

浙江统里地区早白垩世花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因

陈焕元, 贾飞

浙江省核工业二六二大队, 浙江湖州, 313000

内容提要:浙江省内发育着众多中-大型萤石矿, 但是对成矿岩体的研究相对较弱, 制约着对区域成矿过程的认识。本文首次对安吉统里地区萤石成矿花岗岩体进行了系统的锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究。锆石 U-Pb 测年结果显示小圩坞花岗闪长岩形成于 146~140 Ma, 而五房里细粒二长花岗岩形成于 135 Ma, 二者均形成于早白垩世早期, 与华南地区大规模爆发的晚中生代岩浆作用时代相一致。全岩主微量元素地球化学表明统里地区花岗岩体可以划分为钙碱性 I 型花岗岩和高分异 I 型花岗岩两类, 二者均显示高硅、富铝、贫铁和镁等特征, 在地球化学上属于准铝质-过铝质岩石系列。其中小圩坞花岗闪长岩相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素和高场强元素, 而五房里细粒二长花岗岩则显示明显的中稀土元素亏损。研究认为小圩坞 I 型花岗岩是变火成岩中下地壳熔融的产物, 而五房里高分异 I 型花岗岩是花岗质岩浆在浅层岩浆房内经历广泛结晶分异作用的产物。结合华南地区晚中生代岩浆作用由陆向海迁移的趋势, 本文研究认为古太平洋板块俯冲过程中的板片回转过程是统里地区花岗岩侵入最为合理的深部动力学机制。

关键词:浙西北; 早白垩世; 花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 岩石成因

作为大陆地壳的主要组成部分, 花岗岩记录着陆壳形成、壳-幔相互作用的重要信息, 是探讨岩石圈演化、反演深部地球动力学过程的关键(Chappell et al., 1974; Jahn, 2004; Wu Fuyuan et al., 2007; Xu Xisheng et al., 2020)。同时, 花岗岩往往与众多大型-超大型金属矿床在时空上具有密切的成因联系。因此, 花岗岩的研究对于认识大陆地壳形成、大陆深部动力学演化以及各类矿产资源的开发和利用均具有重要的科学意义。

华南地区在中生代爆发了大规模的岩浆作用, 不仅形成了举世瞩目的中生代火山-侵入杂岩带, 同时该岩浆岩带上密集分布着一系列大型-超大型金属矿床, 是濒太平洋地区一个宏伟的构造-岩浆-成矿带的重要组成部分(Tao Kunyuan et al., 1999; Wang Guoguang et al., 2012; Deng Jinfu et al., 2016; Xiang Kunpeng, 2019; Zhou Fangchun et al., 2019; Cao Mingxuan et al., 2020)。近年来, 越来越多的研究支持华南地区中生代岩浆活动是古

太平洋板块俯冲的产物, 然而地质史上古太平洋板块俯冲方向发生过多改变, 特别是中生代以来古太平洋板块俯冲模式的变化与中生代岩浆活动的联系尚不明确, 亟待进一步的研究(Li Zhengxiang et al., 2007; Ling Mingxing et al., 2009; Sun Weidong et al., 2010; Li He et al., 2012; Yang Minggui et al., 2019)。此外, 中生代花岗岩出露面积达 135000 km², 占中生代岩浆岩总面积的 62%, 并对区域多金属矿床的形成起到了重要的控制作用, 形成了多个世界级规模的超大型矿床(Mao Jingwen et al., 2004, 2011; Chu Pingli et al., 2019)。因此, 建立中生代花岗岩的年代学格架, 进一步查明其岩浆源区与成岩过程, 不仅是揭示华南地区中生代构造演化深部地球动力学机制的关键所在, 同时对认识区域岩浆-成矿作用、指导找矿方向同样具有重要的指示意义。

萤石作为一种热液低温矿物, 广泛分布于热液矿床、火成岩以及变质岩中。华南地区燕山期热液-

注: 本文为湖州市西南部萤石矿产资源调查与找矿预测项目(编号【省资】2015003)资助的成果。

收稿日期: 2020-06-23; 改回日期: 2020-11-20; 网络发表日期: 2021-02-23; 责任编辑: 吴才来; 责任编辑: 黄敏、蔡志慧。

作者简介: 陈焕元, 男, 1982 年生。高级工程师, 硕士, 从事区域矿产地质研究。E-mail: chenhuanyuan@qq.com。

引用本文: 陈焕元, 贾飞. 2021. 浙江统里地区早白垩世花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因. 地质学报, 95(11): 3352~3365, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021060.

Chen Huanyuan, Jia Fei. 2021. Formation age, geochemical signatures and geological significance of Early Cretaceous granites from the Tongli area, Zhejiang. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3352~3365.

岩浆活动强烈,伴随着形成了大量的萤石矿产资源,其中浙江省内萤石矿床广泛发育,矿产资源十分丰富,具有分布广、储量大的特点,是浙江省优势矿种之一。近年来开展的地质与矿产勘察工作在浙西北安吉、淳安、开化以及浙东南泰顺、文成等地陆续发现了中-大型规模的萤石矿床,显示巨大的萤石找矿前景(Huang Guocheng et al., 2015)。

本文在详细的野外地质调查工作的基础上,对安吉蒲芦坞萤石矿区内的统里成矿花岗岩体进行了系统的岩石岩相学、锆石 U-Pb 年代学以及岩石地球化学的研究。并结合区域上已有的岩浆岩资料,明确岩浆源区组成与成岩过程,进一步探讨区域岩浆活动的构造背景与深部动力学机制,建立合理的构造演化模型,以此为认识区域岩浆-成矿作用提供数据支撑。

1 区域地质概况

浙江省位于华南板块东北缘,其又被江绍断裂带进一步划分为浙东南和浙西北两个构造单元。其中浙西北属于扬子地块,从新元古代以来先后经历了晋宁运动、加里东运动、印支运动和燕山运动等多期次构造运动的改造(Mao Jianren et al., 2014)。一系列构造活动导致浙西北地区前寒武纪基底局部出露,并保留有较多的古构造形迹,同时爆发了多期次大规模的岩浆侵入与火山活动,形成了多样的岩石类型。其中,晚中生代燕山期岩浆岩是区域上分布最为广泛的岩浆作用,并与区域成矿作用有着密切联系(Mao Jingwen et al., 2004, 2011; Hua Renmin et al., 2005)。

统里地区地理位置处于浙江省安吉县南部,大地构造位置位于浙西北扬子地块,区内地质条件复杂,发育的岩石地层单元包括寒武系荷塘组(ϵ_1h)炭质硅质岩、泥岩,奥陶系印诸埠组(O_1y)页岩和长坞组(O_3c)泥岩、砂岩以及白垩系黄尖组(K_1hj)火山岩,研究区内花岗岩体发育,与围岩印诸埠组(O_1y)、长坞组(O_3c)以及黄尖组(K_1hj)呈侵入接触关系,其上被第四系沉积覆盖。本次对统里地区小圩坞和五房里两个花岗岩体进行了研究,分别在小圩坞岩体中采集了 3 件年代学样品以及 5 件地球化学样品,在五房里岩体中采集了 1 件年代学样品和 2 件地球化学样品进行测试分析,岩石岩相学特征描述如下:

小圩坞岩体:主要由灰白色的花岗闪长岩组成(图 2a),岩石呈块状构造,花岗结构,岩石矿物组成

主要包括:斜长石(65%)、钾长石(10%)、石英(20%)以及少量的黑云母(5%),其中钾长石普遍微纹长石化,多呈他形晶,粒度大小 1~3.5 mm,常见其和石英互相交生在一起;斜长石多呈半自形板条状,粒度与钾长石相当,多发育环带构造,而且聚片双晶纹细密;石英多呈他形晶,常见石英发生重结晶,粒度一般在 1~2 mm;黑云母呈鳞片状,粒度大小 0.2~2.5 mm(图 2b)。

五房里岩体:主要由肉红色的细粒二长花岗岩组成(图 2c),岩石呈块状构造,细粒花岗结构,岩石矿物组成主要包括:钾长石(45%)、斜长石(10%)、石英(40%)以及少量的黑云母(2%),其中钾长石多呈他形晶,粒度大小 0.2~1 mm,微纹长石化普遍;斜长石含量较少,多呈半自形板条状,聚片双晶纹发育,非常细密,个别还见环带构造,应该属于更长石,粒度大小和钾长石相当,不少斜长石还具有蠕英结构,即斜长石与蠕虫状石英相互交融共生;石英是岩石中另一个最主要组分,多呈他形粒状,粒度大小 0.2~1 mm;黑云母呈细小鳞片状,粒度大小 0.2~0.5 mm(图 2d)。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年

锆石的分选在河北省区域地质调查所实验室用常规方法进行,锆石制靶在中国地质大学(北京)地学实验中心完成,在双目镜下挑选无裂隙、无包裹体、干净透明的锆石颗粒置于环氧树脂中,用于阴极发光分析及 LA-ICP-MS 测试。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位分析在中国地质大学(北京)地学实验中心进行,采用美国 Agilent 科技有限公司的 7500a 型 ICP-MS,激光剥蚀系统为美国 New Wave 贸易有限公司的 UP193SS 型,深紫外(DUV)193 nm、ArF 准分子激光剥蚀系统。年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,标准锆石 TEM(417 Ma)做监控盲样。元素含量以国际标样 NIST610 为外标, Si 为内标计算,监控盲样为 NIS612 和 NIS614。最后采用 Glitter4.4 软件对同位素进行处理,用 ISOPLLOT 程序进行锆石加权平均年龄计算以及谐和图的绘制。

