

# 南岭花山和姑婆山花岗岩基属印支期侵位

——来自花岗岩熔体冷却-结晶和放射成因热计算的依据

章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室(南京大学), 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210093

**内容提要:**通过对南岭西段花山和姑婆山花岗岩地质-岩石地球化学特征研究, 判定它们的侵位深度(5.5 km)、围岩温度(196℃)及岩浆初始温度(950℃), 建立起花山和姑婆山岩基的数学计算模型, 计算得出: 花山-姑婆山花岗岩熔体侵位后, 其初始温度降低至结晶温度所需的时间( $\Delta t_{\text{cool}}$ )分别为 4.14 Ma(花山)和 4.36 Ma(姑婆山); 由于结晶潜热释放而使结晶过程延长的时间( $\Delta t_L$ )为 2.67 Ma, 2.81 Ma; 由于花山和姑婆山花岗岩基放射性元素含量( $U\ 13.5 \times 10^{-6}$ ,  $Th\ 56.1 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O\ 5.79\%$ (花山);  $U\ 13.7 \times 10^{-6}$ ,  $Th\ 52.4 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O\ 5.28\%$ (姑婆山))高于世界平均花岗岩放射性元素含量( $U\ 5 \times 10^{-6}$ ,  $Th\ 20 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O\ 2.66\%$ ), 花山和姑婆山花岗岩浆侵位后产生的放射成因热使结晶过程延长的时间( $\Delta t_A$ )分别为 37.6 Ma 和 45.1 Ma, 远长于按世界平均花岗岩放射性元素含量计算得出的  $\Delta t_A$ (3.17 Ma, 花山)。花山和姑婆山花岗岩基的侵位-结晶时差( $\Delta t_{\text{EXTD}}$ )分别为 44.41 Ma 和 52.27 Ma, 结合锆石 U-Pb 年龄值(162 Ma(花山), 163 Ma(姑婆山)), 通过反演计算得出花山、姑婆山花岗岩基侵位年龄值( $t_E$ )分别为 206 Ma 和 215 Ma, 从而为花山-姑婆山花岗岩基属于印支期侵位提供了重要的岩浆动力学佐证。

**关键词:**花山和姑婆山花岗岩基; 侵位年龄; 侵位-结晶时差; 印支造山运动; 岩浆动力学证据

花山和姑婆山花岗岩基分布在广西东北部的富川、钟山、贺州境内, 位于南岭东西向中生代花山—姑婆山—大东山—贵东花岗岩带西段, 盛产 Sn、W、Nb、Ta 等金属矿产资源。徐克勤等(1963)在研究华南不同时代花岗岩时, 根据地质构造和花岗岩体分布特征, 提出南岭地区存在的呈东西向展布的花岗岩带应属印支期的推论。可是, 近年来精确的锆石 U-Pb 同位素定年测定结果表明, 花山和姑婆山岩基的锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 162 Ma、163 Ma(朱金初等, 2006), 表明它们属于燕山早期, 而不是印支期花岗岩。这就提出一个问题, 即为什么在华南燕山造山运动期间会出现南岭地区的燕山早期花岗岩带呈东西向分布, 而燕山晚期(142~67 Ma)花岗岩带则呈北东向展布的十分不协调的地质构造现象? 南岭地区存在的这种花岗岩形成时代(燕山早期)与强烈地壳构造运动(印支运动)不匹配的情形一直成为南岭花岗岩及南岭地质构造研究中难以解释和令人困惑的现象。我国构造-岩石学者通过仔细分析研究, 对这一现象提出 3 种可能的解释: ①

徐克勤等认为, 这是南岭花岗岩在形成时间上滞后于印支造山运动的表现(南京大学地质学系, 1981); ②黄汲清解释为印支运动被较晚的、压倒一切的燕山运动所隐蔽, 即印支期花岗岩可能已被强烈的燕山早期岩浆活动所掩盖(任纪舜, 1984); ③周新民等对华南中生代花岗岩和火山岩的 344 个同位素年龄数据进行了统计研究并指出, 早侏罗世( $J_1$ )时华南全区很少岩浆活动, 为“岩浆活动宁静期”, 其时间尺度约为 25 Ma, 认为这是由于南岭地区位处特提斯型与太平洋型两大构造域转换区造成的, 而  $J_1$  岩浆活动平静期也标志着构造格架的变换(Zhou et al., 2006)。

我们注意到南岭地区分布的花岗岩除了上述呈东西向分布及锆石 U-Pb 年龄属燕山早期的 2 个特点外, 还有 3 个与花岗岩浆动力学密切相关的重要特征: ①南岭地区存在的近东西向分布的燕山早期花岗岩体均为地表出露面积达数百平方千米的大型花岗岩基; ②南岭花岗岩的 U、Th 放射性元素含量高, 是世界平均花岗岩的 2~3 倍(张祖还等,

注: 本文为教育部科学研究重大项目(编号 306007), 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室研究项目(编号 2008-I-04)及中国核工业地质局“十一五”基础科研项目(编号 YK08)的资助成果。

收稿日期: 2011-08-21; 改回日期: 2011-11-15; 责任编辑: 周健。

作者简介: 章邦桐, 男, 1934 年生。南京大学地球科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向: 核能地质及地球化学。Email: Zhangbt304@yahoo.cn。

1991);③花岗岩体的侵位年龄是指花岗岩熔体从源区(深部岩浆房),在地壳构造(造山)运动过程中上升侵位到达地壳中的高位岩浆房的时刻( $t_E$ )。这就提出一个怎样确定花岗岩侵位年龄的问题。

关于花岗岩侵位年龄的确定,许多作者根据锆石 U-Pb 同位素体系封闭温度高( $\geq 850^\circ\text{C}$ )的特点,提出“花岗岩锆石 U-Pb 年龄可以代表花岗岩侵位年龄”的观点(付建明等,2004;吴福元等,2005;杨德明等,2005;丁昕等,2005;路孝平等,2005;葛文春等,2005;姚军明等,2005;赵子福等,2005;朱金初等,2010)。但这一观点需作进一步检验,因为这一观点如果确实客观存在,那么由于全岩 Rb-Sr 同位素体系封闭温度较低( $600\sim 650^\circ\text{C}$ ) (Harrison et al., 1979; Harris et al., 2000),就必然存在花岗岩锆石 U-Pb 年龄大于全岩 Rb-Sr 等时线年龄的规律。鉴于近年来已积累了较多花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄及全岩 Rb-Sr 等时线年龄的数据,这就为采用数学统计分析方法,判明是否存在花岗岩锆石 U-Pb 年龄大于全岩 Rb-Sr 等时线年龄的规律,从而为探讨“花岗岩锆石 U-Pb 年龄可以代表花岗岩侵位年龄”的观点能否成立提供了条件。

此外,根据花岗岩熔体侵位在地壳较深部位而地壳岩石热导率很低的特点,我们推断体积巨大、放射性元素含量高的南岭花岗岩冷却-结晶所需时间较长,存在较大侵位-结晶时差。鉴于近年来的研究结果表明,花岗岩锆石 U-Pb 年龄代表的仍是花岗岩的结晶年龄而非侵位年龄(章邦桐等,2008, 2010b),因此我们提出,根据花岗岩体及围岩的地质及热物理参数,通过热传导理论计算获得花岗岩的侵位-结晶时差,再结合花岗岩锆石 U-Pb 定年结果反演计算出花岗岩侵位年龄的方法。据此,本文选择了南岭地区 2 个有代表性的、与金属矿产关系密切的、主体属燕山早期的花山和姑婆山花岗岩基作为研究对象,计算其侵位-结晶时差及侵位年龄并探讨它们的构造意义。

## 1 花岗岩锆石 U-Pb 年龄及全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比

为了阐明是否存在花岗岩锆石 U-Pb 年龄( $t_{Zr}$ )大于花岗岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄( $t_{Rb}$ )的规律,我们对花岗岩体锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄数据,进行数理统计分析:一方面通过花岗岩体锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄差值( $\Delta t = t_{Zr} - t_{Rb}$ )的频数分析查明所存在的偶然误差和系

统偏差,目的在于确认是否存在锆石 U-Pb 年龄大于全岩 Rb-Sr 等时线年龄规律;另一方面探讨花岗岩体锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄值之间存在怎样的相关关系。进行统计分析的前提是客观、全面地收集测试结果,这样才能得出科学、可信的结论。因此,为保证所引用数据的可信度,我们收集了那些年龄值误差未超出允许范围,相关性好( $MSWD < 20$ , 或  $r > 0.99$ )的数据,同时为保存数据的客观性,我们没有剔除那些锆石 U-Pb 年龄小于 Rb-Sr 年龄的数据对。本文将最新收集到的国内外花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄数据(表 1)加入进行统计分析,使统计的样本数达到 305。但我们注意到,305 对数据分布很不均匀,这突出表现在 305 对数据中的 304 对数据分布在  $14\sim 968$  Ma 之间,而在  $1000\sim 1600$  Ma 之间只有 1 个数据对(No23)。考虑到该数据对缺乏代表性,因而我们对 304 对数据进行了统计分析并作出相应图件,其投影点分布均匀,更具有代表性。至于文献中缺乏可信的古老花岗岩( $> 1000$  Ma)的全岩 Rb-Sr 等时线年龄的原因,是由于 Rb-Sr 同位素体系易受后期变质-构造热事件干扰影响的原故。总之,表 1 中所列花岗岩体数据在时空分布和岩石类型方面都具有广泛的代表性,其测定结果也具有较高的可信度。

## 2 花岗岩锆石 U-Pb 年龄表征的是花岗岩结晶年龄

### 2.1 花岗岩 $\Delta t(t_{Zr} - t_{Rb})$ 频数分析

为了验证前述关于花岗岩锆石 U-Pb 年龄可以代表花岗岩侵位年龄观点,我们首先对花岗岩体 304 对的锆石 U-Pb 年龄( $t_{Zr}$ )与全岩 Rb-Sr 等时线年龄( $t_{Rb}$ )差值( $\Delta t = t_{Zr} - t_{Rb}$ )进行对比分析。其思路是,如果花岗岩锆石 U-Pb 年龄确实能代表花岗岩侵位年龄,那么锆石 U-Pb 年龄也必将大于代表花岗岩结晶年龄的全岩 Rb-Sr 等时线年龄,即两者之差( $\Delta t$ )应为正值,从而其频数分布曲线不呈正态分布而出现明显的正偏差。

根据表 1 中所列花岗岩体 304 对锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 年龄差值( $\Delta t$ ),以横座标为  $\Delta t$ ,纵座标为频数作出频数分布直方图及相应的概率密度函数曲线示于图 1,并将频数分析所得的有关参数列于表 2。从表 2 及图 1 可以得出以下 3 点重要的认识:

