

# 浙西北萧山—诸暨地区晚中生代侵入岩 地球化学特征及构造意义

解怀生, 张建芳, 龚瑞君, 许兴苗

(浙江省地质调查院, 杭州 311203)

**摘要:** 浙西北萧山—诸暨地区晚侏罗世末期花岗(石英)闪长岩与早白垩世末期(辉石)闪长岩具有以下地球化学特征:低硅、贫碱、富钙镁铁,弱负钨异常,稀土配分曲线右倾,富集 K, Rb, Ba, Th, U 等,亏损 Nb, Ta 等, Sr, Ti 亏损不明显。晚侏罗世末期花岗岩与早白垩世末期花岗(斑)岩均具有高硅、富碱、贫钙镁,强负钨异常的特征;晚侏罗世侵入岩具“V”型稀土配分曲线,强富集 K, Rb, Th, U 等,相对富集 Nb, Ta, 强亏损 Ba, Sr, Ti 等特征;早白垩世侵入岩具右倾稀土配分曲线,富集 K, Rb, Th, U 等,亏损 Nb, Ta, Sr, Ti, Ba 不亏损等特征。岩石构造地球化学图解分析表明,晚侏罗世末期 I-A 型花岗岩类成岩构造环境具有从俯冲挤压碰撞作用向后碰撞或后造山作用演化的特征;早白垩世末期(高分异)I 型花岗岩类岩石主要与火山-次火山喷发-侵入作用关系密切,成岩构造环境主要与区域伸展作用有关。

**关键词:** 浙西北;晚中生代;侵入岩;岩石化学;构造地球化学

**中图分类号:** P588.12 **文献标识码:** A

## 0 引言

浙江晚中生代火山-岩浆活动十分发育,以 NE 向江绍断裂带为界,浙东南沿海火山活动区广泛发育 I-A 型复合花岗岩,成岩时代主要集中于早白垩世<sup>[1-8]</sup>,具有多期次特征;浙西北晚中生代火山活动不如浙东南发育,侵入岩出露较少,前人对其研究较少。那么浙西北是否存在晚中生代 I-A 型复合花岗岩呢?

浙西北萧山—诸暨地区广泛发育晚中生代侵入岩,区内南东侧侵入岩锆石 U-Pb 年龄为 150.1~147.2 Ma<sup>[9]</sup>,为晚侏罗世末期;北西侧侵入岩根据侵入围岩建德群(134~115 Ma)黄尖组火山岩锆石 U-Pb 年龄 125~118 Ma<sup>[10]</sup>,推断其侵入时代应为早白垩世末期。本文对萧山—诸暨地区晚中生代侵入岩成岩地质背景、岩石地球化学特征等进行研究,并探讨该地区成岩构造环境,对构建浙江乃至华南地区晚中生代构造演化模型具有一定意义。

## 1 区域地质概况

浙西北萧山—诸暨地区位于扬子板块与华夏板块的江绍结合带北东段(图 1a),介于 NE 向球川—萧山断裂和江山—绍兴断裂之间, NW 向孝丰—三门湾断裂从区内中部通过。区内地质构造演化经历了古陆弧碰撞拼贴造山阶段→板内俯冲造山阶段→活动大陆边缘块断造山阶段<sup>①</sup>。南东部诸暨地区中元古界至第四系发育较齐全;印支运动使区内古老地层发生了强烈的褶皱和断裂,区内 NE 向褶皱及断裂发育, NW 向断裂形成较晚,穿插切割 NE 向断裂。北西部萧山地区以晚中生代火山喷发-侵入构造活动最为发育,出露地层以下白垩统建德群黄尖组火山碎屑岩为主,形成绍兴夏履桥—萧山浦阳火山构造洼地,区内 NW 向及 NE 向断裂构造发育,并发育一系列 NE 向串珠状排列的破火山口及火山通道(图 1b)。

收稿日期: 2012-10-24; 改回日期: 2013-08-08; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(编号:1212010011730)资助。