2.2 地球化学

地球化学样品在河北省地质调查研究院实验室无污染碎至 200 目,具体元素的测试分析工作在中国地质大学(北京)地学实验中心完成。常量元素分析测试仪器为 PS-950 等离子体光谱仪;微量元素分

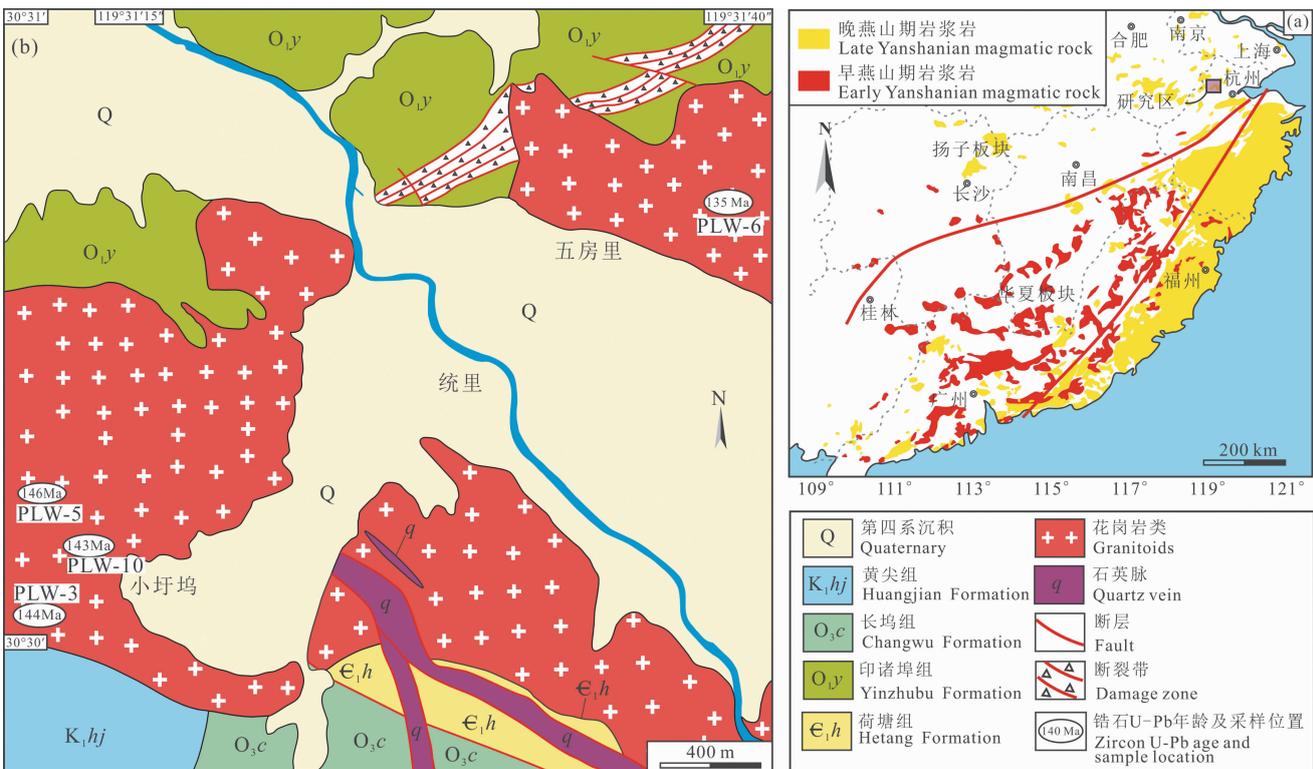


图1 华南地区燕山期岩浆岩分布图(a)和统里地区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified geological map of South China showing the distribution of Yanshanian magmatic rocks (a) and simplified geological map of the Tongli area (b)

析采用 ICP-MS 法测试, 实验仪器型号为美国 Agilent7500a ICP-MS、美国 Millipore 公司的 Milli-Q Element 去离子水纯水机。

3 锆石 U-Pb 年代学

本次分别在小圩坞岩体中采集了 3 件定年样品 (PLW-3、PLW-5、PLW-10)、在五房里岩体中采集了 1 件定年样品 (PLW-6) 进行锆石 U-Pb 年代学分析, 测试结果见表 1。其中小圩坞花岗闪长岩定年样品 (PLW-3) 中 19 颗锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围在 148~131 Ma 之间, 获得的加权平均年龄为 139.9 ± 2.4 Ma (MSWD=2.3); 样品 (PLW-5) 中 15 颗锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围在 154~141 Ma 之间, 获得的加权平均年龄为 145.9 ± 1.7 Ma (MSWD=1.6); 样品 (PLW-10) 中 17 颗锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围在 154~136 Ma 之间, 获得的加权平均年龄为 143.3 ± 3.3 Ma (MSWD=4.4) (图 3a~c)。五房里细粒二长花岗岩定年样品 (PLW-6) 中 15 颗锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围在 139~132 Ma 之间, 获得了加权平均年龄为 135.1 ± 1.1 Ma (MSWD=1.08) (图 3d)。4 件定年样品的测年结果显示统里地区花岗岩体侵

位于早白垩世早期 (146~135 Ma), 与华南地区晚中生代岩浆活动的时代相一致。

4 岩石地球化学

所采集地球化学样品的全岩主微量地球化学元素含量见表 2。5 件小圩坞花岗闪长岩样品显示低的 SiO_2 (67.7%~70.6%)、全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.30\% \sim 8.21\%$), 较高的 Al_2O_3 (14.7%~15.1%)、 MgO (0.84%~1.46%)、 TiO_2 (0.34%~0.57%) 含量。在 TAS 岩石类型判别图解中, 样品落在花岗闪长岩区域 (图 4a); 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中 (图 4b), 样品落在高钾钙碱性区域; 在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解中 (图 4c), 样品落在准铝质-弱过铝质区域。在球粒陨石标准化稀土配分曲线中 (图 5a), 样品呈轻稀土富集、重稀土亏损的右倾模式 ($[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{N}}=11 \sim 16$), 显示不同程度的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.77 \sim 0.88$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中 (图 5b), 样品显示 Rb、Th、U 等元素的富集以及 Nb、Ta、Ba、Sr 等元素的亏损。

2 件五房里细粒二长花岗岩样品具有明显高的 SiO_2 (76.9%、77.3%)、全碱 (7.86%、8.25%) 含量, 较低的 Al_2O_3 (12.3%、12.4%)、 MgO (0.06%、

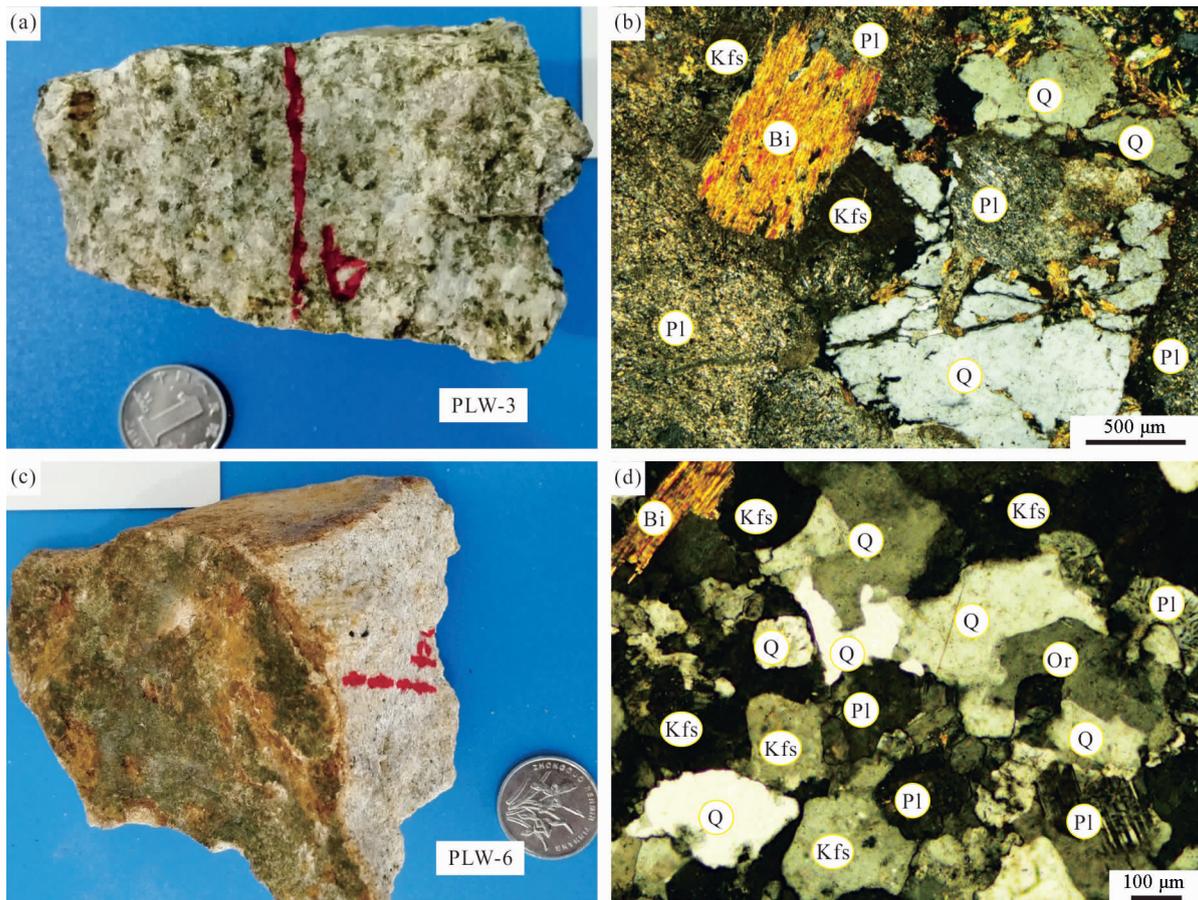


图 2 浙江统里地区花岗岩体手标本及镜下照片

Fig. 2 Field and petrographic photographs of Tongli granitic plutons from Zhejiang Province