(1) 304 个  $\Delta t$  值变化范围从  $+61.8\sim -71$  Ma,  $\Delta t$  既存在在表明锆石 U-Pb 年龄大于 Rb-Sr 等时线年龄的正值( $+0.02\sim +61.8$  Ma, ),也存在表明

表 1 花岗岩体 305 个锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比

Table 1 Comparison between 305 couples of zircon U-Pb age and whole-rock Rb-Sr isochron age for granite plutons

序号	地区	岩体	岩性	测年对象	定年方法	年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	Rt (%)	文献来源
207	非洲苏丹	Jabel Arusa	花岗闪长岩	锆石	U-Pb TIMS	706.8±17.8	14.8	2.09	Shang et al., 2010
				全岩	Rb-Sr	692±35 MSWD=1.15 $I_s=0.7032$			
208	非洲苏丹	Jabel Arusa	花岗闪长岩	锆石	U-Pb TIMS	707.1±16	15.1	2.14	Shang et al., 2010
				全岩	Rb-Sr	692±35 MSWD=1.15 $I_s=0.7032$			
209	非洲苏丹	Jabel Arusa	花岗闪长岩	锆石	U-Pb TIMS	707.8±21.7	15.8	2.23	Shang et al., 2010
				全岩	Rb-Sr	692±35 MSWD=1.15 $I_s=0.7032$			
210	西藏康马	康马	二云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	493±14 MSWD=1.6 $n=5$	8.5	1.72	夏斌等, 2008
				全岩	Rb-Sr	484.5±6.34 $I_s=0.7186$			王俊文等, 1981
211	西藏康马	康马	二云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	484±14	-0.5	-0.1	德蓬, 1984
				全岩	Rb-Sr	484.5±6.34 $I_s=0.7186$			王俊文等, 1981
212	西藏	冈仁波齐	花岗闪长岩	锆石	U-Pb	48.3±1.5 MSWD=0.11 $n=14$	3.3	6.83	夏斌等, 2007
				全岩	Rb-Sr	45			
213	西藏墨竹	邦铺	花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	13.9±0.3 MSWD=3.05	0.02	0.14	周雄等, 2010a
				全岩	Rb-Sr	13.88±0.38 $I_s=0.706207$			周雄等, 2010b
214	赣南广昌	付坊	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	443.1±4.6 MSWD=0.25 $n=7$	-27.5	-6.21	张芳荣等, 2010
				全岩	Rb-Sr	470.6±0.8			黄标等, 1993
215	赣南广昌	付坊	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	443.9±3.5 MSWD=1.09 $n=13$	-26.7	-6.01	张芳荣等, 2010
				全岩	Rb-Sr	470.6±0.8			黄标等, 1993
216	赣南广昌	付坊	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	443.6±3.9 MSWD=0.61 $n=8$	-27	-6.09	张芳荣等, 2010
				全岩	Rb-Sr	470.6±0.8			黄标等, 1993
217	赣南广昌	付坊	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	446±2	-24.6	-5.52	谢明明等, 2000
				全岩	Rb-Sr	470.6±0.8			黄标等, 1993
218	赣南寻乌	白面石	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	241±7 MSWD=3.6 $n=6$	-8.9	-3.69	董晨阳等, 2010
				全岩	Rb-Sr	249.9±5.5 MSWD=6.38			陈培荣等, 2000
219	赣南	张天堂	花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±7 MSWD=1.6 $n=10$	3	1.89	Mao et al., 2010
				全岩	Rb-Sr	156 $I_s=0.71087$			沈渭洲等, 2007
220	赣南大余	西华山	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	156±4	5	3.21	刘家齐等, 2002
				全岩	Rb-Sr	151±6 $I_s=0.7181$			陈志雄, 1986
221	赣南大余	西华山	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	156±4	16.9	10.83	刘家齐等, 2002
				全岩	Rb-Sr	139.1±2.4 $I_s=0.7219$			丁悌平, 1986
222	赣南大余	西华山	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	156±4	1	0.64	刘家齐等, 2002
				全岩	Rb-Sr	155±2 $I_s=0.7169$			李亿斗等, 1986
223	赣南会昌	富城	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	239±17 $n=6$	9	3.77	于津海等, 2007
				全岩	Rb-Sr	230±23 MSWD=1.4 $I_s=0.7173$			江西地质矿产调查研究大队 <sup>①</sup>
224	赣南会昌	富城	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	231±16 $n=6$	1	0.43	于津海等, 2007
				全岩	Rb-Sr	230±23 MSWD=1.4 $I_s=0.7173$			江西地质矿产调查研究大队 <sup>①</sup>
225	赣南会昌	富城	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	239±17 $n=6$	23	9.62	于津海等, 2007
				全岩	Rb-Sr	216±6 MSWD=1.2 $I_s=0.7194$			江西地质矿产调查研究大队 <sup>①</sup>
226	赣南会昌	富城	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	231±16 $n=6$	15	6.49	于津海等, 2007
				全岩	Rb-Sr	216±6 MSWD=1.2 $I_s=0.7194$			江西地质矿产调查研究大队 <sup>①</sup>
227	赣南大余	漂塘	黑云母钾长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	158±1.3 $n=18$	-4	-2.53	He et al., 2010
				全岩	Rb-Sr	162 $I_s=0.71381$			沈渭洲等, 2007
228	赣南大余	漂塘	黑云母钾长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	161.8±1.0	-0.2	-0.12	张文兰等, 2009
				全岩	Rb-Sr	162 $I_s=0.71381$			沈渭洲等, 2007
229	赣南全南	大吉山	白云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	151.7±1.6	-7.3	-4.81	张文兰等, 2006
				全岩	Rb-Sr	159±3			孙恭安等, 1989

续表 1

序号	地区	岩体	岩性	测年对象	定年方法	年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	Rt (%)	文献来源
230	赣南 全南	大吉山	白云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	151.7±1.6	-9.3	-6.13	张文兰等, 2006 孙恭安等, 1989
				全岩	Rb-Sr	161			
231	赣南 全南	陂头	钾长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	177.3±1.4 MSWD=1.4 $n=16$	-0.9	-0.51	He et al., 2010 范春方等, 2000
				全岩	Rb-Sr	178.2±0.84 MSWD=0.23 $I_{\text{c}}=0.70975$			
232	赣南 全南	陂头	钾长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	178.6 MSWD=0.37 $n=17$	0.4	0.22	He et al., 2010 范春方等, 2000
				全岩	Rb-Sr	178.2±0.84 MSWD=0.23 $I_{\text{c}}=0.70975$			
233	江西 武功山	山庄	花岗闪长岩	锆石	U-Pb TIMS	424±3 MSWD=2.5	13	3.07	张菲菲等, 2010 汤加富等, 1991
				全岩	Rb-Sr	411±1.2			
234	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	223.3±1.4 MSWD=1.7 $n=15$	-0.4	-0.18	罗志高等, 2010 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
235	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	216.2±1.6 MSWD=0.64 $n=6$	-7.5	-3.47	罗志高等, 2010 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
236	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	204.5±2.2 MSWD=2.7 $n=11$	-19.2	-9.39	罗志高等, 2010 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
237	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	204.5±2.8 MSWD=2.9 $n=15$	-19.2	-9.39	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
238	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	215.7±6.1 (下交点)	-8	-3.71	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
239	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (核部)	U-Pb LA-ICPMS	224.3±2.4 MSWD=0.81 $n=6$	0.6	0.27	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
240	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (边部)	U-Pb LA-ICPMS	209.2±3.8 MSWD=4.9 $n=12$	-14.5	-6.93	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
241	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (核部)	U-Pb LA-ICPMS	226.5±4.1 MSWD=1.5 $n=6$	2.8	1.24	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
242	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (边部)	U-Pb LA-ICPMS	205.1±3.9 MSWD=2.5 $n=10$	-18.6	-9.07	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
243	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (核部)	U-Pb LA-ICPMS	221.4±4 MSWD=0.34 $n=4$	-2.3	-1.04	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
244	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石 (边部)	U-Pb LA-ICPMS	203.2±4.5 MSWD=2.9 $n=11$	-20.5	-10.09	陈卫锋等, 2007 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
245	湖南 新化县	白马山	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	243±3 MSWD=0.94 $n=18$	19.3	7.94	王岳军等, 2005 陈延愚等, 1986
				全岩	Rb-Sr	223.7±2.3 $I_{\text{c}}=0.7136$			
246	湘南 衡阳	关帝庙	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	203±1.6 MSWD=0.58 $n=16$	-2	-0.99	Chen et al., 2007 沈谓洲等, 2007
				全岩	Rb-Sr	205 $I_{\text{c}}=0.72125$			
247	湘南 衡阳	关帝庙	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	208±3.2 MSWD=4.9 $n=18$	3	1.44	Chen et al., 2007 沈谓洲等, 2007
				全岩	Rb-Sr	205 $I_{\text{c}}=0.72125$			
248	湖南 宁乡	浏山	二云母花岗岩 (巷子口超单元)	锆石	U-Pb LA-ICPMS	187.4±3.5 MSWD=4.4	1.4	0.75	丁兴等, 2005 Glinder et al., 1996
				全岩	Rb-Sr	186			
249	湖南 宁乡	浏山	二云母花岗岩 (巷子口超单元)	锆石	U-Pb LA-ICPMS	184.9±5.1 MSWD=2.5	-1.1	-0.59	丁兴等, 2005 Glinder et al., 1996
				全岩	Rb-Sr	186			
250	湖南	瓦屋堂	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	204±3 MSWD=4.3 $n=15$	0	0	Chen et al., 2007 Glinder et al., 1996
				全岩	Rb-Sr	204 $I_{\text{c}}=0.72745$			