作者简介: 解怀生(1973-),男,高级工程师,从事基础地质与矿产调查工作。E-mail: zhjianfang@126.com

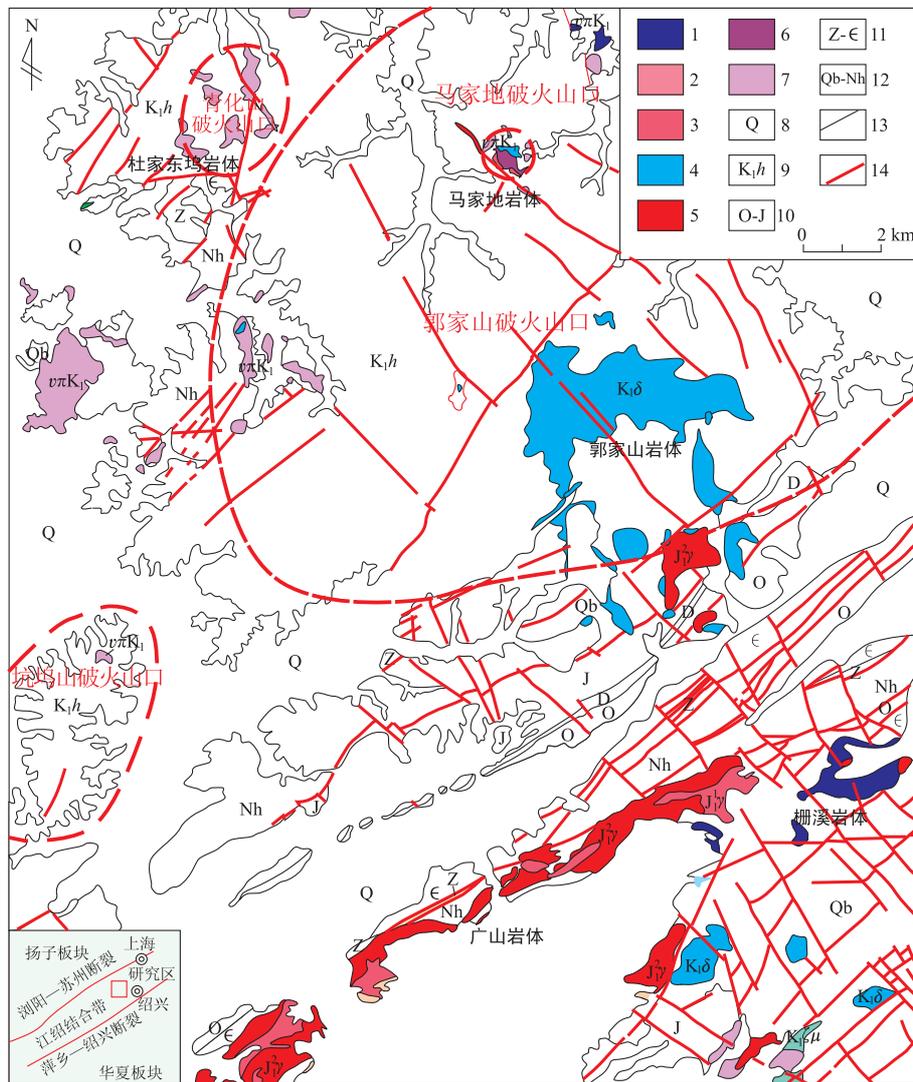


图 1 萧山—诸暨地区地质构造及晚中生代侵入岩分布图

Fig. 1 Map showing distribution of geological structure and Late Mesozoic intrusive rocks in Xiaoshan-Zhuji region

1. 栅溪石英闪长岩; 2. 广山中粒花岗岩; 3. 广山细粒花岗岩; 4. 郭家山闪长岩; 5. 马家地花岗岩;
6. 马家地花岗斑岩; 7. 东坞霏细岩(流纹岩); 8. 第四系; 9. 白垩纪黄尖组火山岩; 10. 含砾石英砂岩、含砾砂岩、钙质泥岩砂岩; 11. 白云岩、(白云质)灰岩、硅质岩; 12. 凝灰质砂岩、含砾砂岩、硅质粉砂岩; 13. 地质界线; 14. 断裂