(a) 小圩坞花岗闪长岩手标本; (b) 小圩坞花岗闪长岩镜下照片; (c) 一五房里细粒二长花岗岩手标本; (d) 一五房里细粒二长花岗岩镜下照片

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Q—石英

(a)—Specimen photograph of Xiaoxuwu granodiorites; (b)—micrograph of Xiaoxuwu granodiorites; (c)—specimen photograph of Wufangli fine-grained monzogranites; (d)—micrograph of Wufangli fine-grained monzogranites;

Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Q—quartz

0.08%)、 TiO_2 (0.09%、0.12%) 含量, 显示高演化岩浆的地球化学特征。在 TAS 岩石类型判别图解中, 样品落在花岗岩区域(图 4a); 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中, 样品落在高钾钙碱性区域(图 4b); 在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解中, 样品落在弱过铝质区域(图 4c)。在球粒陨石标准化稀土配分曲线中(图 5a), 样品呈明显轻稀土富集、重稀土亏损的右倾模式($[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{N}} = 28, 34$), 显示强烈的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.65, 0.71$)以及中稀土亏损($[\text{Dy}/\text{Yb}]_{\text{N}} = 0.44, 0.57$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 5b), 样品同样显示 Rb、Th、U 等元素的富集以及明显的 Nb、Ta、Ba、Sr 等元素的亏损。

5 讨论

5.1 华南板块晚中生代岩浆岩时代格架

华南板块上大规模出露的岩浆岩是揭示深部地

球动力学机制和认识区域成矿作用的关键所在, 一直是国内外学者的热点研究对象。特别是近年来随着岩浆岩定年技术的发展, 众多学者先后对华南地区广泛发育的岩浆岩进行了精细的年代学测试分析工作, 获得了大量的年代学数据。大量的测年结果表明华南晚中生代岩浆作用具有分布范围广、持续时间长的特征, 其中中酸性侵入岩的侵位时间集中在 170 ~ 120 Ma 之间 (Sun Tao, 2006; Zhou Xinmin et al., 2006; Li Zhengxiang et al., 2007; Li He et al., 2012; Mao Jianren et al., 2014; Dong Shuwen et al., 2018)。尽管不同学者对于区域上晚中生代岩浆活动期次的划分仍存在一定的争议 (Li Zhengxiang et al., 2007; Sun Weidong et al., 2010; Li He et al., 2012), 然而不可否认, 华南晚中生代岩浆岩明显地由陆向海时空迁移趋势相

表1 统里地区岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of granitic plutons from Tongli area

测点	同位素比值						测年结果(Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
PLW-3(E:119°31'11",N:30°30'08")												
PLW-3-01	0.05458	0.00889	0.15775	0.02527	0.02098	0.00075	395	329	149	22	134	5
PLW-3-02	0.0523	0.00802	0.16086	0.02427	0.02233	0.00074	299	316	152	21	142	5
PLW-3-03	0.04911	0.00782	0.13851	0.02172	0.02047	0.00068	153	335	132	19	131	4
PLW-3-04	0.05040	0.00763	0.14454	0.02155	0.02082	0.00068	214	317	137	19	133	4
PLW-3-05	0.04985	0.01230	0.15222	0.03704	0.02217	0.0010	188	491	144	33	141	6
PLW-3-06	0.04804	0.00478	0.15008	0.01477	0.02267	0.00054	101	220	142	13	145	3
PLW-3-07	0.05519	0.00496	0.15941	0.01411	0.02097	0.00051	420	189	150	12	134	3
PLW-3-08	0.05133	0.00201	0.16234	0.00646	0.02296	0.00039	256	88	153	6	146	2
PLW-3-09	0.04701	0.00378	0.14037	0.01119	0.02167	0.00046	49	182	133	10	138	3
PLW-3-10	0.04898	0.00347	0.14106	0.00992	0.02090	0.00043	147	158	134	9	133	3
PLW-3-11	0.04806	0.00332	0.14049	0.00964	0.02122	0.00043	102	156	134	9	135	3
PLW-3-12	0.04940	0.00486	0.14844	0.01446	0.02181	0.00050	167	215	141	13	139	3
PLW-3-13	0.04683	0.00309	0.14477	0.00949	0.02244	0.00045	41	151	137	8	143	3
PLW-3-14	0.05098	0.00583	0.15714	0.01771	0.02237	0.00061	240	244	148	16	143	4
PLW-3-15	0.04977	0.00395	0.15393	0.01209	0.02244	0.00049	185	175	145	11	143	3
PLW-3-16	0.04628	0.00473	0.13919	0.01404	0.02183	0.00055	12	229	132	13	139	3
PLW-3-17	0.04800	0.00310	0.15382	0.00987	0.02325	0.00046	98	147	145	9	148	3
PLW-3-18	0.04922	0.00508	0.14899	0.01519	0.02196	0.00055	159	225	141	13	140	3
PLW-3-19	0.04836	0.00406	0.14671	0.01218	0.02202	0.00050	117	187	139	11	140	3
PLW-6(E:119°31'37",N:30°30'46")												
PLW-6-01	0.04960	0.00205	0.14528	0.00608	0.02125	0.00036	176	94	138	5	136	2
PLW-6-02	0.04951	0.00240	0.14709	0.00715	0.02155	0.00039	172	109	139	6	137	2
PLW-6-03	0.04995	0.00267	0.14632	0.00781	0.02125	0.00040	193	120	139	7	136	3
PLW-6-04	0.05013	0.00085	0.14432	0.00286	0.02088	0.00031	201	39	137	3	133	2
PLW-6-05	0.04838	0.00075	0.14146	0.00263	0.02121	0.00032	118	36	134	2	135	2
PLW-6-06	0.05162	0.00092	0.15105	0.00309	0.02123	0.00032	268	40	143	3	135	2
PLW-6-07	0.04872	0.00095	0.13952	0.00307	0.02077	0.00032	134	45	133	3	133	2
PLW-6-08	0.05041	0.00083	0.15093	0.00292	0.02172	0.00033	214	38	143	3	139	2
PLW-6-09	0.04928	0.00109	0.14725	0.00356	0.02167	0.00033	161	51	140	3	138	2
PLW-6-10	0.04998	0.00085	0.14383	0.00286	0.02087	0.00031	194	39	137	3	133	2
PLW-6-11	0.04798	0.00069	0.14193	0.00252	0.02145	0.00032	97	35	135	2	137	2
PLW-6-12	0.05049	0.00084	0.14647	0.00285	0.02104	0.00032	218	38	139	3	134	2
PLW-6-13	0.04875	0.00094	0.14527	0.00314	0.02161	0.00033	136	45	138	3	138	2
PLW-6-14	0.04892	0.00143	0.13992	0.00427	0.02074	0.00033	144	67	133	4	132	2
PLW-6-15	0.04931	0.00065	0.14161	0.00239	0.02083	0.00031	163	31	135	2	133	2
PLW-10(E:119°31'14",N:30°30'14")												
PLW-10-01	0.05136	0.00206	0.15372	0.00625	0.02171	0.00037	257	90	145	6	138	2
PLW-10-02	0.04813	0.00183	0.14333	0.00554	0.02160	0.00036	105	87	136	5	138	2
PLW-10-03	0.04948	0.00234	0.14909	0.00708	0.02185	0.00039	171	107	141	6	139	2
PLW-10-04	0.04663	0.00296	0.13722	0.00866	0.02134	0.00041	30	146	131	8	136	3
PLW-10-05	0.05022	0.00294	0.14765	0.00859	0.02132	0.00041	205	130	140	8	136	3
PLW-10-06	0.04974	0.00430	0.15397	0.01313	0.02245	0.00052	183	190	145	12	143	3
PLW-10-07	0.04983	0.00475	0.15879	0.01491	0.0231	0.00057	187	208	150	13	147	4
PLW-10-08	0.04797	0.00619	0.15956	0.02026	0.02412	0.00071	97	281	150	18	154	4
PLW-10-09	0.04841	0.00690	0.15200	0.02133	0.02277	0.00071	119	305	144	19	145	4
PLW-10-10	0.05069	0.01279	0.14961	0.03698	0.02140	0.00118	227	498	142	33	137	7
PLW-10-11	0.05131	0.00904	0.15638	0.02709	0.02210	0.00082	255	361	148	24	141	5
PLW-10-12	0.04969	0.00669	0.15355	0.02035	0.02241	0.00067	181	286	145	18	143	4
PLW-10-13	0.04969	0.00399	0.16165	0.01286	0.02359	0.00051	181	177	152	11	150	3
PLW-10-14	0.05012	0.00357	0.16478	0.01164	0.02384	0.00049	201	157	155	10	152	3
PLW-10-15	0.05101	0.00413	0.16741	0.01339	0.02379	0.00052	241	176	157	12	152	3