续表 1

序号	地区	岩体	岩性	测年对象	定年方法	年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	Rt (%)	文献来源
251	湘东南	黄沙坪	花岗斑岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	152±3 MSWD=0.93 $n=9$	4	2.63	雷泽恒等, 2010
				全岩	Rb-Sr	148±1 $I_s=0.70378$			叶伯丹等, 1986
252	湘东南	黄沙坪	花岗斑岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	161.6±1.1 MSWD=0.65 $n=18$	13.6	8.42	姚军明等, 2005
				全岩	Rb-Sr	148±1 $I_s=0.70378$			叶伯丹等, 1986 汪湘等, 2007
253	湖南攸县	杉仙殿	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	220.7±1.9	9.7	4.4	王志成 <sup>①</sup>
				全岩	Rb-Sr	211±28 $I_s=0.739$			
254	湖南攸县	杉仙殿	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	221.3±3.5 MSWD=0.25 $n=7$	10.3	4.65	王志成 <sup>①</sup>
				全岩	Rb-Sr	211±28 $I_s=0.739$			王志成 <sup>①</sup>
255	云南澜沧	老厂	花岗斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	44.6±1.1 MSWD=0.55 $n=6$	-5.4	-12.11	李峰等, 2010
				全岩	Rb-Sr	50			徐楚明等, 1991
256	湖南	宝山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	158±2 MSWD=0.26 $n=12$	-3	-1.9	路远发等, 2006
				全岩	Rb-Sr	161±8.7			Mao et al., 2006
257	湖南	宝山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	162.2±1.6 MSWD=1.56 $n=9$	1.2	0.74	伍光英等, 2005
				全岩	Rb-Sr	161±8.7			Mao et al., 2006
258	湖南	宝山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	164.1±1.9 MSWD=0.63 $n=7$	3.1	1.89	伍光英等, 2005
				全岩	Rb-Sr	161±8.7			Mao et al., 2006
259	湖南	宝山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	173.3±1.9 MSWD=0.051	12.3	7.1	Wang et al., 2002
				全岩	Rb-Sr	161±8.7			Mao et al., 2006
260	湖南	宝山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb SHRIMP	172.3±1.6 MSWD=0.181	11.3	6.56	Wang et al., 2002
				全岩	Rb-Sr	161±8.7			Mao et al., 2006
261	湖南茶陵	钨田	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	155.5±1.7 MSWD=1.3 $n=8$	-9.5	-6.11	马铁球等, 2005
				全岩	Rb-Sr	165±16 $I_s=0.718$ MSWD=0.61			刘国庆等, 2008
262	湖南茶陵	钨田	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	155.5±1.7 MSWD=1.3 $n=8$	4.5	2.89	马铁球等, 2005
				全岩	Rb-Sr	151±2.4 MSWD=0.61 $I_s=0.7180$			刘国庆等, 2008
263	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	156.1 ± 2	-11.4	-7.3	庄文明等, 2000
				全岩	Rb-Sr	167.5 ± 7.5 $I_s=0.7116$ MSWD=2.4			陈小明确, 2002
264	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	156.1 ± 2	-4.9	-3.14	庄文明等, 2000
				全岩	Rb-Sr	161 ± 4 $I_s=0.7120$ MSWD=24			Li et al., 2007
265	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±2 MSWD=0.65 $n=20$	1	0.63	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	158 ± 17 $I_s=0.7082$ R=0.996			包志伟等, 2003
266	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±3 MSWD=1.8 $n=12$	1	0.63	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	158 ± 17 $I_s=0.7082$ R=0.996			包志伟等, 2003
267	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	163±3 MSWD=0.35 $n=15$	5	3.07	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	158 ± 17 $I_s=0.7082$ R=0.996			包志伟等, 2003
268	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	165±2 MSWD=1.3 $n=18$	7	4.24	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	158 ± 17 $I_s=0.7082$ R=0.996			包志伟等, 2003
269	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±2 MSWD=0.65 $n=20$	-8.5	-5.35	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	167.5 ± 7.5 $I_s=0.7116$ MSWD=2.4			陈小明确, 2002
270	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±3 MSWD=1.8 $n=12$	-8.5	-5.35	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	167.5 ± 7.5 $I_s=0.7116$ MSWD=2.4			陈小明确, 2002
271	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	163±3 MSWD=0.35 $n=15$	-4.5	-2.76	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	167.5 ± 7.5 $I_s=0.7116$ MSWD=2.4			陈小明确, 2002

续表 1

序号	地区	岩体	岩性	测年对象	定年方法	年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	Rt (%)	文献来源
272	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	165±2 MSWD=1.3 $n=18$	-2.5	-1.52	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	167.5 ± 7.5 $I_s=0.7116$ MSWD=2.4			陈小明等, 2002
273	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±2 MSWD=0.65 $n=20$	-2	-1.26	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	161 ± 4 $I_s=0.7120$ MSWD=2.4			
274	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	159±3 MSWD=1.8 $n=12$	-2	-1.26	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	161 ± 4 $I_s=0.7120$ MSWD=2.4			Li et al., 2007
275	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	163±3 MSWD=0.35 $n=15$	2	1.23	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	161 ± 4 $I_s=0.7120$ MSWD=2.4			
276	广东	佛冈	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	165±2 MSWD=1.3 $n=18$	4	2.42	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	161 ± 4 $I_s=0.7120$ MSWD=2.4			
277	广东 龙口	南昆山	A型花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	158±5 MSWD=2.8 $n=12$	-2	-1.27	Li et al., 2007
				全岩	Rb-Sr	160 ± 8 $I_s=0.706$ MSWD=0.07			
278	广东 龙口	南昆山	A型花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	147±0.8 MSWD=1.3 $n=18$	-13	-8.84	刘昌实等, 2007
				全岩	Rb-Sr	160 ± 8 $I_s=0.706$ MSWD=0.07			Li et al., 2007
279	广东 河源	白石岗	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	157.8±2.3 MSWD=7.4 $n=27$	10.9	6.91	胡建等, 2006
				全岩	Rb-Sr	146.9 ± 0.3 $I_s=0.7155$ MSWD=1.3			邱检生等, 2007
280	广东 河源	白石岗	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	148.5±1.6 MSWD=3.24	1.6	1.08	邱检生等, 2007
				全岩	Rb-Sr	146.9 ± 0.3 $I_s=0.7155$ MSWD=1.3			邱检生等, 2007
281	广东 乳源	大东山	黑云母花岗岩(主体)	锆石	U-Pb SHRIMP	159±2 MSWD=3.9 $n=12$	1	0.63	黄会清等, 2008
				全岩	Rb-Sr	158 ± 16 $I_s=0.7160$ MSWD=9.4			
282	广东 乳源	大东山	黑云母花岗岩(主体)	锆石	U-Pb SHRIMP	165±2 MSWD=15 $n=14$	7	4.24	黄会清等, 2008
				全岩	Rb-Sr	158 ± 16 $I_s=0.7160$ MSWD=9.4			
283	广东 乳源	大东山	黑云母花岗岩(主体)	锆石	U-Pb SHRIMP	159±2 MSWD=3.9 $n=12$	0	0	黄会清等, 2008
				全岩	Rb-Sr	159			地质矿产部南岭项目花岗岩 专题组, 1989
284	广东 乳源	大东山	黑云母花岗岩(主体)	锆石	U-Pb SHRIMP	165±2 MSWD=15 $n=14$	6	3.64	黄会清等, 2008
				全岩	Rb-Sr	159			地质矿产部南岭项目花岗岩 专题组, 1989
285	广东 乳源	大东山	黑云母花岗岩(主体)	锆石	U-Pb LA-ICPMS	154.3±6.1 (下交点) MSWD=0.21	-3.7	-2.4	张敏等,2003
				全岩	Rb-Sr	158 ± 16 $I_s=0.7160$ MSWD=9.4			黄会清等,2008
286	广东 贵东杂岩体	司前	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	151±11 MSWD=7.4 $n=27$	5	3.4	徐夕生等,2003
				全岩	Rb-Sr	146			张成江, 1991
287	广东 贵东杂岩体	司前	二云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	157.8±2.3 MSWD=0.25 $n=5$	11.8	7.48	孙涛等,2003
				全岩	Rb-Sr	146			张成江,1991
288	广东 连县	诗洞	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	461±35 MSWD=6.4	18	3.9	徐夕生等,2007
				全岩	Rb-Sr	443±11 $I_s=0.7165$			伍广宗等, 1986
289	广东 增城	云开	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	486±23	11	2.26	刘建雄等,2003
				全岩	Rb-Sr	475±28 MSWD=15			张亚明等,2000
290	广东 增城	云开	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb TIMS	489±14	14	2.86	刘建雄等, 2003
				全岩	Rb-Sr	475±28 MSWD=15			张亚明等, 2000
291	广东 仁化	长江	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	163.6±12.5	-7.1	-4.34	Deng, 1992
				全岩	Rb-Sr	170.7 ± 3.9 $I_s=0.7143$			

续表 1

序号	地区	岩体	岩性	测年对象	定年方法	年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	Rt (%)	文献来源
292	湖南常宁	水口山	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	163±2 MSWD=1.2 $n=15$	15	9.2	马丽艳等, 2006
				全岩	Rb-Sr	148			刘阳生等, 2003
293	湖南桂阳	铜山岭	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	181.5±8.8 (下交点) MSWD=2.4 $n=12$	9	4.96	王岳军等, 2001
				全岩	Rb-Sr	172.5			刘阳生等, 2003
294	湖南桂阳	铜山岭	花岗闪长岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	171±1.6 (下交点) MSWD=3.9 $n=12$	-1.5	-0.88	王岳军等, 2001
				全岩	Rb-Sr	172.5			刘阳生等, 2003
295	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	94±4 $n=11$ MSWD=1.36	-21	-22.34	李华芹等, 2008
				全岩	Rb-Sr	115±3			韩凤彩等, 2007
296	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	94±4 $n=11$ MSWD=1.36	-5	-5.32	李华芹等, 2008
				全岩	Rb-Sr	99			韩凤彩等, 2007
297	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	93±1 $n=8$ MSWD=1.6	-22	-23.66	蔡明华等, 2006
				全岩	Rb-Sr	115±3			韩凤彩等, 2007
298	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb SHRIMP	93±1 $n=8$ MSWD=1.6	-6	-6.45	蔡明华等, 2006
				全岩	Rb-Sr	99			韩凤彩等, 2007
299	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	102±2	3.4	3.33	章振根等, 1984
				全岩	Rb-Sr	98.6±1.9 $I_s=0.7090$ MSWD=0.99			李华芹等, 2008
300	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	102±2	3	2.94	章振根等, 1984
				全岩	Rb-Sr	99			韩凤彩等, 2007
301	广西南丹	大厂	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	102±2	-13	-12.75	章振根等, 1984
				全岩	Rb-Sr	115±3			韩凤彩等, 2007
302	广西苗儿山	豆乍山	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	228±11 MSWD=2.5 $n=4$	14	6.14	谢晓华等, 2008
				全岩	Rb-Sr	214 ± 13 $I_s=0.7264$ MSWD=1.7			王志成 <sup>®</sup>
303	广西苗儿山	豆乍山	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	228±11 MSWD=2.5 $n=4$	14	6.14	谢晓华等, 2008
				全岩	Rb-Sr	214 ± 3 $I_s=0.71265$ $R=0.998$			徐伟昌等, 1994
304	广西钦州	台马	紫苏辉石花岗岩	锆石	U-Pb	235.2±2 MSWD=3.9 $n=12$	14.22	6.05	何令仪等, 1986
				全岩	Rb-Sr	220.98 ± 12.8			
305	广东贵东杂岩体	隘子	角闪黑云母花岗岩	锆石	U-Pb LA-ICPMS	160.1±6.1 MSWD=7.4 $n=16$	3.1	1.94	徐夕生等, 2003
				全岩	Rb-Sr	157			林锦荣, 1992