## 2 侵入岩地质特征

晚侏罗世末侵入岩主要发育于南东部 NE 向江藻—桃源背斜核部及断裂带,侵入于南华系、震旦系及寒武系中,典型岩体及岩石类型主要为栅溪花岗(石英)闪长岩体、广山中粒及细粒花岗岩体;早白垩世末期侵入岩主要发育于破火山口或火山通道中,典型岩体及岩石类型主要为郭家山破火山口(辉石)闪长岩体、马家地破火山口细粒花岗岩及花岗斑岩、

杜家东坞火山通道霏细(斑)岩和流纹(斑)岩。萧山—诸暨地区典型岩体岩石学特征见表 1。

## 3 侵入岩地球化学特征

### 3.1 主量元素

晚中生代侵入岩主量、稀土、微量元素分析数据列于表 2。根据野外地质特征及年代学研究表明,晚中生代两期侵入岩均为(辉石、花岗)闪长岩至花岗(斑)岩演化过程,在 Hark 图解(图 2)中, SiO<sub>2</sub> 与

表1 萧山—诸暨地区典型岩体岩石学特征

Table 1 The petrological characteristics of typical intrusive bodies in Xiaoshan-Zhuji region

岩体名称	形态及岩性	颜色及结构	矿物组成	蚀变特征
栅溪岩体	呈小岩株产出;内部主要为花岗闪长岩,往南东边缘过渡为石英闪长岩	灰白-暗灰色,半自形中细粒结构,块状构造	斜长石(55%~60%)、钾钠长石(5%~10%)、石英(10%~25%)、角闪石(5%~15%)、黑云母(5%~10%);副矿物:锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿、褐帘石	蚀变较弱,主要为绿泥石化、绢云母化,其次为碳酸盐化、硅化、黄铁矿化
广山岩体	中粒花岗岩:呈岩株产出,受NE向构造带控制	浅肉红色,内部中粒结构,边缘中细粒似斑状结构	钾钠长石(35%~50%)、斜长石(5%~15%)、石英(25%~35%)、黑云母(2%~5%);副矿物主要为磁铁矿、黄铁矿、赤褐铁矿、锆石、磷灰石、萤石、褐帘石等	蚀变较强,钠化、钾长石化,断层带附近强云英岩化、黄铁矿化、绿泥石化、绿帘石化及高岭土化等
	细粒花岗岩:沿中粒花岗岩体中间或边缘侵入,呈NE-NNE向	浅肉红色,自形-半自形细粒结构,粒径一般<1mm	钾钠长石(±40%)、斜长石(±30%)、石英(±30%)及少量黑云母;副矿物:磁铁矿、钛铁矿、榍石、褐帘石、辉钼矿、萤石、锆石、赤褐铁矿等	蚀变微弱,局部绿帘石化
郭家山岩体	侵入郭家山破火山口,总体近EW向;(辉石)闪长岩,局部向石英闪长岩过渡	绿灰-浅灰色,半自形粒状结构,局部不等粒和细粒斑状结构	斜长石(65%~90%)、石英(1%~10%)、钾长石(5%~10%)、辉石(3%~5%)、角闪石(1%~3%)、黑云母(2%~3%);副矿物:磷灰石、榍石、锆石和微量铁矿物	绿泥石化、绢云母化、绿帘石化等
马家地岩体	侵入于马家地破火山口,总体呈圆环状,从外至内侵入顺序为细粒闪长岩→细粒钾长花岗岩→花岗斑岩	闪长岩:绿褐-褐灰色,半自形-他形细粒结构	斜长石(75%~90%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(5%~10%)、石英(1%~3%),偶见钾长石,锆石、磷灰石微量	绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化
		钾长花岗岩:浅肉红色,细粒结构	石英(±40%)、钾长石(48%~55%),少量钠长石、黑云母,微量磁铁矿;副矿物:锆石、榍石、磷灰石、独居石、金红石、锐钛矿、重晶石等	岩石具轻微绢云母化,常见磁铁矿石英脉穿插充填其间
		花岗斑岩:浅肉红色,斑状结构,基质显微文象结构和花岗结构	斑晶:钾长石(5%~8%)、石英(3%~5%)、黑云母(1%~2%)和少量更长石;基质:石英和长石微晶,含量约90%	岩石风化较强,蚀变较弱
杜家东坞岩体	侵入青化山破火山口及其周围;霏细(斑)岩或流纹(斑)岩	浅肉红色,斑状结构,基质具包含霏细结构	斑晶:钾长石(2%~4%)、斜长石(2%~8%),少量石英和黑云母;基质:长石和石英;副矿物:锆石、磷灰石及少量金属矿物	内外接触带发育硅化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化及黄铁矿化

TiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, FeO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO 均呈反比关系,与 K<sub>2</sub>O 呈正比关系,表明两期侵入岩均经历了分离结晶演化作用。

晚侏罗世末栅溪花岗(石英)闪长岩类  $w(\text{SiO}_2) = 60.53\% \sim 67.55\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 4.83\% \sim 7.3\%$ , 平均  $5.86\%$ ;  $w(\text{CaO}) = 2.12\% \sim 5.5\%$ , 平均  $4.03\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 1.03\% \sim 2.99\%$ , 平均  $1.87\%$ ;  $A/NCK = 0.87 \sim 1.44$ , 平均  $1.05$ , 为准铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.40 \sim 0.94$ , 平均  $0.67$ ; 里特曼指数  $\delta = 0.95 \sim 2.51$ , 属钙碱性系列。广山中粒花岗岩类  $w(\text{SiO}_2) = 70.39\% \sim 77.13\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 6.88\% \sim 9.32\%$ , 平均  $8.27\%$ ;  $w(\text{CaO}) =$

$0.22\% \sim 2.42\%$ , 平均  $0.75\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 0.06\% \sim 0.92\%$ , 平均  $0.36\%$ 。  $A/NCK = 0.95 \sim 1.51$ , 平均  $1.04$ , 为准铝质-过铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.98 \sim 2.41$ , 平均  $1.33$ ; 里特曼指数  $\delta = 1.68 \sim 2.72$ , 平均  $2.15$ , 属高钾钙碱性系列。广山细粒花岗岩类  $w(\text{SiO}_2) = 72.53\% \sim 77.15\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 7.98\% \sim 8.74\%$ , 平均  $8.29\%$ ;  $w(\text{CaO}) = 0.48\% \sim 1.62\%$ , 平均  $0.89\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 0.02\% \sim 0.39\%$ , 平均  $0.22\%$ ; 铝饱和指数  $A/NCK = 0.93 \sim 1.05$ , 平均  $0.99$ , 为准铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.12 \sim 1.9$ , 平均  $1.4$ ; 里特曼指数  $\delta = 1.90 \sim 2.41$ , 平均  $2.1$ , 属高钾钙碱性系列。

表 2 浙江萧山—诸暨地区晚中生代典型岩体元素组成及参数值

Table 2 Composition and parameters for typical late Mesozoic intrusive bodies in Zhejiang Xiaoshan-Zhuji region