续表 1

测点	同位素比值						测年结果(Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
PLW-10-16	0.04864	0.00280	0.15660	0.00898	0.02334	0.00043	130	130	148	8	149	3
PLW-10-17	0.05124	0.00363	0.17020	0.01194	0.02408	0.00049	251	155	160	10	153	3
PLW-5(E:119°31'11",N:30°30'21")												
PLW-5-01	0.04950	0.00469	0.15624	0.01464	0.02288	0.00053	171	207	147	13	146	3
PLW-5-02	0.05929	0.00307	0.18842	0.00972	0.02304	0.00043	578	109	175	8	147	3
PLW-5-03	0.05208	0.00339	0.15842	0.01022	0.02205	0.00044	289	142	149	9	141	3
PLW-5-04	0.04955	0.00334	0.16388	0.01093	0.02398	0.00049	174	150	154	10	153	3
PLW-5-05	0.05191	0.00404	0.15906	0.01223	0.02221	0.00049	281	169	150	11	142	3
PLW-5-06	0.04897	0.00324	0.15572	0.01020	0.02305	0.00046	146	148	147	9	147	3
PLW-5-07	0.04827	0.00407	0.14832	0.01236	0.02227	0.00049	113	188	140	11	142	3
PLW-5-08	0.05204	0.00476	0.17323	0.01558	0.02413	0.00059	287	196	162	13	154	4
PLW-5-09	0.05006	0.00656	0.16176	0.02087	0.02342	0.00069	198	278	152	18	149	4
PLW-5-10	0.05283	0.00802	0.16932	0.02527	0.02323	0.00079	321	313	159	22	148	5
PLW-5-11	0.04958	0.00722	0.15941	0.02283	0.02331	0.00075	175	308	150	20	149	5
PLW-5-12	0.04792	0.00513	0.15238	0.01610	0.02305	0.00059	94	237	144	14	147	4
PLW-5-13	0.04893	0.00454	0.15861	0.01453	0.02350	0.00055	144	204	150	13	150	3
PLW-5-14	0.04789	0.00349	0.14768	0.01068	0.02235	0.00046	93	165	140	9	143	3
PLW-5-15	0.04839	0.00318	0.14953	0.00974	0.02240	0.00044	118	148	142	9	143	3

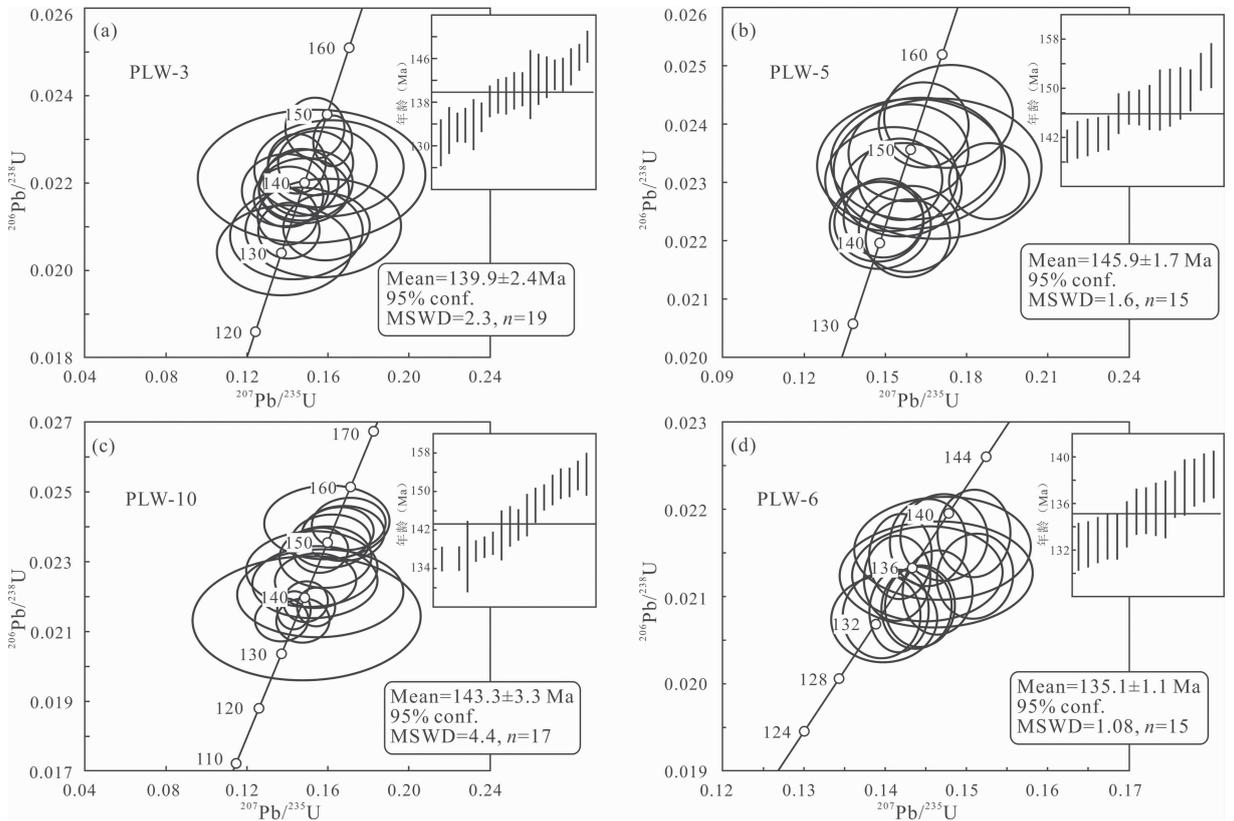


图 3 浙江统里花岗岩体锆石 U-Pb 谐和年龄及加权平均年龄图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted average ages diagrams of Tongli granitic plutons from Zhejiang Province

一致(Li Zhengxiang et al., 2007; Cao Mingxuan et al., 2020)。

浙江省火山-岩浆活动广泛发育,前人已经开展了大量的测年研究工作,现有的锆石 U-Pb 测年结

果表明浙西北岩浆岩主要形成与中侏罗世—早白垩世早期(172 ~ 123 Ma)(Tang Zengcai et al., 2019),而浙东南陆续报道了早白垩世晚期的年代学数据(Cui Yurong et al., 2010; Gao Wanli et al.,

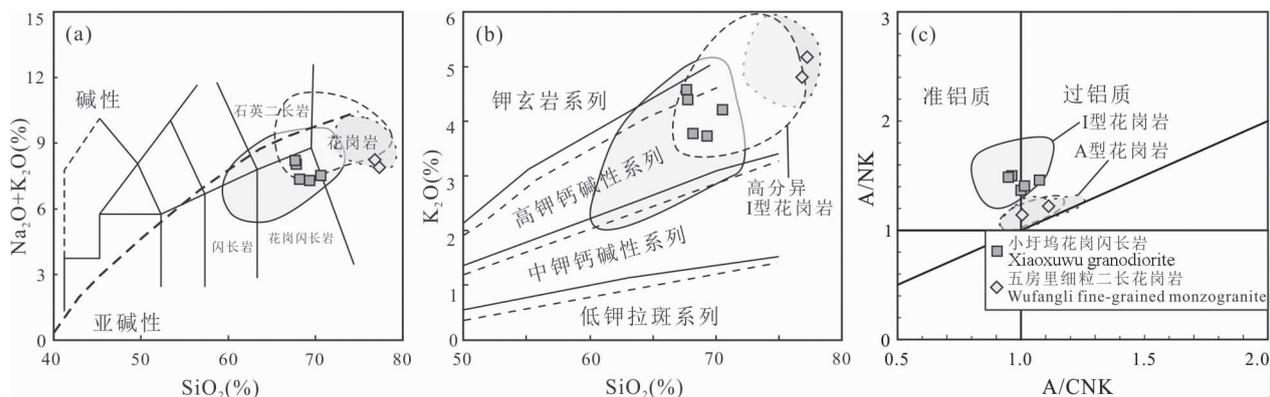


图4 岩石类型判别图解

Fig. 4 Geochemical classification diagrams

(a)— $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 图解(据 Rickwood, 1989); (b)— $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(据 Maitre, 1989);

(c)— $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解(据 Shand, 1947)(浙西北晚中生代 I 型、高分异 I 型和 A 型三类花岗岩数据据 Tang Zengcai et al., 2019)
 (a)— $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (after Rickwood, 1989); (b)— $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (after Maitre, 1989); (c)— $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ diagram
 (after Shand, 1947); the data of I-highly fractionated I- and A-type granites in northwest Zhejiang from Tang Zengcai et al. (2019)