注: 序号 1~32 具体内容请参阅吴俊奇等(2007); 33~64 具体内容请参阅章邦桐等(2008); 65~111 具体内容请参阅章邦桐等(2010a); 112~164 具体内容请参阅章邦桐等(2011); 165~206 具体内容请参阅章邦桐等(2010b)。

表 2 304 个花岗岩体锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄差值 ( $\Delta t$ ) 频数分析特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the frequency analysis of 304 age differences ( $\Delta t$ ) between the results of zircon U-Pb dating and whole rock Rb-Sr dating for granite plutons

样本数 $n$	最小值(Ma)	最大值(Ma)	均值(Ma)	众数(Ma)	中位数(Ma)	偏度系数 $C_{SK}$	峰度系数 $C_{KU}$
304	-71	61.8	-0.15	1.0	0.06	-0.226	6.378

锆石 U-Pb 年龄小于全岩 Rb-Sr 等时线年龄的负值 (-0.2 ~ -71 Ma)。值得注意的是, 在这 304 数据对中两个  $\Delta t$  差值最大的花岗岩 (No94, No29) 均属元古宙花岗岩, 前者 ( $\Delta t = -71$  Ma) 为皖南休宁花岗闪长岩, 其锆石 U-Pb 年龄为 892 Ma, 后者 ( $\Delta t = 61.8$  Ma) 为印度黑云母片麻状花岗岩体, 其锆石 U-Pb 年龄为 967.8 Ma, 但它们的相对年龄差 (Rt) 均低于 10% (表 1)。

(2) 从频数分析中可以得到均值和众数 2 个重要的统计参数 (表 2)。均值即算术平均值是人们熟悉而最常使用的, 但它易受到“极端数值” (即非常大或非常小的变量值) 的影响。众数表征的是出现频数最多的变量值, 它的特点是不受“极端数值”的影响, 可代表所统计样本的集中趋势。从表 2 可见, 304 个样本  $\Delta t$  频数分析得到的众数为 +1.0 Ma, 均值为 -0.15 Ma, 两者相差很小, 均在同位素年龄测

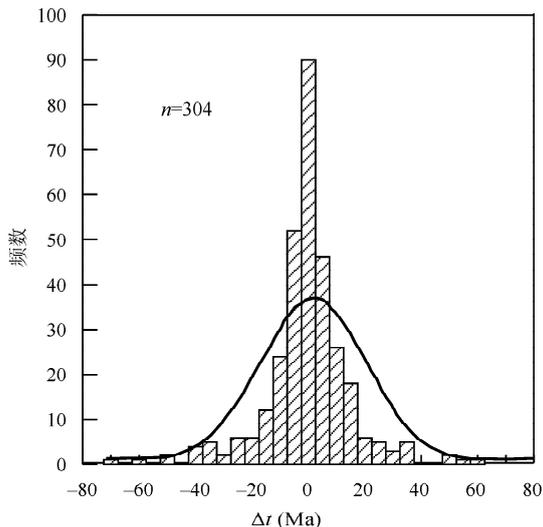


图1 304个花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄差值( $\Delta t$ )直方图及其概率密度函数曲线

Fig. 1 Histogram and probability density function curve for 304 age differences ( $\Delta t$ ) between the zircon U-Pb age and the whole-rock Rb-Sr isochron age for granite plutons

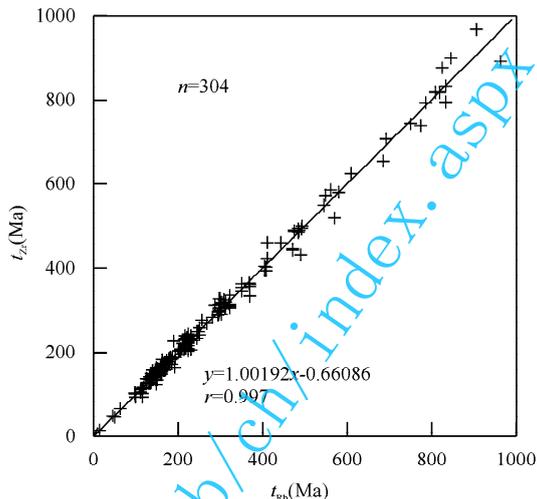


图2 304个花岗岩体锆石 U-Pb 年龄值( $t_{Zr}$ )与全岩 Rb-Sr 等时线年龄值( $t_{Rb}$ )的相关图

Fig. 2 Correlation diagram between 304 couples of the zircon U-Pb age ( $t_{Zr}$ ) and the whole-rock Rb-Sr isochron age ( $t_{Rb}$ ) of granite plutons

定的允许误差范围内。

(3) 304个花岗岩  $\Delta t$  值的频数分布直方图呈两端低、中间高,两侧呈对称分布,用于度量分布不对称程度的偏度系数( $C_{SK}$ )为 $-0.226$ ,低于标准正态分布曲线的临界值( $C_{SK} = 0.4383$ ),这表明花岗岩体  $\Delta t$  值服从正态分布,意味着  $\Delta t$  的变化属偶然因素支配,不存在锆石 U-Pb 年龄值大于全岩 Rb-Sr 等时线年龄值的正偏差。

## 2.2 花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄的线性回归分析

将花岗岩体 304 个成对的锆石年龄值和 Rb-Sr 年龄值投影在两种年龄值的座标图上(图 2),并将其拟合的线性回归参数列于表 3。从表 3 及图 2 可见以下特征:

(1) 所统计花岗岩体的年龄值的时间分布区间很宽,由中生代到元古宙,因而具有广泛的代表性。

(2) 利用最小二乘法原理,拟合出花岗岩体锆石 U-Pb 年龄( $t_{Zr}$ )对全岩等时线年龄( $t_{Rb}$ )的线性回归方程为:

$$t_{Zr} = 1.00192t_{Rb} - 0.66086 \quad (1)$$

(3) 所拟合的回归系数为 1.00192,即斜率接近 1,常数项( $t_0$ )为 $-0.66086$ ,拟合方程(1)的相关系数很高( $r = 0.997$ ),表明花岗岩体的 Rb-Sr 年龄与锆石 U-Pb 年龄是一致的。

表 3 304 个花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及全岩 Rb-Sr 等时线年龄拟合的线性回归参数

Table 3 Linear regression parameters fitted to 304 couples of the zircon U-Pb age and the whole-rock Rb-Sr isochron age of granite plutons

拟合对象	斜率	截距	相关系数 $r$	95% 置信区间 (斜率)	
				下界	上界
花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及全岩 Rb-Sr 等时线年龄	1.00192	-0.66086	0.997	0.993	1.011

(4) 回归系数 T 检验表明,95% 的置信区间为 0.993~1.011,不包含 0 值,这表明该回归的线性关系在总体水平上是成立、合理的。

总之,上述这些特征表明花岗岩体锆石 U-Pb 定年的测定结果与全岩 Rb-Sr 等时线定年测定结果在允许误差范围内是一致的,不存在花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄大于花岗岩全岩 Rb-Sr 年龄的规律。

## 3 花山和姑婆山花岗岩基地质概况

花山和姑婆山花岗岩基位于南岭东西向构造岩浆带西段,广西钟山、平乐和恭城三县交界处。花山花岗岩基的地表出露面积约 530 km<sup>2</sup>,岩性为中粗粒(斑状)黑云母花岗岩(主体),斑状角闪黑云二长花岗岩(边部)。姑婆山岩基出露面积约 560 km<sup>2</sup>,主要岩

性为中粗粒(斑状)黑云母花岗岩。花山和姑婆山花岗岩基侵入于寒武系及泥盆系—石炭系中(图 3),接触带上热变质现象强烈,表明它们属岩浆成因。

花山花岗岩主体的全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 164.7 Ma(朱金初等,1988),锆石 U-Pb 年龄为  $162 \pm 1$  Ma(朱金初等,2006)。姑婆山岩体的全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 159.6 Ma(张德全等,1985),锆石 U-Pb 年龄为 163 Ma(朱金初等,2006)。花山花岗岩体的放射性元素平均含量为:U  $13.5 \times 10^{-6}$ , Th  $56.1 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O$  5.79%, 姑婆山花岗岩体的放射性元素平均含量为:U  $13.7 \times 10^{-6}$ , Th  $52.4 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O$  5.28%(朱金初等,2007)。

### 4 侵位年龄的计算

为了确定花山和姑婆山花岗岩基的侵位年龄,本文在确定岩体热物理及有关地球化学参数的前提下,分别计算出花山和姑婆山花岗岩熔体温度由初始温度( $T_m$ )逐渐冷却降低至结晶温度( $T_c$ )的冷却时间( $\Delta t_{cool}$ )、结晶潜热释放延长结晶作用的时间( $\Delta t_L$ )及花岗岩熔体在冷却-结晶过程中产生的放射成因热延长花岗岩熔体的冷却-结晶时间( $\Delta t_A$ ),由此得出侵位-结晶时差。然后再根据岩体的结晶年龄反演计算得出岩体的侵位年龄。

#### 4.1 花岗岩地质-热物理参数

##### 4.1.1 花岗岩熔体初始温度、结晶温度

(1)花岗岩熔体初始温度:实验岩石学研究表

明,岩石熔融一般在过热状态(即高于液相线温度)下才会发生,对现代长英质火山熔岩流温度测试结果也证实了这一结论。Dowty(1980)所作花岗岩的熔融实验结果表明,含 3.5%  $H_2O$  花岗岩闪长岩的液相线温度为  $950^\circ C$ 。据此,我们设定花岗岩浆的初始温度  $T_m$  为  $950^\circ C$ 。

(2)花岗岩熔体结晶温度:鉴于花岗岩主要由石英、长石、云母等造岩矿物所组成,当花岗岩造岩矿物全部结晶固结时,其 Rb-Sr 同位素体系也将停止扩散交换。因此,花岗岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄能较好地表征花岗岩的结晶年龄。全岩 Rb-Sr 同位素封闭温度较低,一般为  $600 \sim 650^\circ C$  (Harris et al., 2000; Harrison et al., 1979)。据此,我们设定花岗岩浆的结晶温度  $T_c$  为  $600^\circ C$ 。

##### 4.1.2 岩体边长、侵位深度及围岩初始温度、围岩热传导率的确定

(1)岩体边长估算:根据花山和姑婆山花岗岩基地表出露面积,将其简化为 1/2 边长( $D$ )为 11.5 km 和 11.8 km 的立方体模型。

(2)侵位深度估算:花山和姑婆山花岗岩基的侵位深度采用岩体侵位时上覆地层厚度方法进行估算:花山和姑婆山岩基侵位于寒武纪—石炭纪地层中,根据地层资料统计,岩基所在地区寒武纪—三叠纪地层的总厚度约为 5500 m,可作为花山和姑婆山岩基侵位的深度。