时代	晚侏罗世末期									早白垩世末期					
	栅溪(花岗岩)石英闪长岩			广山中粒花岗岩					广山细粒花岗岩		郭家山闪长岩		马家地细粒花岗岩		马家地花岗岩
岩体	SX-1	SX-2	SX-a	GSI-1	GSI-2	GSI-3	Zhn-1	Zhn-2	GS2-1	GS2-2	GJS-2	7081349	MJD-2	MJD-3	MJD-4
样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO <sub>2</sub>	60.71	60.53		73.43	74.94	73.62			72.53	74.73	58.79	58.35	74.69	74.53	71.55
TiO <sub>2</sub>	0.8	0.85		0.11	0.05	0.16			0.29	0.1	0.8	0.71	0.07	0.08	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.33	14.95		12.94	12.49	12.64			13.33	12.33	15.41	16.56	13.31	13.17	15.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.78	7.21		1.54	1.42	2.12			2.12	1.56	6.18	3.24	0.92	1.13	1.41
FeO	4.1	3.88		0.86	0.72	1.22			1.04	0.72	3.77	3.49	0.29	0.36	0.32
MnO	0.14	0.16		0.1	0.07	0.11			0.06	0.1	0.14	0.35	0.06	0.07	0.06
MgO	2.73	2.99		0.2	0.06	0.39			0.4	0.14	3.37	3.71	0.11	0.14	0.33
CaO	5.5	5.28		0.8	0.39	1.12			1.62	0.84	5.7	5.96	0.21	0.23	0.21
Na <sub>2</sub> O	3.69	3.59		4.04	4.14	4			3.17	3.89	4.53	3.66	4.49	4.45	4.54
K <sub>2</sub> O	1.48	1.59		4.65	5.18	4.23			4.89	4.85	2.3	2.38	4.75	4.59	4.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.25		0.019	<0.01	0.035			0.093	0.012	0.25		0.015	0.013	0.029
TFeO	10.2	10.37		2.25	2	3.13			2.95	2.12	9.33	6.41	1.12	1.38	1.59
TFeO/ (TFeO+MgO)	0.79	0.78		0.92	0.97	0.89			0.88	0.94	0.73	0.63	0.91	0.91	0.83
TFeO/ MgO	3.74	3.47		11.23	33.3	8.02			7.37	15.17	2.77	1.73	10.16	9.84	4.82
A/CNK	0.87	0.87		0.98	0.95	0.96			0.99	0.93	0.76	0.85	1.03	1.04	1.19
δ	1.51	1.53		2.48	2.72	2.21			2.2	2.41	2.95	2.38	2.69	2.59	2.85
NK/A	0.5	0.51		0.9	1	0.88			0.79	0.95	0.65	0.52	0.94	0.93	0.82
Ba	678	759	692	351	75.6	361	257	348	328	128	825	1142	846	864	842
Rb	64.9	68.2	64	219	287	206	171	138	565	233	63.6	116.9	74.6	78.8	62.5
Sr	503	482	440	61.2	8.43	107	42	177	104	31.8	824	831.9	42.3	41.2	81.4
Y	22.5	25.9		40.4	75.5	50.1	82.99	28.77	68.3	51.5	17.6	13.49	7.39	7.7	17.4
Zr	136	141	156	93	107	106	120	129	169	85	183	313.1	105	106	134
Nb	9.47	11.1	10.8	25.8	36.7	25.1	37.5	15.7	44.2	29	5.92	14.8	4.16	7.22	6.38
Th	9.27	7.06	5.4	24.2	28.1	21.4	15	8.1	65.7	26.4	6.88	22.7	10.2	10.7	10.4
Pb	20	23.3		30.9	47.5	21.8			33.4	34.8	21		30.2	35.5	38.4
Ga	21.8	21.5		17.9	21.6	17.5			19.5	17.3	22.3		16.2	16.7	18.1
Ni	14.8	17.1	8.1	1.81	3.53	2.43	8.4	7.3	1.49	2.32	39.2	21.7	2.45	3.38	2.45
V	137.6	139.8		7.89	2.48	15.8			24.8	6.37	180	115.9	4.26	4.98	14.8
Cr	43.6	50.4	138	5.46	7.13	5.91	231	141	4.02	5.23	47.2	85.8	7.45	8.95	5.49
Hf	8.84	9.55	4.3	7.45	8.76	6.57	6.6	3.2	8.56	5.63	11.5		5.74	5.65	7.05
Cs	5.7	7.03	5.2	3.13	2.78	4.27	3.8	6.6	41.2	3.4	2.82	7.92	0.82	0.85	1.33
Sc	13.2	14.6		3.98	8.47	5.32			6.73	3.55	14.4	11.8	2.03	2.31	3.03
Ta	0.76	0.87	1.3	3.5	3.13	2.38	3	1.7	7.59	3.41	0.46	0.5	0.47	0.76	0.67
Co	17.7	18.5		1.29	1.14	2.24			3.02	1.44	21.2	14.2	1.48	1.6	1.41
U	2.58	1.93		6.56	9.44	7.15			21.8	8.84	2.09	3.74	1.73	1.87	1.21
La	30.8	28.8	29.01	19.1	15.4	23.9	17.17	25.42	52.7	20.9	25.3	36.2	27.7	26.9	57.4
Ce	65	65.7	62.49	41.5	40.3	51.2	42.46	51.06	126	46.7	51.2	76.8	50.3	59.1	96.2
Pr	7.22	7.15	7.68	5.42	5.99	6.39	5.47	6.41	12.3	5.92	6.34	8.75	5.62	5.48	9.7
Nd	30.2	30.9	28.25	23.4	29.4	27.4	27.08	22.54	48.7	25.5	27.8	32.12	20.5	20.2	36.7
Sm	5.56	5.93	5.12	5.88	9.88	6.72	8.33	4.61	10	6.36	5.03	5.54	3.2	3.19	5.57
Eu	1.38	1.37	1.26	0.42	0.12	0.53	0.2	0.77	0.79	0.31	1.27	1.37	0.45	0.43	1.01
Gd	4.69	5.12	4.2	5.05	9.63	6.22	9.74	3.97	8.55	5.83	4.1	3.95	2.49	2.37	4.32
Tb	0.78	0.86	0.7	1	2.14	1.32	2.02	0.75	1.68	1.28	0.62	0.57	0.29	0.29	0.63
Dy	4.21	4.69	3.25	6.32	12.6	8.16	13.18	4.67	10.5	8.05	3.33	2.75	1.45	1.47	3.28
Ho	0.79	0.89	0.57	1.33	2.51	1.7	2.72	1	2.25	1.75	0.62	0.49	0.25	0.26	0.59
Er	2.22	2.54	1.51	4.52	7.59	5.26	8.08	2.95	6.85	5.45	1.79	1.38	0.8	0.84	1.68
Tm	0.3	0.34	0.24	0.72	1.14	0.83	1.37	0.42	1.07	0.88	0.23	0.2	0.1	0.11	0.22
Yb	1.9	2.23	1.45	5.2	7.71	5.75	8.92	2.98	7.53	6.55	1.52	1.22	0.66	0.72	1.37