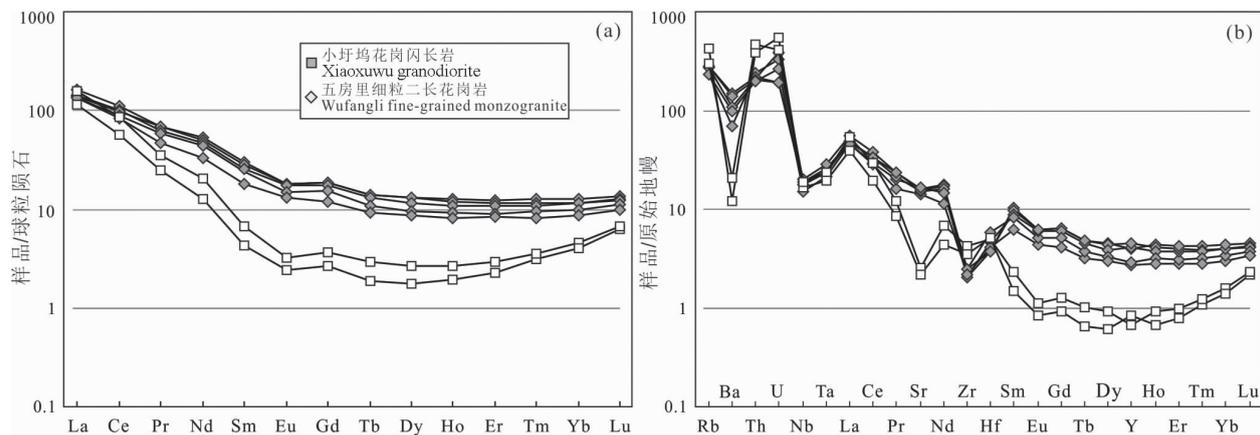


图5 浙江统里花岗岩球粒陨石标准化稀土元素模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(标准化值引自 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element (a) and primitive-mantle-normalized multi-element patterns for granites from Tongli, Zhejiang (b) (chondrite- and primitive mantle-normalized values after Sun et al., 1989)

2014; Jin Qinghua et al., 2015),越来越多的测年数据显示浙西北地区晚中生代岩浆活动要早于浙东南地区,表明浙江省内岩浆迁移趋势整体与华南板块晚中生代岩浆岩由陆向海的迁移趋势相一致。本文首次获得了统里地区萤石矿成矿岩体的年代学数据,为进一步完善华南晚中生代岩浆岩时空格架提供了重要的数据支撑。测年结果表明统里地区花岗岩体形成于早白垩世早期(146~135 Ma),与浙西北地区岩浆活动的时代相一致,应该是区域上同一构造-岩浆事件的产物。

5.2 岩石成因

花岗岩的岩石类型划分存在多种方案,其中最广泛使用的是根据花岗岩的地球化学组成与成岩

构造背景将其划分为 I、S、M 和 A 型四种类型(Chappell et al., 1974; Whalen et al., 1987)。在花岗岩岩石类型判别图解中(图 6a、b),两组岩石样品明显地分为两类,其中小圩坞岩体落在未分异的 I、S、M 型花岗岩区域,而五房里岩体落在高分异花岗岩区域。研究发现,磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩中不同的行为会导致 I 型花岗岩中 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量增加而降低,在 S 型花岗岩中则反之;同时,富 Y 矿物在两类花岗岩的差异行为会导致 I 型花岗岩的 Y 含量高,并与 Rb 含量呈正相关关系(Li Xianhua et al., 2007)。在 I 型和 S 型花岗岩判别图解中(图 6c、d),小圩坞岩体花岗闪长岩样品表现出典型的 I 型花岗岩的趋势,而五房里岩体明显的

表 2 统里地区花岗岩样品主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Analytical results of major(%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) for granitic samples from Tongli area

	PLW-3	PLW-5	PLW-10	PLW-2	PLW-11	PLW-14	PLW-6
	小圩坞花岗岩闪长岩				五房里细粒二长花岗岩		
SiO ₂	67.8	70.6	69.3	67.7	68.2	76.9	77.3
TiO ₂	0.57	0.34	0.39	0.53	0.50	0.09	0.12
Al ₂ O ₃	15.1	14.7	14.9	14.9	14.9	12.4	12.3
(Fe ₂ O ₃) _t	3.75	2.59	3.02	3.60	3.96	0.75	1.03
MnO	0.05	0.07	0.07	0.05	0.08	0.04	0.03
MgO	1.44	0.84	1.06	1.46	1.41	0.08	0.06
CaO	2.27	2.02	3.07	2.22	3.14	0.85	0.58
Na ₂ O	3.67	3.32	3.58	3.63	3.58	3.45	2.70
K ₂ O	4.38	4.20	3.72	4.58	3.77	4.80	5.16
P ₂ O ₅	0.17	0.10	0.12	0.16	0.16	0.01	0.01
LOI	1.23	0.79	0.50	1.19	0.63	0.73	0.58
Li	23.8	21.0	25.7	22.1	25.7	18.3	17.7
Be	2.43	3.06	2.31	2.40	2.30	3.19	1.88
Sc	7.42	4.95	6.44	7.67	7.71	1.55	1.86
V	72.4	42.2	50.3	70.3	67.8	3.91	4.75
Cr	31.4	32.6	36.4	36.5	43.8	36.7	30.1
Co	7.72	4.91	5.45	6.83	7.92	0.34	0.97
Ni	7.61	4.86	5.23	7.44	7.12	0.77	2.38
Cu	12.9	14.3	6.81	11.2	6.26	2.13	3.75
Zn	33.2	83.9	40.6	31.2	53.6	14.8	11.3
Ga	17.9	17.0	16.2	17.3	17.2	14.3	12.9
Rb	183	173	150	183	151	274	190
Sr	346	305	354.0	324	327	45.6	53.8
Y	20.6	12.6	13.3	18.5	18.0	3.8	3.1
Zr	22.9	24.3	28.0	23.2	28.1	39.9	47.0
Nb	14.3	12.9	10.8	12.7	13.4	12.1	13.7
Sn	3.00	1.00	1.20	2.90	1.50	0.40	0.40
Cs	4.77	5.74	6.53	5.02	5.55	9.60	6.26
Ba	1035	756	691	976	496	85	146
La	38.4	31.9	31.8	34.3	32.4	27.3	37.5
Ce	66.9	50.9	53.5	60.6	59.0	34.8	52.2
Pr	6.51	4.44	5.54	5.99	6.50	2.35	3.38
Nd	24.5	15.6	20.2	22.0	23.5	5.94	9.41
Sm	4.61	2.78	3.68	3.87	4.30	0.66	1.04
Eu	1.05	0.75	0.87	1.02	1.05	0.14	0.19
Gd	3.81	2.42	3.11	3.56	3.86	0.55	0.76
Tb	0.52	0.35	0.40	0.49	0.53	0.07	0.11
Dy	3.28	2.20	2.45	2.89	3.33	0.45	0.67
Ho	0.68	0.46	0.52	0.61	0.71	0.11	0.15
Er	1.94	1.37	1.48	1.79	2.04	0.38	0.48
Tm	0.29	0.21	0.24	0.28	0.32	0.08	0.09
Yb	1.99	1.46	1.67	1.97	2.14	0.69	0.79
Lu	0.32	0.25	0.28	0.31	0.34	0.16	0.17
Hf	1.17	1.26	1.81	1.45	1.17	1.57	1.53
Ta	1.18	1.06	0.88	0.98	1.08	0.80	0.97
Tl	1.08	0.74	0.57	1.09	0.67	1.05	0.90
Pb	16.7	38.7	17.2	16.9	18.7	31.2	26.0
Th	18.6	18.0	17.1	17.4	20.4	33.5	39.6
U	4.03	8.25	5.58	4.08	6.98	11.50	8.70
Na/K	0.84	0.79	0.96	0.79	0.95	0.72	0.52
Eu/Eu*	0.77	0.88	0.79	0.84	0.79	0.71	0.65
(La/Yb) _N	14	16	14	12	11	28	34

