± 15	466 ± 60
2-17	0.90	355	107	0.31	20.9	0.516	9.3	0.0678	2.7	.0552	8.9	0.286	423 ± 11	423 ± 32	422 ± 200
2-25	0.12	2428	785	0.33	152	0.567	2.8	0.0728	2.5	.0566	1.2	0.904	453 ± 11	456 ± 10	474 ± 27
3-1	0.05	1199	418	0.36	74.0	0.554	3.3	0.0718	3.1	.0559	0.96	0.96	447 ± 13	448 ± 12	450 ± 21
3-2	0.11	417	189	0.47	23.3	0.486	3.6	0.0651	3.2	.0542	1.7	0.88	407 ± 13	402 ± 12	377 ± 38
3-3	0.10	871	419	0.50	46.9	0.486	3.4	0.0626	3.1	.0563	1.2	0.94	391 ± 12	402 ± 11	466 ± 27
3-4	0.03	1625	512	0.33	93.0	0.512	3.3	0.0666	3.2	.0558	0.80	0.97	416 ± 13	420 ± 11	443 ± 18
3-4-1	0.00	1497	459	0.32	92.2	0.550	3.2	0.0717	3.1	.0557	0.79	0.97	446 ± 13	445 ± 12	441 ± 18
3-5	0.04	2041	924	0.47	124	0.548	3.2	0.0709	3.1	.0561	0.79	0.97	442 ± 13	444 ± 12	455 ± 18
3-6	0.04	1527	576	0.39	89.1	0.515	3.3	0.0679	3.2	.0551	0.90	0.96	424 ± 13	422 ± 11	415 ± 20
<u>3-7</u>	0.06	2848	2147	0.78	187	0.581	3.2	0.0757	3.1	.0557	0.65	0.98	470 ± 14	465 ± 12	439 ± 14
3-8	0.07	1053	453	0.44	65.5	0.546	3.3	0.0724	3.1	.0548	1.0	0.95	451 ± 13	442 ± 12	402 ± 22
3-8-1	0.02	2428	2692	1.15	147	0.536	3.2	0.0707	3.1	.0550	0.74	0.97	440 ± 13	436 ± 11	411 ± 17
3-9	0.06	1544	540	0.36	99.7	0.574	3.3	0.0751	3.1	.0554	0.93	0.96	467 ± 14	461 ± 12	429 ± 21
3-10	0.01	108	89	0.85	27.2	4.56	3.4	0.2930	3.3	.1129	1.1	0.95	1657 ± 48	1742 ± 28	1846 ± 20
3-12	0.04	688	245	0.37	40.2	0.518	3.4	0.0679	3.2	.0553	1.3	0.93	424 ± 13	424 ± 12	425 ± 29
3-13	0.22	154	88	0.59	15.5	1.026	4.0	0.1164	3.3	.0639	2.3	0.82	710 ± 22	717 ± 21	738 ± 49
<u>3-14</u>	0.00	3760	608	0.17	240	0.583	3.2	0.0724	3.1	.0584	0.84	0.97	451 ± 14	466 ± 12	545 ± 18
3-15	0.02	2362	3433	1.50	148	0.552	3.2	0.0731	3.1	.0548	0.65	0.98	455 ± 14	446 ± 12	404 ± 15
<u>3-15-1</u>	0.00	3776	3498	0.96	228	0.529	3.3	0.0685	3.2	.0561	0.58	0.98	427 ± 3	4317 ± 12	456 ± 13
3-16	0.02	872	258	0.31	54.9	0.568	3.3	0.0733	3.2	.0562	1.1	0.94	456 ± 14	457 ± 12	460 ± 24
3-17	0.12	2052	776	0.39	119	0.516	3.3	0.0674	3.2	.0556	1.0	0.95	421 ± 13	423 ± 11	436 ± 22
3-18	0.03	2384	635	0.28	147	0.553	3.2	0.0719	3.1	.0557	0.72	0.97	448 ± 13	447 ± 12	441 ± 16
3-19	0.16	708	220	0.32	45.1	0.585	3.6	0.0743	3.2	.0571	1.6	0.89	462 ± 14	468 ± 13	494 ± 35
3-20	0.04	2188	765	0.36	141	0.577	3.2	0.0752	3.1	.0557	0.73	0.97	467 ± 14	463 ± 12	440 ± 16
3-21	0.03	2248	1220	0.56	134	0.523	3.2	0.0695	3.1	.0546	0.71	0.98	433 ± 13	427 ± 11	397 ± 16
3-22	0.01	1921	704	0.38	118	0.556	3.3	0.0716	3.2	.0563	0.81	0.97	446 ± 14	449 ± 12	464 ± 18
3-23	0.06	1660	357	0.22	106	0.569	3.3	0.0740	3.1	.0558	0.91	0.96	460 ± 14	457 ± 12	443 ± 20