续表 2

时代	晚侏罗世末期									早白垩世末期						
岩体	栅溪(花岗)石英闪长岩			广山中粒花岗岩					广山细粒花岗岩		郭家山闪长岩		马家地细粒花岗岩		马家地花岗斑岩	
样号	SX-1	SX-2	SX-a	GS1-1	GS1-2	GS1-3	Zhn-1	Zhn-2	GS2-1	GS2-2	GJS-2	7081349	MJD-2	MJD-3	MJD-4	
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Lu	0.28	0.32	0.22	0.79	1.15	0.86	1.43	0.51	1.09	1	0.23	0.18	0.1	0.11	0.2	
ΣREE	155.33	156.84	145.95	120.65	145.56	146.24	148.17	128.06	290.01	136.48	129.38	171.52	113.91	121.47	218.87	
LREE	140.16	139.85	133.81	95.72	101.09	116.14	100.71	110.81	250.49	105.69	116.94	160.78	107.77	115.30	206.58	
HREE	15.17	16.99	12.14	24.93	44.47	30.10	47.46	17.25	39.52	30.79	12.44	10.74	6.14	6.17	12.29	
L/H	9.24	8.23	11.02	3.84	2.27	3.86	2.12	6.42	6.34	3.43	9.40	14.97	17.55	18.69	16.81	
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	11.63	9.26	14.35	2.63	1.43	2.98	1.38	6.12	5.02	2.29	11.94	21.28	30.10	26.80	30.05	
δ(Eu)	0.80	0.74	0.81	0.23	0.04	0.25	0.07	0.54	0.25	0.15	0.83	0.85	0.47	0.46	0.61	
δ(Ce)	1.03	1.09	1.00	0.99	1.03	1.00	1.07	0.95	1.17	1.01	0.96	1.03	0.93	1.13	0.91	