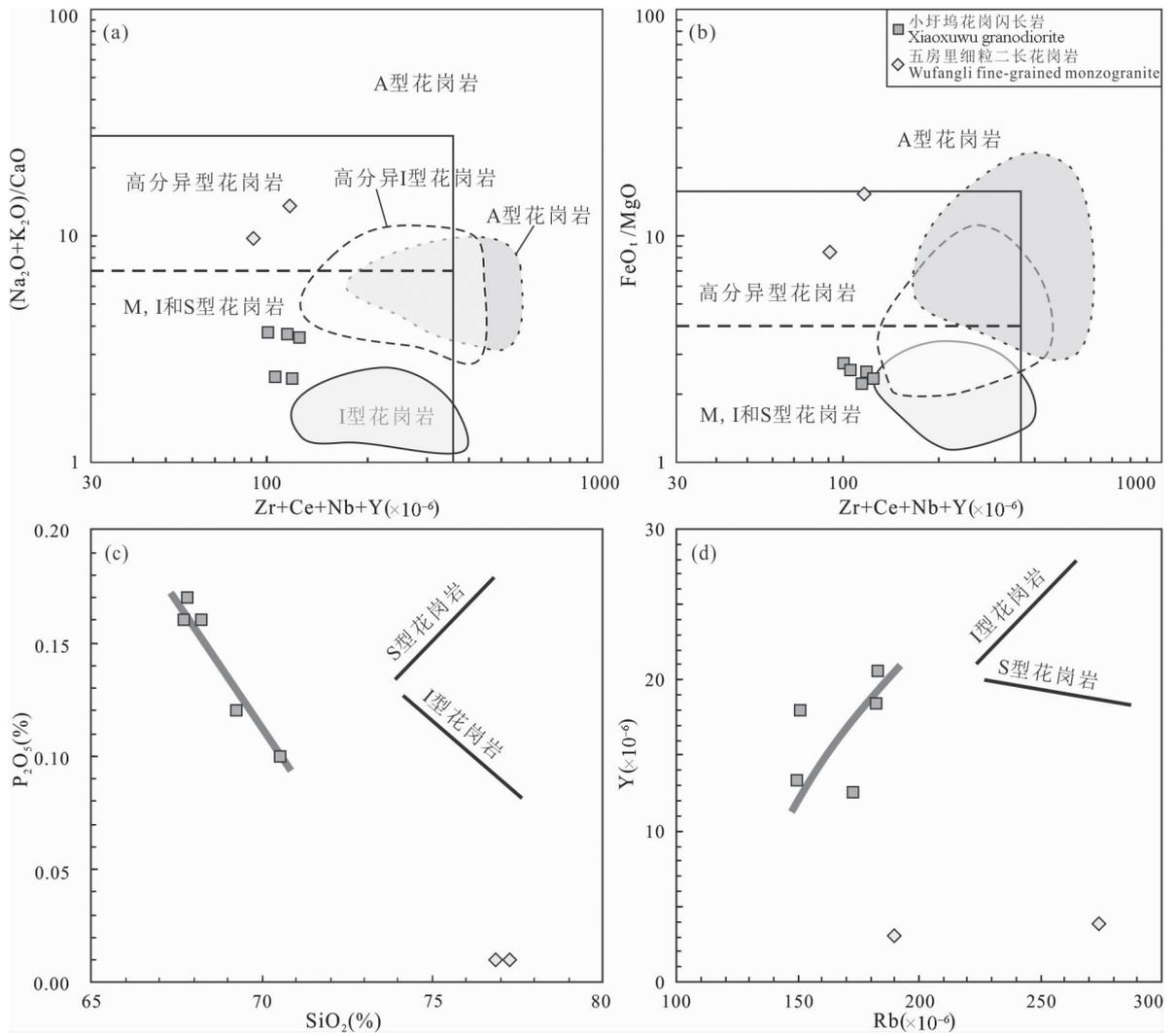


图6 浙江统里花岗岩判别图解

Fig. 6 Geochemical classification diagrams for granites from the Tongli area, Zhejiang

- (a) $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - (\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解; (b) $(\text{FeO}_t/\text{MgO}) - (\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解 (Whalen et al., 1987);
 (c) $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 图解; (d) $\text{Y}-\text{Rb}$ 图解; 浙西北晚中生代 I 型、高分异 I 型和 A 型三类花岗岩数据据 Tang Zengcai et al. (2019)
 (a) $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - (\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ diagram; (b) $(\text{FeO}_t/\text{MgO}) - (\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ diagram; (c) $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ diagram;
 (d) $\text{Y}-\text{Rb}$ diagram; The data of I-highly fractionated I- and A-type granites in Northwest Zhejiang from Tang Zengcai et al. (2019)

富硅、亏损 Ba、Nb、Ta、Sr 和 Eu 等元素,指示其母岩浆经历了显著的分异结晶作用,具有高分异型花岗岩的地球化学特征。

Tang Zengcai et al. (2019)对浙西北地区晚中生代花岗岩的年代学、地球化学和同位素数据进行了系统整理与分类研究,根据花岗岩的形成时代与地球化学特征,将区域上晚中生代花岗岩划分 I 型 (172~135 Ma)、高分异 I 型 (145~135 Ma)和 A 型 (135~123 Ma)三类。本次研究的小圩坞和五房里岩体应该分别对应了区域上的 I 型和高分异 I 型两类花岗岩。一般认为, I 型花岗岩是变火成岩中下地壳熔融的产物 (Petford et al., 1996; Chappell,

1999),且在成岩过程中存在幔源物质的参与。实验岩石学研究也表明含水中基性变质火成岩下地壳脱水熔融可以形成花岗质岩石 (Beard et al., 1991; Wolf et al., 1994)。在岩浆源区判别图解中 (图 7), 5 件小圩坞 I 型花岗岩样品均落在玄武岩或者角闪岩熔体区域,反应其起源于变火成岩中下地壳。同时,由于派生熔体的钾含量明显受源岩钾含量的影响,小圩坞高钾钙碱性 I 型花岗岩高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} (>1)$,反应岩浆源区具有富钾的特点 (Sisson et al., 2005)。此外,前人对浙西北地区晚中生代花岗岩开展了大量的锆石原位 Lu-Hf 同位素与全岩 Sr-Nd 同位素的研究,发现区域上花岗岩整体具

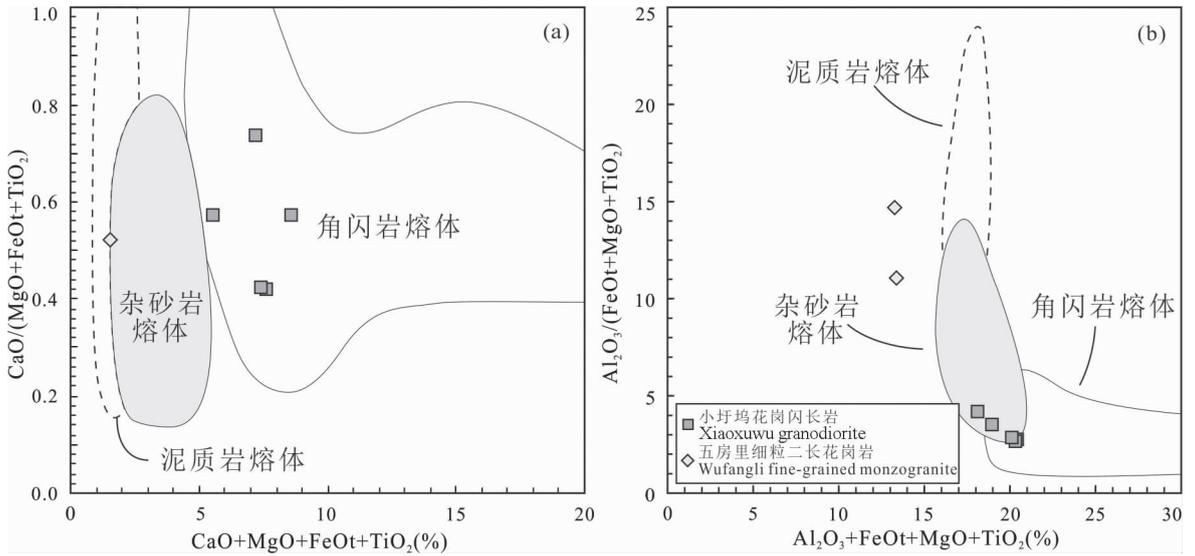


图 7 浙江统里花岗岩源区判别图解

Fig. 7 Geochemical classification diagrams for granites from the Tongli area, Zhejiang

(a)—CaO/(FeO+MgO+TiO₂)-(CaO+FeO+MgO+TiO₂)图解;

(b)—Al₂O₃/(FeO+MgO+TiO₂)-(Al₂O₃+FeO+MgO+TiO₂)图解(Douce, 1999)

(a)—CaO/(FeO+MgO+TiO₂)-(CaO+FeO+MgO+TiO₂) diagram; (b)—Al₂O₃/(FeO+MgO+TiO₂)-(Al₂O₃+FeO+MgO+TiO₂) diagram

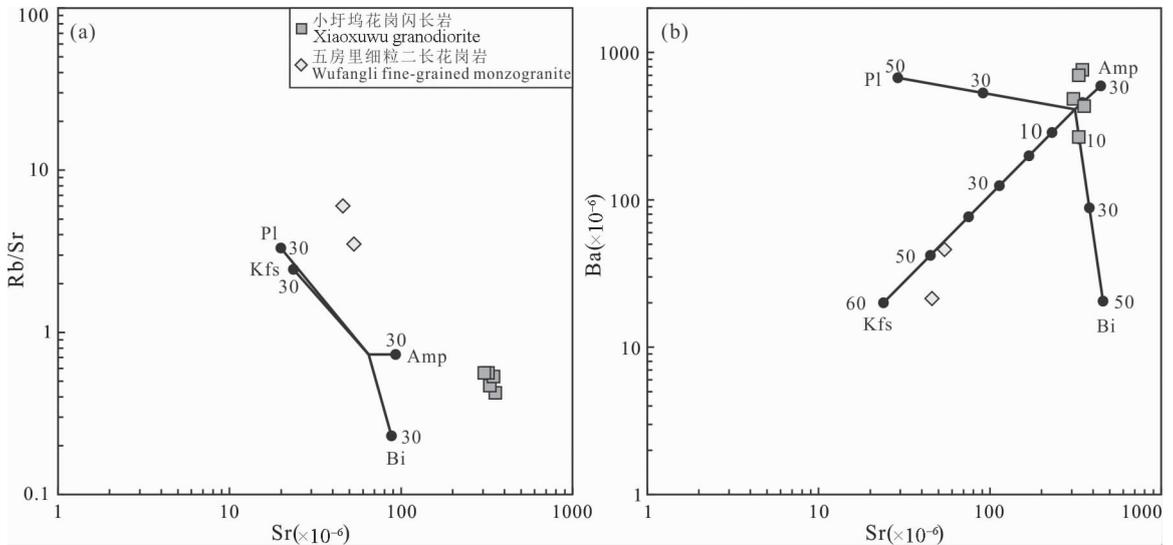


图 8 (a)—浙江统里花岗岩 Rb/Sr-Sr 图解;(b)—浙江统里花岗岩 Ba-Sr 图解(据 Rollinson, 1993)