注: 当锆石中 U 含量高于 2500×10^{-6} 参见文献 [15-17] 校正 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄; 测点号有下划线的数据为根据此方法校正后数据; Pb_c 代表普通铅在总铅中的百分比, * 代表普通 Pb 校正, err-corr 代表数据采集误差。

区可能存在中元古代结晶岩石。不谐和度 $< 5\%$ 的其余 11 个测点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $442.0 \pm 6.3 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.0075) (图 3)。

样品 LJS-3 的 Th、U 含量变化范围分别为 $88 \times 10^{-6} \sim 3498 \times 10^{-6}$ 和 $108 \times 10^{-6} \sim 3776 \times 10^{-6}$, 放射性成因 Pb 含量变化范围为 $15.5 \times 10^{-6} \sim 240 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化范围为 0.22 ~ 1.50。

LJS-3-10 号和 LJS-3-13 号两个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分别为 $1846 \pm 20 \text{ Ma}$ 和 $738 \pm 49 \text{ Ma}$, 结合 CL 图像呈亮白色、无振荡分带的特点, 应为继承锆石或捕获锆石, 表明岩浆源区可能存在元古代结晶岩石(图 2); LJS-3-7、LJS-3-14 的 CL 图像也显示出锆石颗粒中存在继承核, 因而这 2 个测点实际上为继承锆石与岩浆锆石的混合, 表现为

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 等 3 组年龄不一致。其余 21 个测点均具有细密、清晰的振荡环带 CL 图像,属于岩浆锆石,其中不谐和度 < 5% 的 18 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $441.5 \pm 7.5 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.06) (图 3)。

TIMS 法锆石 U-Pb 定年结果见表 2 和图 3。LJS-2 及 LJS-3 的锆石具较高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 原子比率,分别为 167 ~ 3339 和 1155 ~ 3008; 普通铅含量较低,分别为 0.056 ~ 0.610 ng、0.072 ~ 0.270 ng。从图 3 可知,LJS-2 的 TIMS 法锆石谐和年龄为 $410.3 \pm 3.5 \text{ Ma}$ (MSWD = 2.1); LJS-3 的 TIMS 法锆石谐和年龄为 $405.2 \pm 2.5 \text{ Ma}$ (MSWD = 2.4)。

值得注意的是,SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的 2-13、3-2、3-3 和 3-4 等 4 个测点的结果,与 TIMS 法测定结果具有一定相似性,结合 CL 图像特征,这 4 个测点位于岩浆振荡环带与变质边的交接部位,应代表了混合锆石的年龄。