(3)围岩热传导率:根据现有地热资料,地壳中

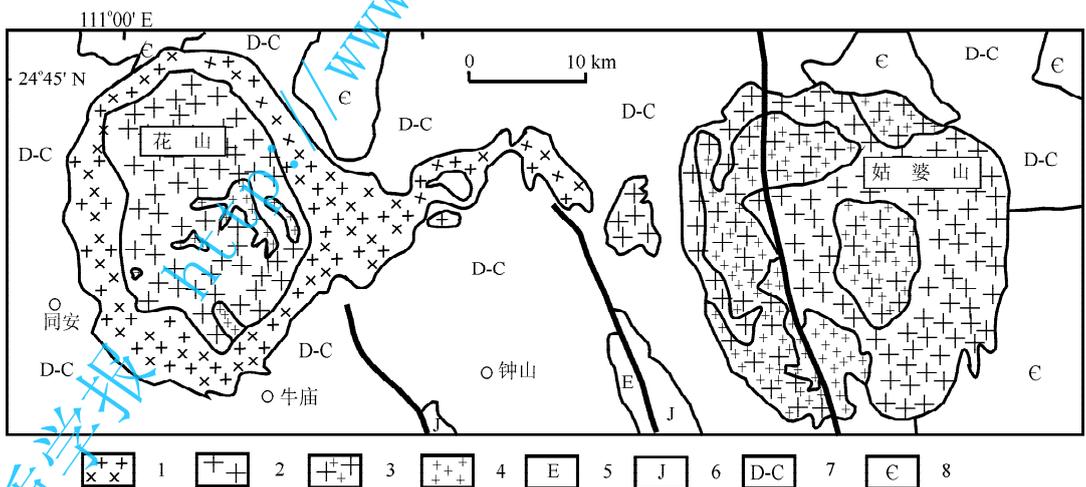


图 3 花山-姑婆山花岗岩基地质简图(据朱金初等,2007)

Fig. 3 Geological sketch map of Huashan-Guposhan granite batholiths (after Zhu et al., 2006)

1—角闪石黑云母二长花岗岩; 2—中粗粒斑状黑云母花岗岩; 3—中细粒斑状黑云母花岗岩; 4—细粒花岗岩; 5—古近系; 6—侏罗系; 7—泥盆系—石炭系; 8—寒武系

1—Hornblende-biotite monzonitic granite; 2—coarse-medium porphyritic biotite granite; 3—medium-fine-grained porphyritic biotite granite; 4—fine-grained granite; 5—Eogene system; 6—Jurassic system; 7—Devonian-Carboniferous system; 8—Cambrian system

各种沉积岩的平均热导率分别为:板岩 6.2 TCU; 灰岩 5.28 TCU; 粘土 5.3 TCU; 砂岩 7.75 TCU; 平均值为 6.13 TCU ( $1\text{TCU} = 0.4187 \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )。据此,我们设花山和姑婆山花岗岩基沉积围岩的热导率为 6.13 TCU。

(4) 围岩初始温度  $T_w$ : 设地表温度值为  $20^\circ\text{C}$ , 根据中-新生代造山区的大地热流平均值 (1.92 HFU) 及沉积岩的平均导热率 (6.13 TCU), 求得围岩初始温度  $T_w$  为  $196^\circ\text{C}$ 。

#### 4.1.3 花山和姑婆山花岗岩基放射性产热率 $Q_A$

将花山和姑婆山花岗岩基的 U、Th、K 平均含量及年龄校正系数代入花岗岩初始放射性生热率 ( $Q_A$ ) 的计算公式 (章邦桐等, 2010c), 得出花山和姑婆山的放射性产热率  $Q_A$  分别为  $95.9 \times 10^{-6} \text{ J/g} \cdot \text{a}$  (19.5 HGU) 和  $92.8 \times 10^{-6} \text{ J/g} \cdot \text{a}$  (18.64 HGU)。

#### 4.1.4 花山和姑婆山花岗岩基的数学计算模型

现将计算花山和姑婆山花岗岩基侵位-结晶时差及侵位年龄的有关参数和计算结果分别列于表 4 并作出花山和姑婆山花岗岩基数学计算模型示于图 4。

表 4 计算花山和姑婆山花岗岩基侵位年龄有关的参数

Table 4 Value of thermophysical parameters used in calculation for emplacement age of Huashan-Guposhan granite batholiths

名称	参数值(花山)	参数值(姑婆山)
1/2 边长 $D$ (km)	11.5	11.8
面积 $S$ ( $\text{km}^2$ )	530	560
初始温度 $T_m$ ( $^\circ\text{C}$ )	950	950
结晶温度 $T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	600	600
距地表深度 $H$ (km)	5.5	5.5
围岩温度 $T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	196	196
大地热流值 $J$ (HFU)	1.92	1.92
热扩散率 $k$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	2.92	2.92
结晶潜热 $Q_L$ (J/g)	293	293
结晶年龄(Ma)	162	163
U( $\times 10^{-6}$ )	13.5	13.7
Th( $\times 10^{-6}$ )	56.1	52.4
K(%)	5.79	5.28
放射性产热率	95.9	92.8
$Q_A$ ( $\text{J/g} \cdot \text{Ma}$ )	(19.25 HGU)	(18.64 HGU)

#### 4.2 花山和姑婆山花岗岩基冷却时间 $\Delta t_{col}$

花山和姑婆山花岗岩基在地表出露的形态为不规则等轴形 (图 3)。华南地区重力场研究表明, 华南花岗岩重力异常为  $-10 \times 10^{-5} \sim -30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 岩体地下形态大多呈近似透镜体或板状体, 厚度为 5~15 km (王懋基, 1985)。这说明本文采用简化的立方体模型进行计算是合理的。因此,

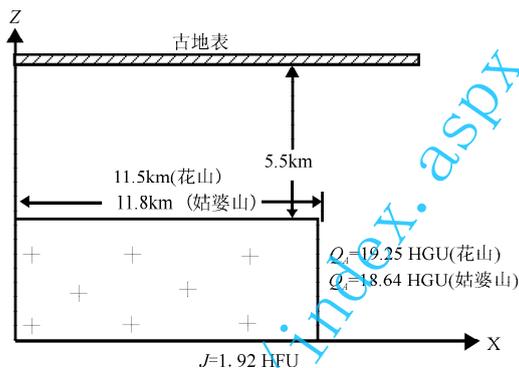


图 4 花山和姑婆山花岗岩基的数学计算模型

Fig. 4 Mathematic calculating model for Huashan-Guposhan granite batholiths

本文根据简化的立方体数学模型, 采用 Buntebarth (1984) 提出的花岗岩熔体冷却时间计算公式:

$$T_c = T_w + (T_m - T_w) \cdot \text{erf}\left(\frac{D}{2\sqrt{kt}}\right) \cdot \text{erf}\left(\frac{D}{2\sqrt{kt}}\right) \cdot \text{erf}\left(\frac{D}{2\sqrt{kt}}\right) \quad (2)$$

式中  $k$  为热扩散率;  $T_m$  为初始温度;  $T_c$  为结晶温度;  $T_w$  为围岩温度;  $D$  为 1/2 边长;

$$\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (\text{误差函数})$$

将有关参数值代入以上公式 (2), 计算得出花山和姑婆山花岗岩基冷却结晶时间 ( $\Delta t_{col}$ ) 分别为 4.14 Ma 和 4.36 Ma。

#### 4.3 花山和姑婆山花岗岩熔体结晶潜热延长结晶时间 $\Delta t_L$

本文采用根据花岗岩熔体结晶过程中所释放出的结晶潜热 ( $Q_L$ ) 将延长结晶 (保持结晶温度) 的时间 ( $\Delta t_L$ ), 直到这部分热量散失到围岩中后才继续降温冷却的原理, 推导出的  $\Delta t_L$  计算公式 (Zhang et al., 2008):

$$\Delta t_L = \frac{Q_L \cdot \Delta t_{col}}{(T_m - T_c) \cdot C_p} \quad (3)$$

式中  $Q_L$  为花岗岩熔体结晶潜热;  $\Delta t_{col}$  为花岗岩熔体由温度  $T_m$  降低到  $T_c$  需要的时间;  $C_p$  为花岗岩熔体比热容;  $T_c$  为花岗岩结晶温度;  $T_m$  为花岗岩熔体初始温度。

将花山和姑婆山花岗岩体有关参数代入式 (3), 获得岩体结晶潜热释放延长花岗岩熔体结晶的时间 ( $\Delta t_L$ ) 分别为 2.67 Ma 和 2.81 Ma。

#### 4.4 花山和姑婆山花岗岩熔体放射性成因热延长的结晶时间 $\Delta t_A$

本文采用根据花岗岩放射性元素 (U、Th、 $^{40}\text{K}$ )

的产热率等有关参数,推导出由于放射成因热延长花岗岩熔体的结晶时间( $\Delta t_A$ )的计算公式(章邦桐等,2007):

$$\Delta t_A = (\Delta t_{col} + \Delta t_L) \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{Q_A \Delta t_{col}}{(T_m - T_c) C_p} \right)^n \right] \quad (4)$$

式中  $\Delta t_A$  为放射成因热延长花岗岩熔体结晶时间;  $\Delta t_{col}$  为花岗岩熔体由初始温度( $T_m$ )降至结晶温度( $T_c$ )所需的时间;  $\Delta t_L$  为由于结晶潜热释放而延长的结晶时间;  $Q_A$  为花岗岩熔体放射性元素的产热率;  $C_p$  为花岗岩熔体比热容。

将花山和姑婆山花岗岩基有关参数及上述计算结果代入式(4),获得放射成因热延长花山和姑婆山花岗岩基的结晶时间为 37.6 Ma 和 45.1 Ma。

#### 4.5 花山和姑婆山花岗岩基侵位-结晶时差( $\Delta t_{ECTD}$ )和侵位年龄( $t_E$ )

设  $\Delta t_{ECTD}$  为花岗岩的侵位年龄与结晶年龄之差(简称侵位-结晶时差),则花岗岩熔体冷却-结晶所需的时间应等于  $\Delta t_{col}$ 、 $\Delta t_L$  及  $\Delta t_A$  之和:

$$\Delta t_{ECTD} = t_E - t_C = \Delta t_{col} + \Delta t_L + \Delta t_A \quad (5)$$