Fig. 8 (a)—Rb/Sr-Sr diagram for granites from the Tongli area, Zhejiang; (b)—Ba-Sr diagram for granites from the Tongli area, Zhejiang (after Rollinson, 1993)

Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bi—黑云母;Amp—角闪石

Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Amp—amphibole

有相对富集的同位素组成,指示着古老的地壳源区(Jiang Yaohui et al., 2011; Li Zilong et al., 2013; Tang Zengcai et al., 2019)。以上表明小圩坞 I 型花岗岩应该起源于富钾古老的变火成岩中下地壳。

不同于小圩坞 I 型花岗岩,五房里高分异 I 型花岗岩具有明显高的 FeO/MgO (>8)、分异指数 (>95),以及强烈 Eu、Ba、Sr 亏损(图 5),表明岩浆

在成岩过程中经历了强烈的结晶分异作用(Wu Fuyuan et al., 2017)。其中,Nb 和 Ta 的亏损一般指示了富钛矿物相(如钛铁矿和/或金红石)的分离,Eu、Sr 和 Ba 的亏损与斜长石和/或钾长石的分离结晶作用有关,而其“勺型”的稀土配分模式(中稀土的强烈亏损)往往是角闪石结晶分异的结果。在 Rb/Sr-Sr 和 Ba-Sr 图解中(图 8),两类花岗岩样品之间

的演化趋势进一步支持五房里高分异型花岗岩在成岩过程中经历了明显的长石类矿物的分离结晶作用。考虑到小圩坞和五房里花岗岩体在形成时代相近,且二者在野外密切共生,因此,本文研究认为五房里高分异 I 型花岗岩是 I 型岩浆在浅层岩浆房内经历广泛结晶分异作用的产物。

5.3 地球动力学机制

在中生代,华南地区先后经历了印支运动和燕山运动两期主要的构造事件,奠定了华南现今的基本构造格架。研究认为,华南地区早中生代构造演化主要受控于华南与周边多个板块的碰撞,由此形成了区域上印支期构造-岩浆事件。而华南地区晚中生代的构造演化模式仍存有一定争议,目前,普遍认为华南地区在中侏罗世进入环太平洋构造域的活动大陆边缘挤压造山阶段(Li Zhengxiang et al., 2007; Mao Jianren et al., 2014; Dong Shuwen et al., 2018)。

根据大量的岩浆岩年代学数据,华南地区晚中生代的岩浆活动存在 ~ 160 Ma、 ~ 130 Ma 和 ~ 100 Ma 三个峰期,三期岩浆活动峰分别对应着区域强挤压造山期、主伸展期和弱挤压变形期,其中又以伸展期(~ 130 Ma)岩浆活动最为强烈(Dong Shuwen et al., 2018)。统里地区花岗岩体形成于 $146\sim 135$ Ma,应该是区域上由挤压向伸展转换期的岩浆产物,特别是五房里高分 I 型花岗岩的出现,可能与区域上普遍发育的高分异型花岗岩相一致,一起代表了区域构造环境由挤压向伸展的转变(Tang Zengcai et al., 2019)。

研究表明在洋壳俯冲过程中,板片撕裂、板片回转以及洋脊俯冲等过程均可以导致上覆岩石圈发生由挤压向伸展的转变,同时会触发区域上大规模的岩浆-成矿作用(Sun Weidong et al., 2010; Wu Hao et al., 2015, 2018)。其中弧型岩浆向海沟方向迁移往往作为深部俯冲洋壳板片回转最为重要的标志之一,华南晚中生代岩浆岩整体具有弧型岩浆岩的地球化学特征,并存在明显地由陆向海迁移的趋势(Li Zhengxiang et al., 2007; Gao Wanli et al., 2014; Wang Feifei et al., 2020; Wu Hao et al., 2021),因此,古太平洋板块俯冲过程中的板片回转无疑是华南晚中生代岩浆活动最为合理的解释。

在洋壳俯冲过程中,俯冲板片前缘逐渐降温并伴随着洋壳密度的增加,从而导致俯冲板块发生回卷,同时为深部软流圈地幔上涌提供了空间。板片

回转会导致深部地幔楔向海沟方向迁移,进一步导致朝向俯冲带方向的岩浆弧逐渐变年轻(Tatsumi, 1990; Gray et al., 2012)。因此,本文认为在古太平洋板块向华南板块之下俯冲的过程中,大洋岩石圈发生板片回转,并触发软流圈地幔物质上涌,诱导上覆大陆地壳发生熔融,形成了统里地区广泛发育的花岗岩体,而花岗质岩浆侵位过程中,在浅层岩浆房内经历不同程度的结晶分异过程,进一步导致了研究区内花岗岩体多样的地球化学组成。

6 结论

(1)本文首次在统里萤石成矿花岗岩体中获得了 $146\sim 135$ Ma 的锆石 U-Pb 年龄信息,表明成矿花岗岩体形成于早白垩世早期,与浙西北地区晚中生代岩浆活动时代相一致。

(2)全岩主微量地球化学显示小圩坞花岗闪长岩为高钾钙碱性 I 型花岗岩,而五房里细粒二长花岗岩为高分异 I 型花岗岩,研究认为二者起源古老的变火成岩中下地壳,后期经历了不同程度的结晶分异作用。

(3)统里地区花岗岩体形成的深部动力学机制可能与古太平洋俯冲过程中板片回转相关,是板片回转过程中深部软流圈上涌诱发大陆地壳物质重熔的产物。

References

- Beard J S, Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *Journal of Petrology*, 32(2): 365~401.
- Cao Mingxuan, Chu Pingli, Duan Zheng, Yu Minggang, Chen Rong, Fan Feipeng, Xing Guangfu. 2020. Spatial-temporal evolution and controversy of the Mesozoic volcanism in South China. *Geological Review*, 66(4): 795~812 (in Chinese with English abstract).
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8(2): 173~174.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chu Pingli, Duan Zheng, Liao Shengbing, Huang Wencheng, Hong Wentao, Zhu Yanhui, Shu Xujie. 2019. Petrogenesis and tectonic significances of Late Mesozoic granitoids in the Dahutang area, Jiangxi Province: constraints from zircon U-Pb dating, mineral-chemistry, geochemistry and Hf isotope. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1687~1707 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yurong, XieZhi, Chen Jiangfeng, Yu Yunwen, Hu Lihai. 2010. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Late Mesozoic basalts in eastern Zhejiang Province and its geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 198~212 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shanguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Xiong Long. 2016. The