数据来源:1~2,4~6,9~10 引自文献[11];3,7~8 引自文献[12];12 引自注释②;部分未列出数据引自注释③④。

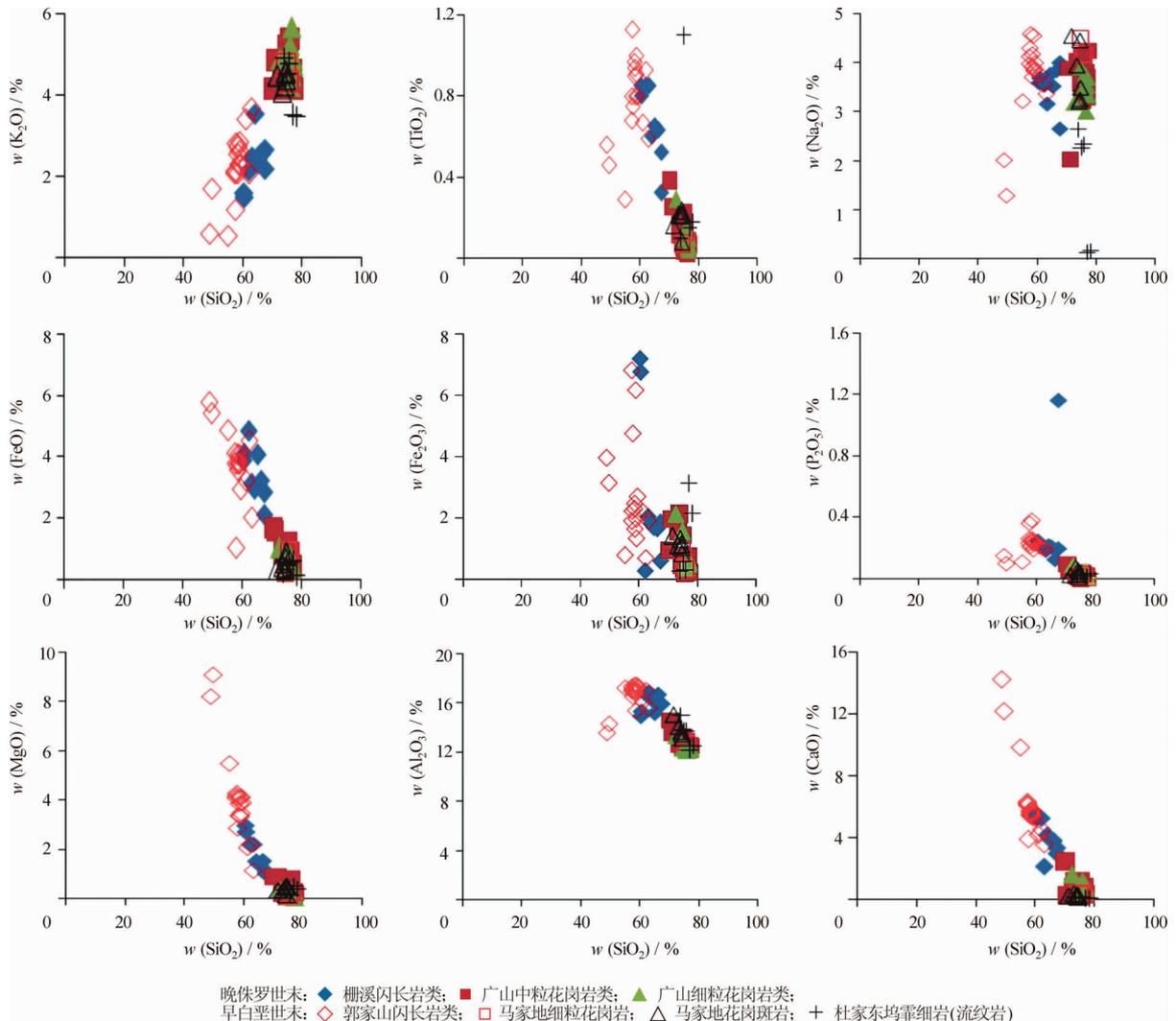


图 2 萧山—诸暨地区晚中生代侵入岩 Hark 图解

Fig. 2 The Hark diagram for Late Mesozoic intrusive rocks in Xiaoshan-Zhuji region