2.3 主变质期年龄的推算

样品 LJS-2 和 LJS-3 的 SHRIMP 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值分别为 $442.0 \pm 6.3 \text{ Ma}$ 和 $441.5 \pm 7.5 \text{ Ma}$,TIMS 法锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 $410.3 \pm 3.5 \text{ Ma}$ 和 $405.2 \pm 2.5 \text{ Ma}$ 。结合 CL 图像分析,可知这两件样品均具有比较细密清晰的岩浆振荡环带,但大部分锆石颗粒的环带边缘有一薄层亮白色的改造边或增生边 (< 10 μm) ,表明加里东期的岩浆锆石在后期发生过改造或增生,因此造成了两种方法测年结果的差异。TIMS 锆石 U-Pb 法获得的年龄应代表受后期热事件影响的混合年龄,不能代表该地区的花岗岩的成岩年龄。所测样品锆石的变质年龄可以采用前述的公式进行计算,结果见表 3。从表 3 可知样品 LJS-2 和 LJS-3 的主变质年龄分别为 $232 \pm 15 \text{ Ma}$ 和 $228 \pm 13 \text{ Ma}$ (本文仅列出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表

表 2 南温河花岗岩 TIMS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 2. TIMS U-Pb isotopic data of zircon from Nanwenhe granites

样品	m/μg	$w_B/10^{-6}$		m(Pb _c)/ng	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	表面年龄/Ma		
		U	Pb							$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
LJS-2-T1	15	2334	157	0.13	1100	0.05659	0.06620(53)	0.4996(53)	0.05473(35)	413.2 ± 3.2	411.4 ± 3.6	401.2 ± 14
LJS-2-T2	20	1815	114	0.06	2693	0.03509	0.06550(44)	0.4990(48)	0.05525(34)	409.0 ± 2.7	411.0 ± 3.3	422.4 ± 14
LJS-2-T3	30	1915	119	0.07	3339	0.02806	0.06534(27)	0.4939(28)	0.05482(20)	408.0 ± 1.6	407.6 ± 1.9	404.9 ± 8.2
LJS-2-T4	30	1937	126	0.15	1596	0.03649	0.06625(25)	0.5063(28)	0.05543(20)	413.5 ± 1.5	416.0 ± 1.9	429.6 ± 8.0
LJS-2-T5	20	1096	98	0.61	167	0.03811	0.06573(61)	0.4998(69)	0.05515(52)	410.4 ± 3.7	411.6 ± 4.7	418.3 ± 2.1
LJS-3-T1	20	2531	164	0.07	2876	0.08746	0.06455(33)	0.4856(34)	0.05456(23)	403.2 ± 2.0	401.9 ± 2.3	394.2 ± 9.5
LJS-3-T2	30	2465	164	0.27	1155	0.06806	0.06513(42)	0.4915(36)	0.05473(17)	406.7 ± 2.5	405.9 ± 2.5	401.2 ± 16
LJS-3-T3	20	1988	133	0.14	1219	0.08311	0.06504(43)	0.4910(50)	0.05475(39)	406.2 ± 2.6	405.6 ± 3.4	402.0 ± 16

注: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白 (Pb = 0.050 ng, U = 0.002 ng) 及稀释剂作了校正; 其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素; 括号内的数字为 2σ 绝对误差,例如 0.06455(33) 表示 $0.06455 \pm 0.00033(2\sigma)$ 。

表 3 推算变质年龄的参数

Table 3. Parameters of estimated metamorphic age

样品	SHRIMP $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄/Ma	样品	TIMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄/Ma	岩浆锆石体积比/%	推算 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值/Ma
LJS-2	442 ± 6.3	LJS-2-T1	①413.2 ± 3.2	85	①247.7 ± 15
		LJS-2-T2	②409.0 ± 2.7		②218.7 ± 19
		LJS-2-T3	③408.0 ± 1.6		③212.0 ± 26
		LJS-2-T4	④413.5 ± 1.5		④249.8 ± 27
		LJS-2-T5	⑤410.4 ± 3.7		⑤228.2 ± 12
		加权平均			232 ± 15 (MSWD = 0.68)
LJS-3	441.5 ± 7.5	LJS-3-T1	①403.2 ± 2.0	83	①213.3 ± 26
		LJS-3-T2	②406.7 ± 2.5		②234.6 ± 23
		LJS-3-T3	③406.2 ± 2.6		③231.3 ± 22
		加权平均			228 ± 13 (MSWD = 0.85)