式中  $\Delta t_{ECTD}$  为花岗岩的侵位-结晶时差;  $t_E$  为花岗岩侵位年龄;  $t_C$  为花岗岩结晶年龄;  $\Delta t_{col}$  为花岗岩熔体由初始温度降低到结晶温度需要的时间;  $\Delta t_L$  为结晶潜热延长结晶的时间;  $\Delta t_A$  为放射性成因热延长冷却-结晶过程的时间。

将(5)式移项,得出花岗岩侵位年龄( $t_E$ )的计算公式:

$$t_E = t_C + (\Delta t_{col} + \Delta t_L + \Delta t_A) \quad (6)$$

式中符号说明同式(5)。

将花山和姑婆山花岗岩基的  $\Delta t_{ECTD}$ 、 $t_C$  值代入式(6),得花山和姑婆山花岗岩基的侵位年龄  $t_E$  为 206.16 Ma 和 215.27 Ma。

## 5 讨论及小结

### 5.1 花山和姑婆山花岗岩基的初始 U、Th 含量

U、Th 地球化学研究表明,虽然各种岩浆岩(从超基性岩到花岗岩)中 Th、U 含量变化可达 2 个数量级,但未经岩浆期后热液作用或表生作用改造的各种岩浆岩的 Th/U 比值却稳定地保持在 3~5 之间。因此,可以根据所研究花岗岩的 Th/U 比值来判断其 Th、U 含量能否代表熔体的初始 U、Th 含量,即花岗岩的 Th/U 若为 3~5 则表明其 Th、U 值可以代表所研究花岗岩的初始含量。根据表 4 中的 Th、U 含量计算得出花山和姑婆山花岗岩基的 Th/U 分别为 4.15 和 3.82。这表明花山和姑婆山

花岗岩基现今的 U、Th 含量经过年龄( $t_c$ )校正能代表该岩基的初始 U、Th 含量。

### 5.2 放射成因热是延长花岗岩熔体结晶时间的重要因素

从上述计算结果(表 5)可以看出,花山和姑婆山花岗岩由于放射成因热延长花岗岩熔体的结晶时间长达 37.6 Ma 和 45.1 Ma,这一时间尺度远大于花山和姑婆山花岗岩的冷却时间(4.14 Ma, 4.36 Ma)和结晶时间(2.67 Ma, 2.81 Ma)。为了检验该计算结果的可信性,我们假设花山花岗岩的放射性元素含量和世界平均花岗岩的放射性元素含量( $U$   $5 \times 10^{-6}$ ,  $Th$   $20 \times 10^{-6}$ ,  $K_2O$  2.66%, Krauskopf, 1979)一样,而其他所有参数均不改变的条件下,将这些参数代入式(4),计算得出的放射成因热延长花岗岩熔体的结晶时间( $\Delta t_A^*$ )仅为 3.17 Ma(图 5),其侵位-结晶时差( $\Delta t_{ECTD}^*$ )仅为 9.98 Ma(图 5)。换言之,如果花岗岩体的放射性元素含量较低(与世界平均花岗岩相当),那么其侵位年龄(171.98 Ma)与结晶年龄相差甚小( $< 10$  Ma),均属燕山早期。由此可见,放射成因热延长花岗岩熔体的结晶时间是影响花岗岩侵位结晶时差长短的重要因素,同时也佐证了该计算公式的可信性。

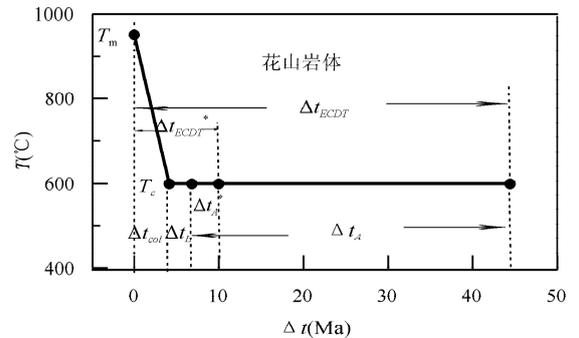


图 5 花山花岗岩熔体冷却-结晶的温度-时间关系示意图(图中各符号代表参数的意义见文中解释)

Fig. 5 The schematic illustration of the cooling-crystallization process for the Huashan granite batholith (A detailed explanation for symbols is given in text)

### 5.3 体积是决定花岗岩体侵位-结晶时差尺度的最主要因素

我们注意到影响花岗岩熔体冷却-结晶时间的因素虽然较多,但据现有花岗岩资料分析,只有代表花岗岩体积的地表出露面积相差最为悬殊,可达 3 个数量级(从千余平方千米到不足  $1 \text{ km}^2$ ),而其余参数如花岗岩熔体的初始温度、结晶温度、侵位深

表 5 花山及平均花岗岩基侵位-结晶时差( $\Delta t_{ECDT}$ )和侵位年龄( $t_E$ )计算结果Table 5 Calculating results for  $\Delta t_{ECDT}$  and  $t_E$  of the Huashan and average granites batholith

花岗岩体	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	K <sub>2</sub> O (%)	Q <sub>A</sub> (J/g·Ma <sup>-1</sup> )	$t_C$ (Ma)	$\Delta t_{col}$ (Ma)	$\Delta t_L$ (Ma)	$\Delta t_A$ (Ma)	$\Delta t_{ECDT}$ (Ma)	$t_E$ (Ma)
花山	13.5	56.1	5.79	95.9	162	4.14	2.67	37.6	44.41	206.16
平均花岗岩	5	20	2.66	35.09	162	4.14	2.67	3.17	9.98	171.98

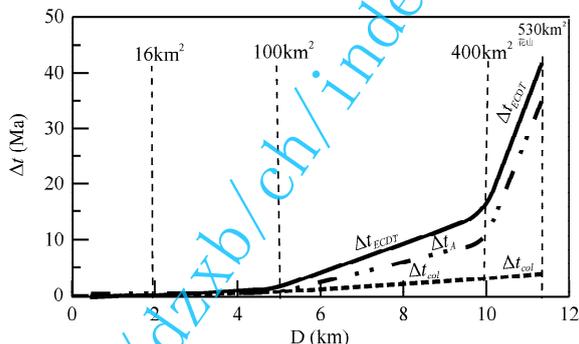
度、围岩温度、放射性元素含量等变化只在同一数量级内波动。因此,为了阐明和比较花岗岩体积大小对花岗岩体侵位-结晶时差的影响,我们采用与花山岩体同样的热物理参数及放射性元素含量,对不同体积的立方体模型计算出岩体(中心)冷却到结晶固结所需要的时间列于表 6 并示于图 6。从表 6 可知花山花岗岩体具有长达 44.41 Ma 的侵位结晶时差,属印支期侵位,是在特定的地质-构造条件(岩体地表出露面积  $>400 \text{ km}^2$ ,放射性元素含量为平均花岗岩的 2~3 倍)下发生的。换言之,如果岩体比较小( $<100 \text{ km}^2$ ),放射性元素含量比较低(与世界平均花岗岩的放射性元素含量相当),那么花岗岩的侵位-结晶时差就很小( $<1.5 \text{ Ma}$ ,表 6,图 6)。

表 6 不同面积花岗岩体的  $\Delta t_{col}$ ,  $\Delta t_L$ ,  $\Delta t_A$ ,  $\Delta t_{ECDT}$   
(按花山岩体的相关参数计算)Table 6  $\Delta t_{col}$ ,  $\Delta t_L$ ,  $\Delta t_A$ ,  $\Delta t_{ECDT}$  for granite plutons  
with different outcrop area (using the parameters same  
as Huashan granite batholith)

岩体出露面积 ( $\text{km}^2$ )	$\Delta t_{col}$	$\Delta t_L$	$\Delta t_A$	$\Delta t_{ECDT}$
530(花山)	4.14 Ma	2.67 Ma	37.6 Ma	44.41 Ma
400	3.13 Ma	2.02 Ma	9.16 Ma	14.31 Ma
100	0.783 Ma	0.505 Ma	0.245 Ma	1.533 Ma
50	0.393 Ma	0.254 Ma	0.0564 Ma	0.7034 Ma
16	0.125 Ma	0.0807 Ma	0.005411 Ma	0.2111 Ma
10	79200 a	51119 a	2144 a	132463 a
4	31300 a	20202 a	332 a	51834 a
1	7830 a	5054 a	21 a	12905 a
0.1	782 a	505 a	0.21 a	1287.21 a

#### 5.4 若干花岗岩体中的多组锆石 U-Pb 年龄对 $\Delta t_{ECDT}$ 的印证

近年来,在国内外一些花岗岩锆石 U-Pb 年代学研究中发表了若干于同一花岗岩样品,甚至同一锆石颗粒中获得多组 U-Pb 年龄值的研究成果。对此现象不少学者提出了各种成因解释,例如丁昕等(2005)认为一期代表了侵位年龄,而另一期则是后期热液蚀变作用形成的;吴荣新等(2005)则认为它们是它们由不同热事件形成的。我们认为,当其年龄差值超出分析方法的允许误差范围,并排除所测定锆

图 6 花岗岩体的  $D-\Delta t_{col}$ ,  $\Delta t_A$ ,  $\Delta t_{ECDT}$  关系示意图Fig. 6  $D$  versus  $\Delta t_{col}$ ,  $\Delta t_A$ ,  $\Delta t_{ECDT}$  diagram for granite plutons

石样品受岩浆期后热液蚀变交代作用影响及不存在早期残留锆石核的情况下,所测定得到的差值可以近似地代表岩浆冷却-结晶持续的时间尺度。例如①Gehrels等(2009)在对美国 north-coastal British Columbia, Coast Mountains batholith 二长花岗岩锆石样品(05M7105)进行 U-Pb 定年测定时,在同一颗锆石中部和边部分别获得  $130.2 \pm 1.2 \text{ Ma}$  和  $96.0 \pm 2 \text{ Ma}$  年龄值。这显示该锆石在花岗岩熔体中的结晶生长持续时间长达 34.2 Ma;②汪相等(2007)在进行湘东丫江桥复式岩体中的衫仙殿二云母花岗岩锆石年代学研究时,发现衫仙殿花岗岩中存在两期锆石,早期锆石和晚期锆石的 U-Pb 年龄分别为  $220.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$  和  $171.6 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ,两者之间有约 50 Ma 的时间跨度。他指出“这种两期岩浆结晶锆石的年龄差值就相当于该花岗岩的成岩时差”;③陈卫锋等(2007)在对湖南白马山岩体二云母花岗岩锆石样品(HBMS-24)进行 U-Pb 定年测定时,在锆石核部和边部分别获得年龄值为  $204 \pm 1.2 \text{ Ma}$  和  $176 \pm 1.7 \text{ Ma}$ 。这显示该锆石在花岗岩熔体中的结晶生长持续时间长达 28 Ma;④于津海等(2007)在研究闽西南红山岩体锆石 U-Pb 年代学时,在一个未受热液蚀变影响的锆石样品(TX121-2)中获得两组 U-Pb 年龄(250 Ma, 214 Ma),其年龄差值达 36 Ma,并指出“它们代表了花岗岩浆的结晶历史”。