- intrusive spatial temporal evolutionary framework in the Southeast China. *Geological Review*, 62(1): 3~16 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Li Hailong, Shi Wei, Xue Huaimin, Li Jianhua, Huang Shiqi, Wang Yongchao. 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny”. *Science China Earth Sciences*, 61: 1888~1909.
- Douce A E P. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168 (1): 55~75.
- Gao Wanli, Wang Zongxiu, Wang Duixing, Li Chunlin. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of Late-Mesozoic granite in southeastern (SE) Zhejiang Province and its Tectonic Implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 861~875 (in Chinese with English abstract).
- Gray R, Pysklywec R N. 2012. Geodynamic models of mature continental collision; evolution of an orogen from lithospheric subduction to continental retreat/delamination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B3).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 2: 99 ~ 107 (in Chinese with English abstract).
- Huang Guocheng, Zhang Yongshan, Cheng Haiyan. 2015. A study of regional metallogenic regularity and prospecting direction of fluoride deposits in Zhejiang Province. *Mineral Deposits*, 34(6): 1209~1222 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73~100.
- Jiang Yaohui, Zhao Peng, Zhou Qing, Liao Shiyong, Jin Guodong. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121: 55~73.
- Jin Qinghua, Li Chunlin, Wang Zongxiu. 2015. Geochronological and geochemical characteristics of the Jingning Intrusion, Zhejiang Province. *Geological Bulletin of China*, 34(2/3): 456 ~465 (in Chinese with English abstract).
- Li He, Ling Mingxing, Li Congying, Zhang Hong, Ding Xing, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Li Yiliang, Sun Weidong. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China; indication of ridge subduction. *Lithos*, 150: 26 ~36.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981~991 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China; a flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179~182.
- Li Zilong, Zhou Jing, Mao Jianren, Yu Minggang, Li Yinqi, Hu Yizhou, Wang Huihui. 2013. Age and geochemistry of the granitic porphyry from the northwestern Zhejiang Province, SE China, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3607~3622 (in Chinese with English abstract).
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xicheng, Hu Yanhua, Zhou Jibin, Zartman R E, Yang, Xiaoyong, Sun Weidong. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, eastern China. *Economic Geology*, 104(2): 303~321.
- Maitre L. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. *Recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks*, 193.
- Mao Jianren, Li Zilong, Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China; retrospect and prospect. *Science China: Earth Sciences*, 57: 2853 ~ 2877 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Mei Yanxiong. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~55 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, Guo Chunli. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636~658 (in Chinese with English abstract).
- Petford N, Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust; the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of petrology*, 37(6): 1491~1521.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific Technical.
- Shand S J. 1947. *Their Genesis, Composition, Classification and Their Relation to Ore Deposits with a Chapter on Meteorite*. In: *Eruptive Rocks*. New York: John Wiley.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, Glazner A F. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 635~661.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332~335 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weidong, Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Ding Xing, Liang Huaying. 2010. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization; an overview. *Science China Earth Sciences*, 40: 127~137 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zengcai, Zhou Hanwen, Hu Kaiming, Chen Zhongda, Wu Xiaoyong, Hu Wenjie, Dong Xuefa, Zhao Xudong, Yu Shengqiang, Zhang Jianfang. 2019. Petrogenesis of Late Mesozoic granites in northwest Zhejiang. *Earth Science*, 44(4): 1278~1294 (in Chinese with English abstract).
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Zhao Yu. 1999. Strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China. *Mineral Deposits*, 18: 316~322 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi Y, Maruyama S, Nohda S. 1990. Mechanism of backarc opening in the Japan Sea; role of asthenospheric injection. *Tectonophysics*, 181(1-4): 299~306.
- Wang Feifei, Zhang Yong, Han Zongzhu, Song Weiyu, Wu Hao, Ning Ze. 2020. The age and geochemistry of volcanic rocks of Dongtaishan Island in northern Fujian and their response to the subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Geology in China*, 47(5): 1426~1437 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoguang, Ni Pei, Zhao Kuidong, Wang Xiaolei, Liu Jiqiang, Jiang Shaoyong, Chen Hui. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 150: 135~154.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 95: 407~419.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts; an experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127 ~4145.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites; recognition and research.

- Science China Earth Sciences, 60: 1201~1219.
- Wu Hao, Li Cai, Xu Mengjing, Li Xingkui. 2015. Early Cretaceous adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet; implications for slab roll-back and subsequent slab break-off of the lithosphere of the Bangong-Nujiang Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 51~66.
- Wu Hao, Sun, Shulin, Liu Haiyong, Chu Hao, Ding Wei. 2018. An Early Cretaceous slab window beneath central Tibet, SW China; evidence from OIB-like alkaline gabbro in the Duolong area. *Terra Nova*, 31(1): 67~75.
- Wu Hao, Zhang Yong, Wang Feifei, Song Weiyu, Bai Fenglong, Xue Biying, Bi Shipu. 2021. Petrogenesis of Cretaceous volcanic rocks from islands off Fujian Province, East China Sea, and implications for episodic slab rollback of the paleo-Pacific plate. *Gondwana Research*, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.10.006>.
- Xiang Kunpeng, An Yayun, He Yongzhong, Zhao Lei, Yi Chengxing, Liu Kuiyong, Zhang Housong, Huang Yong, Pan Yingjuan, Deng Xiaojie. 2019. Provenance of the volcanic ash in the bottom of Middle Triassic, southwest margin of the South China plate; a case study of the tuff in Gannan region, Zhebao, Youjiang basin. *Geological Review*, 65(2): 319~334 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Wang Xiaolei, Zhao Kai, Du Dehong. 2020. Progresses and tendencies of granite researches in last decade; a review. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(5): 899~911 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Wang Guanghui. 2019. Formation and evolution of the plate activity and the structural system in the South China continental region. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 528~544 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Fangchun, Li Jiankang, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Shi Weike, Su Junnan, Chen Hu, Huang Xiaoqiang. 2019. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1392~1404 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 熊龙. 2016. 华南地区侵入岩时空演化框架. *地质论评*, 62(1): 3~16
- 高万里, 王宗秀, 王对兴, 李春麟. 2014. 浙东南晚中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(3): 861~875.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 2: 99~107.
- 黄国成, 张永山, 程海艳. 2015. 浙江省萤石矿床区域成矿规律与找矿方向研究. *矿床地质*, 34(6): 1209~1222.
- 金庆花, 李春麟, 王宗秀. 2015. 浙江景宁岩体岩石地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. *地质通报*, 34(Z1): 456~465.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981~991.
- 厉子龙, 周静, 毛建仁, 余明刚, 励音骐, 胡逸洲, 汪惠惠. 2013. 浙西北木瓜燕山期花岗岩斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 29(10): 3607~3622.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 44(12): 2593~2617.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. *地质学报*, 85(5): 636~658.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 11(1): 45~55.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. *地质通报*, 25(3): 332~335.
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 40: 127~137.
- 唐增才, 周汉文, 胡开明, 陈忠大, 吴小勇, 胡文杰, 董学发, 赵旭东, 余盛强, 张建芳. 2019. 浙西北地区晚中生代花岗岩的岩石成因. *地球科学*, 44(4): 1278~1294.
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 杨祝良, 赵宇. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. *矿床地质*, 18: 316~322.
- 王飞飞, 张勇, 韩宗珠, 宋维宇, 吴浩, 宁泽. 2020. 福建北部近岸东台山岛火山岩形成时代、地球化学与古太平洋板块俯冲的响应. *中国地质*, 47(5): 1426~1437.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217~1238.
- 向坤鹏, 安亚运, 贺永忠, 赵磊, 易成兴, 刘奎勇, 张厚松, 黄勇, 盘应娟, 邓小杰. 2019. 华南板块西南缘中三叠统底部火山灰来源——以右江盆地者堡敢南一带凝灰岩为例. *地质论评*, 65(2): 319~334.
- 徐夕生, 王孝磊, 赵凯, 杜德宏. 2020. 新时期花岗岩研究的进展和趋势. *矿物岩石地球化学通报*, 39(5): 899~911+1069.
- 杨明桂, 王光辉. 2019. 华南陆区板块活动与构造体系的形成演化——纪念李四光先生诞辰 130 周年. *地质学报*, 93(3): 528~544.
- 周芳春, 李建康, 刘翔, 李鹏, 黄志飏, 石威科, 苏俊男, 陈虎, 黄小强. 2019. 湖南仁里钨钼矿床矿体地球化学特征及其地质意义. *地质学报*, 93(6): 1392~1404.

参 考 文 献

- 曹明轩, 褚平利, 段政, 余明刚, 陈荣, 范飞鹏, 邢光福. 2020. 华南中生代火山活动时空演化及其问题探讨. *地质论评*, 66(4): 795~812.
- 褚平利, 段政, 廖圣兵, 黄文成, 洪文涛, 朱延辉, 舒徐洁. 2019. 江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义: 年代学、矿物化学、地球化学与 Lu-Hf 同位素制约. *地质学报*, 93(7): 1687~1707.
- 崔玉荣, 谢智, 陈江峰, 俞云文, 胡力海. 2010. 浙东南晚中生代玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. *高校地质学报*, 16(2): 198~212.

Formation age, geochemical signatures and geological significance of Early Cretaceous granites from the Tongli area, Zhejiang

CHEN Huanyuan* , JIA Fei

Zhejiang Province Nuclear Industry 262 Brigade, Huzhou, Zhejiang 313000, China

** Corresponding author; chenhuanyuan@qq.com*

Abstract

Recently, many medium- and large-scale fluorite deposits were identified in the Zhejiang Province. However, research on the metallogenic rock mass is still relatively scarce, limiting an understanding of regional mineralization. In this paper, we report new zircon U-Pb geochronologic and whole-rock major and trace element data, for the Xiaoxuwu and Wufangli granites of the Tongli area in Northwest Zhejiang. The zircon U-Pb dating yielded magmatic crystallization ages of 145~140 Ma and 135 Ma for the Xiaoxuwu granodiorites and the Wufangli fine-grained monzogranites, respectively. These new age data indicate that the Tongli plutons were emplaced in the early Early Cretaceous, coeval with the regional late Mesozoic magmatism. Geochemically, the samples can be divided into two groups of calc-alkaline I-type and highly fractionated I-type granites. All of these samples have high SiO₂ and Al₂O₃ contents, but low Fe₂O₃ and MgO contents, and belong chemically to metaluminous-peraluminous series. Furthermore, the Xiaoxuwu granodiorites are enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements but depleted in heavy rare earth elements and high field strength elements while the Wufangli fine-grained monzogranites are characterized by middle rare earth elements. Our research indicated that the Xiaoxuwu I-type granites were derived by partial melting of meta-igneous lower-crustal source while the Wufangli highly fractionated I-type granites underwent extensive fractional crystallization in the shallow magma chamber. Combined with the oceanward migration of late Mesozoic magmatic activity, we believe the slab rollback during oceanic subduction of paleo-Pacific is a reasonable explanation for the magmatism in the Tongli area.

Key words: northwest Zhejiang; Early Cretaceous; granite; zircon U-Pb dating; geochemistry; petrogenesis