面年龄计算结果,同理可计算出 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄值),即主变质事件年龄为230 Ma左右。

3 讨论

南温河花岗岩 SHRIMP 锆石年龄分别 442.0 ± 6.3 Ma 和 441.5 ± 7.5 Ma,代表了南温河花岗岩成岩年龄为440 Ma左右。在越南北部 Song Chay 变质穹窿中,相同岩类变质成因的白云母 Ar-Ar 年龄分别为 234 ± 0.8 Ma 和 228 ± 0.5 Ma^[18-19]; Yan et al.^[20] 获得了该区变质成因的角闪石 Ar-Ar 年龄为 237 ± 5 Ma。此外,经历了同期变质的猛硐岩群斜长角闪片麻岩,获得了变质成因楣石的 TIMS U-Pb 年龄为 236.8 ± 1.7 Ma^[21]。本文通过计算获得的变质年龄约为230 Ma,与上述其他测年方法获得的变质年龄在误差范围内一致,表明借助此方法进行计算中-浅正变质岩的年龄是可行的。

中-浅变质岩的年龄,一般通过变质成因含钾矿物的 Ar-Ar 法(如云母、角闪石等),变质成因的其他含 U、Th 矿物的 U-Th-Pb 法(如独居石、楣石、金红石等)。但上述分析对象,有的产出分布有限,或有的封闭温度较低等,均存在一定的局限

性。锆石广泛分布于各类岩石中,通过锆石 U-Pb 法测定中-浅变质作用的年龄,不但拓展了锆石 U-Pb 法测年的应用范围,也为中-浅变质年代学提供了一种新途径。

应用此方法可以对已有的中-浅变质岩锆石年代学数据进行再处理,也为今后类似工作提供一些有效的启示。但是该方法也存在一些局限:①适用于经历了中-浅变质的正变质岩石;②后期经历的变质热事件尽可能简单,变质热事件与原岩岩浆热事件的时间间隔应足够大;③应结合 CL 图像分析等方法开展锆石内部结构研究,并统计足够多的颗粒,以获得变质成因域和岩浆成因域的准确比例;④SHRIMP 和 TIMS 锆石 U-Pb 测年以较多的测年数据为佳,这样通过计算获得的变质年龄才能更准确、更具地质意义;⑤在区域地质背景研究基础上,应用本文方法计算的变质年龄,最好辅以其他测年方法数据的对比和印证。

致谢:TIMS 锆石 U-Pb 测年由天津地质矿产研究所李惠民研究员完成,SHRIMP 锆石 U-Pb 测年得到北京 SHRIMP 中心刘敦一研究员、宋彪研究员、石玉若博士、陶华工程师等诸位老师的指导和帮助,在此一并致以诚挚的感谢。

参 考 文 献:

- [1] Lee J, Williams I, Ellis D. Pb, U and Th diffusion in nature zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(13): 159-162.
- [2] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 2000, 172: 5-24.
- [3] 简平,陈裕淇,刘墩一. 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]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183-191.
- [4] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [5] 陈能松,李惠民,何蕾,等. 热离子质谱测定的颗粒级锆石 U-Pb 不一致年龄数据处理的多边形准则—以大别山和东昆仑山深变质岩为例[J]. 地质科技情报, 2002, 21(3): 24-29.
- [6] 云南省地矿局第二区域测量大队. 中华人民共和国区域地质报告(1:20万) 马关幅[Z]. 1976.
- [7] 云南省地质矿产勘查开发局区域地质调查大队. 中华人民共和国地质图及说明书(1:5万) 老君山幅、麻栗坡县幅[Z]. 1999.
- [8] 陈学明,林棕,谢福昌. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地化特征[J]. 地质科学, 1998, 33(1): 115-124.
- [9] 张世涛,冯明刚,吕伟. 滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 390-397.
- [10] 徐伟. 滇东南南温河花岗岩年代学和地球化学初步研究[D]. 中国科学院研究生院, 硕士学位论文(地球化学研究所), 2007.
- [11] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. McKibben M A, Shanks W C, Ridey W I. (eds). *Application of Microanalytical Techniques to understand Mineralizing Process* [C]. *Rev Economic Geol*, 1998, 7: 1-35.
- [12] Ludwig K R. Isoplot—A plotting and regression program for radiogenic-isoplot data [J]. *USGS open-file Report Version*, 1994, 275: 91-145.
- [13] 陆松年,李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 22: 137-146.
- [14] 刘玉平,叶霖,李朝阳,等. 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[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 916-926.
- [15] McLaren A C, Fitzgerald J D, Williams I S. The microstructure of zircon and its influence on the age determination from Pb/U ratios measured by the ion microprobe [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 933-1005.
- [16] Williams I S, Hergt J M. U-Pb dating of Tasmanian dolerites: A cautionary tale of SHRIMP analysis of high-U zircon. In: Woodhead J D, Hergt J M, Noble W P. eds. *Beyond 2000: New Frontiers in Isotope Geosciences, Lorne, Abstracts and Proceedings* [M]. Melbourne: University of Melbourne, 2000: 185-188.
- [17] Butera K M, Williams I S, Blevin P L, et al. Zircon U-Pb dating of Early Palaeozoic monzonitic intrusives from the Goonumbla area, New South Wales [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48: 457-464.

- [18] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, et al. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology [J]. *Tectonophysics*, 2000, 321: 449-466.
- [19] Maluskia H, Lepvrier C, Jolivet L, et al. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19: 233-248.
- [20] Yan D P, Zhou M F, Wang Y C, et al. Structural and geochronological constraints on the Dulong-Song Chay tectonic dome in SE Yunnan (SW China) and northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28(4): 332-353.
- [21] 谭洪旗. 滇东南猛硐岩群变质-变形与地球化学研究[D]. 中国科学院研究生院, 硕士学位论文(地球化学研究所), 2010.

A Study on SHRIMP and TIMS Zircons Dating on Low-to Medium-Grade Ortho-Metamorphic Rocks: Example on the Nanwenhe Granites, Southeastern Yunnan Province, China

TAN Hong-qi^{1,2}, LIU Yu-ping¹, XU Wei³, GUO Li-guo⁴, YE Lin¹, LI Chao-yang⁴

- (1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
 2. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, China;
 3. Department of Project Supervising Shengli Oil Field Stock Ltd. Co., Dongying 557000, China;
 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Zircons in metamorphic rocks have generally undergone thermal alteration. As new growth zircons and metamorphic accretional rims are weakly developed in the low-to medium-grade metamorphic rocks, it is difficult to date them by using ordinary zircon U-Pb isochronal techniques. In these rocks, the isotopic compositions of zircons with magmatic core and metamorphic accretional rims represent the mixing of two compounds different genesis, which could be expressed by the mixture model of two isotope end-members. The isotopic composition of mixed zircon could be obtained by TIMS technique, and the isotopic composition of magmatic zircon could be dated by using SHRIMP technique on the basis of the internal fabric analysis such as CL. Thus, the isotopic composition of metamorphic zircon could be calculated. The zircons U-Pb geochronology of the same samples exhibit the discordance between SHRIMP and TIMS U-Pb dating results from the Nanwenhe Granites, Southeastern Yunnan Province, P. R. China. The age of peak metamorphic event(~230 Ma) was obtained through the above mentioned calculating method, in accordance with the indosinian metamorphic ages obtained by other dating methods. This study provides a new way to date the low-to medium-grade metamorphic event.

Key words: ortho-metamorphic; zircon; U-Pb dating; SHRIMP; TIMS; Nanwenhe granites; Yunnan Province