以上有关花岗岩锆石 U-Pb 定年实例表明,花

花岗岩结晶持续时间可长达 28 Ma 至 50 Ma, 远远超出 U-Pb 定年允许误差范围, 从而为花岗岩存在较大“侵位-结晶时差”提供了可信的佐证。

## 5.5 花山和姑婆山花岗岩基侵位年龄的地质-构造意义

根据岩体地质构造特征(地表出露面积、侵位深度等)、有关的热物理参数及主体花岗岩的放射性元素含量, 计算出花山和姑婆山花岗岩基冷却-结晶时间长达 44.41 Ma 和 52.27 Ma, 结合其同位素结晶年龄(162 Ma, 163 Ma)得出花山和姑婆山花岗岩基岩体从深部岩浆源上升侵位进入高位岩浆房时刻, 即侵位年龄分别为 206.16 Ma 和 215.27 Ma。这意味着花山和姑婆山花岗岩基侵位于印支构造旋回(230~195 Ma), 为其属印支造山运动产物提供了重要佐证。这一方面显示了近东西向展布的南岭中生代造山带具有印支期构造格架(以侵位年龄为代表)和燕山期花岗岩(以锆石 U-Pb 年龄, 全岩 Rb 等时线年龄为代表)的双重特征, 同时也为在南岭花岗岩及南岭地质构造研究中长期存在的令人困惑的现象, 即在华南燕山造山运动期间出现南岭地区的燕山早期花岗岩带呈东西向分布, 而燕山晚期花岗岩带则呈北东向展布的十分不协调的地质构造现象作出了合理的解释。

## 注 释

- ① 江西地质矿产调查研究大队. 1990. 江西省会昌地区花岗岩岩浆作用及其与成矿作用的关系. 1~102
- ② 王志成. 2003. 南岭湘桂段中生代壳源岩浆作用和铀成矿作用. 南京大学地球科学系博士学位论文, 32~37.

## 参 考 文 献

包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. 地质地球化学, 31(1): 52~60.

蔡明华, 何龙清, 刘国广, 吴德成, 黄惠明. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 52(3): 409~414.

陈培荣, 范春方, 孔兴功, 章邦桐, 钟启龙, 易作凡. 2000. 6710 铀矿区火成岩的地球化学特征及其构造和成矿意义. 铀矿地质, 16(6): 334~342.

陈廷愚, 王雪英, 任纪舜, 刘志刚. 1986. 湖南九嶷山及白马山复式花岗岩体的同位素地质年代测定. 地质论评, 32(5): 431~439.

陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究. 中国科学(D辑), 37(7): 873~883.

陈小明, 王汝成, 刘昌实, 胡欢, 张文兰, 高剑峰. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因. 高校地质学报, 8(3): 292~307.

陈志雄. 1986. 江西西华山黑云母花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄, 见: 叶伯

丹, 申永冶, 朱杰辰编. 全国同位素地质年龄汇编(第四辑). 565.

德蓬索内特雅克. 1984. 中法喜马拉雅考察成果. 北京: 地质出版社, 295~304.

地质矿产部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~471.

丁梯平. 1986. 江西西华山黑云母花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄, 见: 叶伯丹, 申永冶, 朱杰辰编. 全国同位素地质年龄汇编(第四辑). 554.

丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿质花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. 高校地质学报, 11(3): 383~389.

丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 黄宏业, 周新民. 2005. 湖南沅山花岗岩中锆石定年: 成岩启示和意义. 中国科学(D辑), 35(7): 606~616.

董晨阳, 赵葵东, 蒋少涌, 陈卫锋, 陈培荣, 凌洪飞, 杨水源. 2010. 赣南白面石铀矿区花岗岩的锆石年代学、地球化学及成因研究. 高校地质学报, 16(2): 149~160.

范春方, 陈培荣. 2000. 赣南陂头 A 型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造环境. 地球化学, 29(4): 358~366.

付建明, 马昌前, 谢才富. 2004. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 28(4): 379~387.

葛文春, 吴福元, 周长勇. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 岩石学报, 21(3): 749~762.

韩风采, 张诗启, 蔡明海. 2007. 广西大厂锡多金属矿床研究进展. 华南地质与矿产, (4): 20~26.

何令仪, 方清浩, 冯君储. 1986. 台马紫苏辉石花岗岩斑岩体的地质背景和形成时代. 桂林冶金地质学院学报, 6(3): 217~228.

胡建, 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 凌洪飞. 2006. 广东龙窝和白石冈岩体年代学、黑云母矿物化学及其成岩指示意义. 岩石学报, 22(10): 2464~2474.

黄标, 徐克勤, 孙明志, 刘刚. 1993. 武夷山中段加里东早期交代型花岗岩类的特点及形成的碰撞造山环境. 岩石学报, 9(4): 388~400.

黄会清, 李献华, 李武显, 刘颖. 2008. 南岭大东山花岗岩的形成时代与成因: SHRIMP 锆石年龄、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学. 高校地质学报, 14(3): 317~333.

雷泽恒, 陈富文, 陈郑辉, 许以明, 龚述清, 李华芹, 梅玉萍. 2010. 黄沙坪铅锌多金属矿成岩成矿年龄测定及地质意义. 地球学报, 31(4): 532~540.

李峰, 陈辉, 鲁文举, 罗思亮. 2010. 云南澜沧老厂花岗岩斑岩形成年龄及地质意义. 大地构造与成矿学, 34(1): 84~91.

李华芹, 王登红, 梅玉萍, 梁婷, 陈振宇, 郭春丽, 应立娟. 2008. 广西大厂拉么铜多金属矿床成岩成矿作用年代学研究. 地质学报, 82(7): 912~920.

李亿斗, 盛继福, Bel L L, Giuliani G. 1986. 西华山花岗岩下陆壳起源的证据. 地质学报, (3): 256~273.

林锦荣. 1992. 论贵东岩体东西部花岗岩岩石学特征和铀成矿条件差异性. 铀矿地质, 8(2): 93~99.

刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢, 张爱钺. 2007. 南昆山岩体-腊圃岩体. 见: 周新民主编. 南岭地区晚、中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 255~291.

- 刘国庆,伍式崇,杜安道,付建明,杨晓春. 2008. 湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究. 大地构造与成矿学, 32(1): 63~71.
- 刘家齐,汪雄武,曾贻善. 2002. 西华山花岗岩及钨、锡、铍矿田成矿流体演化. 华南地质与矿产, (3): 91~96.
- 刘建雄,庄文明. 2003. 粤中前震旦纪基底锆石蒸发年龄及其地质意义. 华南地质与矿产, (2): 52~57.
- 刘阳生,黄革非,邝田顺. 2003. 初论湘南地区中酸性花岗岩类与有色金属矿产的关系. 华南地质与矿产, (3): 37~42.
- 路孝平,吴福元,郭敬辉,周长勇,张吉衡. 2005. 通化地区元古代晚期花岗岩质岩浆作用与地壳演化. 岩石学报, 21(3): 721~736.
- 路远发,马丽艳,屈文俊,梅玉萍,陈希清. 2006. 湖南宝山铜-钨多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究. 岩石学报, 22(10): 2483~2492.
- 罗志高,王岳军,张爱梅,张菲菲. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICPMS 锆石定年及其成矿启示. 大地构造与成矿学, 34(2): 282~290.
- 马丽艳,路远发,梅玉萍,陈希清. 2006. 湖南水口山矿区花岗闪长岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2475~2482.
- 马铁球,柏道远,邝军,王先辉. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 地质通报, 24(5): 413~419.
- 南京大学地质学系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 36~43.
- 邱检生,胡建. 2007. 龙窝-白石冈岩体. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 325~365.
- 任纪舜. 1984. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义. 中国地质科学院院报. 第 9 号: 31~44.
- 沈渭洲,凌洪飞,孙涛. 2007. 华南晚中生代花岗岩-火山岩同位素地球化学. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 123~160.
- 孙恭安,史明魁,张宏良. 1989. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究. 见: 宜昌地质矿产研究所主编. 南岭地质矿产科研报告集(2). 武汉: 中国地质大学出版社, 326~361.
- 孙涛,周新民,陈培荣,李惠民,周红英,王志成. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D辑), 33(12): 1209~1218.
- 汤加富,王希明,刘芳宇. 1991. 江西武功山地区中浅变质岩区域地质调查方法研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~95.
- 汪湘,王志成,汪传胜. 2007. 若干补体花岗岩—锆石学特征及其成岩模式探讨. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 658~691.
- 王俊文,成忠礼,桂训唐,许荣华,张玉泉. 1981. 西藏南部某些中酸性岩体的同位素研究. 地球化学, (3): 242~246.
- 王懋基. 1985. 华南花岗岩重磁研究及其地质意义. 见: 国际交流地质学论文集 6. 北京: 地质出版社, 95~104.
- 王岳军,范蔚若,郭锋,李惠民,梁新权. 2001. 湘东南中生代花岗闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示. 中国科学(D辑), 31(9): 745~751.
- 王岳军,范蔚若,梁新权,彭平头,石玉若. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示. 科学通报, 50(12): 1259~1266.
- 吴福元,杨进辉,柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗岩岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11(3): 305~317.
- 吴俊奇,章邦桐,凌洪飞,陈培荣. 2007. 花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比研究及其地球化学意义. 高校地质学报, 13(2): 272~281.
- 吴荣新,郑永飞,吴元保. 2005. 皖南石耳山新元古代花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究. 高校地质学报, 11(3): 364~382.
- 伍光英,马铁球,柏道远,李金冬,车勤建,王先辉. 2005. 湖南宝山花岗闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年. 现代地质, 19(2): 198~204.
- 伍广宗,张艳珠. 1986. 广宁花岗岩杂岩的地质年代学研究. 广东地质, 1(1): 1~22.
- 夏斌,韦振权,张玉泉,徐力峰,李建峰,王彦斌. 2007. 西藏西部冈仁波齐花岗岩闪长岩锆石定年及其地质意义. 地质通报, 26(8): 1014~1017.
- 夏斌,徐力峰,张玉泉,李建峰,王彦斌. 2008. 西藏南部康马花岗岩锆石年龄. 矿物岩石, 28(3): 72~76.
- 谢明明,冯国胜,刘益辉. 2000. 广昌付坊花岗岩地质特征及侵位机制. 江西地质, 14(1): 21~27.
- 谢晓华,陈卫锋,赵葵东,孙涛,陈培荣,蒋少涌. 2008. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地球化学特征. 岩石学报, 24(6): 1302~1312.
- 徐楚明,欧阳成甫. 1991. 云南澜沧老厂银铅锌矿床成因研究. 桂林冶金地质学院学报, 11(3): 245~252.
- 徐克勤,孙鼎,王德滋. 1963. 华南多旋回花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及成矿专属性的探讨. 地质学报, 43(1,2): 1~26, 141~155.
- 徐伟昌,张运洪,刘跃宝. 1994. 苗儿山花岗岩复式岩基年代学研究的进展及时代划分方案. 岩石学报, 10(3): 330~336.
- 徐夕生,邓平, O'Reilly S Y, Griffin W L, 周新民,谭正中. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 48(12): 1328~1334.
- 徐夕生,耿红燕,赵明. 2007. 诗洞-广平岩体. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 199~219.
- 杨德明,黄聪颖,戴琳娜. 2005. 西藏嘉黎措麦地区含石榴子石二云母花岗岩锆石年龄及其意义. 地质通报, 24(3): 235~238.
- 姚军明,华仁民,林锦富. 2005. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 锆石定年及岩石地球化学特征. 岩石学报, 21(3): 688~696.
- 叶伯丹,申永治,朱杰辰. 1986. 全国同位素地质年龄汇编(第四辑). 北京: 地质出版社, 812~813.
- 于津海,赵蕾. 2007. 南岭地区晚中生代北带花岗岩研究: 红山-富城岩体. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 595~626.
- 张成江. 1991. 贵东岩体花岗岩的成因类型及成矿专属性探讨. 铀矿地质, 7(4): 223~234.
- 张德全,王雪英,孙桂英. 1985. 关于广西姑婆山里松岩体定(侵)位年龄和冷凝历史的探讨. 地质论评, 31(3): 28~38.
- 张芳荣,舒良树,王德滋,沈渭洲,于津海,谢磊. 2010. 江西付坊花岗岩体的年代学、地球化学特征及其成因研究. 高校地质学报, 16(2): 161~176.

- 张菲菲,王岳军,范蔚茗,张爱梅,张玉芝. 2010. 湘东—赣西地区早古生代晚期花岗岩体的 LA-ICPMS 锆石定年研究. *地球化学*, 39(5): 418~425.
- 张敏,陈培荣,张文兰,陈卫锋,李惠民,张孟群. 2003. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因. *地球化学*, 32(6): 529~539.
- 张文兰,华仁民,王汝成,陈培荣,李惠民. 2006. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究. *地质学报*, 80(7): 956~962.
- 张文兰,华仁民,王汝成,李惠民,屈文俊,李建清. 2009. 赣南漂塘钨矿花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定. *地质学报*, 83(5): 659~670.
- 张亚明,彭松柏. 2000. 云开元古宙陆壳基底年代格架及华南前震旦纪构造演化初论. *华南地质与矿产*, (1): 1~10.
- 张祖还,章邦桐. 1991. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究. 北京:原子能出版社, 1~258.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2007. U-Th-K 放射成因热对花岗岩冷却-结晶过程影响的计算及地质意义. *中国科学(D辑)*, 37(2): 155~159.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2008. “花岗岩锆石 U-Pb 年龄能代表花岗岩侵位年龄”质疑——花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比证据. *地质论评*, 54(6): 775~785.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2010a. 花岗岩浆侵位与结晶固化时差的研究与构造意义:以南岭骑田岭花岗岩基为例. *高校地质学报*, 16(1): 103~118.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2010b. 南岭骑田岭花岗岩基属印支期侵位的岩浆动力学佐证:对《关于南岭花岗岩侵位年龄问题》一文的答复与讨论. *高校地质学报*, 16(3): 397~412.
- 章邦桐,凌洪飞,陈培荣,吴俊奇. 2010c. 岩石古放射性生热率的校正及其地球化学意义. *矿物岩石地球化学通报*, 29(2): 187~184.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2011. 南岭寨背-陂头花岗岩基属印支期侵位的岩浆动力学证据及构造意义. *地质找矿论丛*, 26(2): 121~130.
- 章振根,李锡林,林学农. 1984. 大厂花岗岩年龄及成矿时代. *地球化学*, (4): 303~306.
- 赵子福,郑永飞,陈斌,吴元保. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩和片麻岩元素及同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21(2): 325~328.
- 周雄,温春齐,温泉,吴鹏宇,曹盛远,费光春,周玉. 2010b. 西藏邦铺大型斑岩钼铜矿床二长花岗岩斑岩锆石定年及其地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 29(4): 373~379.
- 周雄,温春齐,张学全,曹盛远,吴鹏宇,周玉,费光春. 2010a. 西藏邦铺大型钼铜多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及地质意义. *高校地质学报*, 16(4): 437~464.
- 朱金初,李向东. 1988. 广西花山花岗岩的岩石学和地球化学特征及成岩物质来源的探讨. *岩石矿物学杂志*, 7(1): 28~37.
- 朱金初,张佩华,谢才富,张辉,杨策. 2006. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石年龄格架及其地质意义. *岩石学报*, (9): 2270~2278.
- 朱金初,张佩华,谢才富,杨策. 2007. 花山-姑婆山岩体. 见:周新民主编. *南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化*. 北京:科学出版社, 366~382.
- 朱金初,王汝成,陆建军,张文兰. 2010. 关于南岭中生代花岗岩侵位年龄与锆石 U-Pb 年龄的时差问题:与章邦桐教授等讨论. *高校地质学报*, 16(1): 119~123.
- 庄文明,陈绍前,黄友义. 2000. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及其成岩源. *广东地质*, 15(3): 1~12.
- Buntebarth G. 1984. *Geothermics: An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 26~42.
- Chen Weifeng, Chen Peirong, Zhou Xinmin, Huang Hongye, Ding Xing, Sun Tao. 2007. Single zircon LA-ICPMS dating of the Guandimiao and Wawutang granitic plutons in Hunan, South China and its petrogenetic significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 81~90.
- Deng Fangling. 1992. Pb-isotope geochemistry and U-Pb dating of granitoids in southern Zhuguangshan and Darongshan batholiths. In: Tu Guangzhi, Xu Keqin, Qiu Yuzhuo, eds. *Petrogenesis and Mineralization of Granitoids*. Edited by Beijing: Science Press, 153~165.
- Dowty E. 1980. Crystal growth and nucleation theory and the numerical simulation of igneous crystallization. In: Hargraves R B eds. *Physics of Magmatic Processes*. New Jersey: Priston University Press, 419~485.
- Gehrels G, Rusmore M, Woodsworth G, Craford M, Andronicos C, Hollister L, Patchett J, Ducea M, Butler R, Klepeis K. 2009. U-Th-Pb geochronology of the Coast Mountains batholith in north-coastal British Columbia: constraints on age and tectonic evolution. *G. S. A. Bulletin*, 121 (9/10): 1341~1361.
- Glinder S A, Gill J, Coe R S. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J. Geophys. Res.*, 101: 16137~16154.
- Harris N, Vance D, Ayres M. 2000. From sediment to granite: timescales of anatexis in the upper crust. *Chemical Geology*, 162: 155~167.
- Harrison T M, Armstrong R L. 1979. Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Can. Jour. Earth Sci.*, 16: 400~410.
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Zou Haibo, Wang Xudong, Yu Yao. 2010. Geochronology, petrogenesis and metallogeny of Piaotang granitoids in the tungsten deposit region of South China. *Geochemical Journal*, 44(4): 299~313.
- Krauskopf K B. 1979. *Introduction to Geochemistry*. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 554~548.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Gangjian, Qi Changshi. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I and A-type from central Guangdong, S E China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186~204.
- Mao Jianren, Li Zilong, Zhao Xilin, Zhou Jie, Ye Haimin. 2010. Geochemical characteristics, cooling history and mineralization significance of Zhangqiantang pluton in South Jiangxi Province, P. R. China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(1): 56~58.
- Mao Jianren, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Wang Yitian. 2006. Mesozoic large-scale mineralization and multiple

lithospheric extensions in South China. *Acta Geologica Sinica*, 80(3):420~431.

Shang C K, Morteani G, Satir M, Taubaldh. 2010. Neoproterozoic continental growth prior to Gondwana assembly: constraints from zircon-titanite geochronology, geochemistry and petrography of ring complex granitoids, Sudan. *Lithos.*, 118: 61~81.

Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, Cheng, Peirong. 2008.

Estimating influence of crystallizing latent heat on cooling-crystallizing process of a granitic melt and its geological implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82 (2): 438~443.

Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26~33.

## Indosinian Emplacement of the Huashan—Guposhan Granite Batholiths in Western Nanling Range:

### Evidence from Cooling-Crystallization and Radiogenic Heat Calculation of Granite Melt

ZHANG Bangtong, WU Junqi, LING Hongfei, CHEN Peirong

*State Key Laboratory for Mineral Deposits Research and School of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

#### Abstract

Based on geological and geochemical study, it can be concluded that the Huashan and Guposhan granite batholiths have an emplacement depth of 5.5 km, the country rocks temperature of 196°C, and initial granite melt temperature of 950°C during process of emplacement. Mathematic model established in this study yields that, after emplacement of the granites, cooling time ( $\Delta t_{\text{cool}}$ ) from its initial temperature to crystallization temperature of granite melt is 4.14 Ma for Huashan and 4.36 Ma for Guposhan. Because latent heat released from crystallization prolonged cooling time by 2.67 Ma and 2.81 Ma, and granite batholiths in these two areas contain more radioactive elements (U:  $13.5 \times 10^{-6}$ , Th:  $56.1 \times 10^{-6}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ : 5.79% for Huashan; U:  $13.7 \times 10^{-6}$ , Th:  $52.4 \times 10^{-6}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ : 5.28% for Guposhan), higher than the average content of radioactive elements in granite (U:  $5 \times 10^{-6}$ , Th:  $20 \times 10^{-6}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ : 2.66%), radioactivity resulting from Huashan and Guposhan granites prolonged crystallization time to 37.6 Ma and 45.1 Ma, much longer than  $\Delta t_A$  value calculated for world average granites (3.17 Ma, Huashan). Time differences ( $\Delta t_{\text{ECTD}}$ ) of emplacement and crystallization of two granite batholiths are 44.41 Ma and 52.27 Ma. In combination with zircon U-Pb ages of 162 Ma for Huashan and 163 Ma for Guposhan, inversion calculation yields emplacement ages of 206 Ma and 215 Ma for Huashan and Guposhan granite batholiths, and this provides important magmatic and dynamic evidence for emplacement of Huashan and Guposhan granite batholiths at the Indosinian period.

**Key words:** Huashan—Guposhan granite batholiths; emplacement age; emplacement-crystallization time difference; Indo-Sinian orogeny; magmatic and dynamic evidence