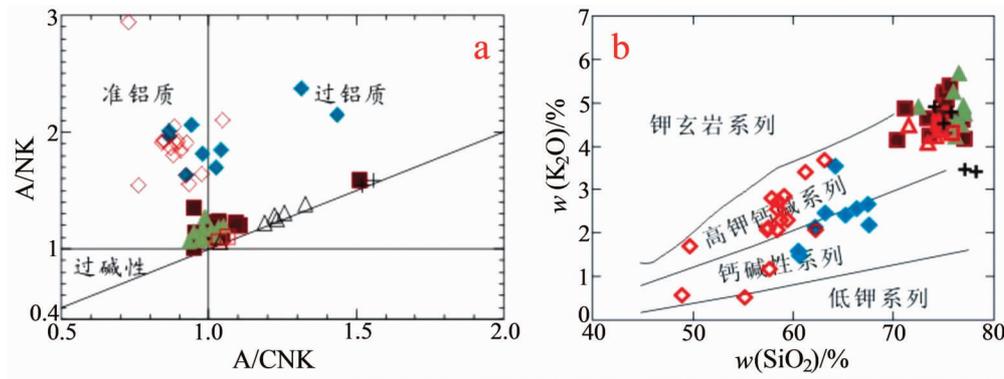


图 3 A/NK—A/NCK(a)和 K<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> (b)判别图解

Fig. 3 Discrimination diagrams for A/NK - A/NCK(a) and K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> (b)

图例同图 2

早白垩世末期郭家山(辉石)闪长岩类  $w(\text{SiO}_2) = 48.89\% \sim 63.11\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 2.59\% \sim 7.39\%$ , 平均  $5.73\%$ ;  $w(\text{CaO}) = 3.59\% \sim 14.28\%$ , 平均  $6.32\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 1.16\% \sim 9.11\%$ , 平均  $3.99\%$ 。  $A/NCK = 0.45 \sim 1.67$ , 平均  $0.88$ , 为准铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.17 \sim 1.33$ , 平均  $0.65$ ; 里特曼指数  $\delta = 1.14 \sim 3.68$ , 平均  $2.31$ , 属钙碱性系列。马家地细粒花岗岩类  $w(\text{SiO}_2) = 74.69\% \sim 75.73\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 8.46\% \sim 9.24\%$ , 平均  $8.85\%$ ;  $w(\text{CaO}) = 0.21\% \sim 0.3\%$ , 平均  $0.26\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 0.11\% \sim 0.24\%$ , 平均  $0.18\%$ 。铝饱和指数  $A/NCK = 1.03 \sim 1.06$ , 为准铝质-过铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 8.46 \sim 8.24$ ; 里特曼指数  $\delta = 2.19 \sim 2.69$ , 属高钾钙碱性系列。马家地花岗岩斑岩类  $w(\text{SiO}_2) = 71.55\% \sim 74.71\%$ ;  $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 7.44\% \sim 9.04\%$ , 平均  $8.2\%$ ;  $w(\text{CaO}) = 0.12\% \sim 0.37\%$ , 平均  $0.24\%$ ;  $w(\text{MgO}) = 0.14\% \sim 0.52\%$ , 平均  $0.38\%$ 。铝饱和指数  $A/NCK = 1.04 \sim 1.33$ , 平均  $1.21$ , 为准铝质-过铝质;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.99 \sim 1.4$ , 平均  $1.17$ ; 里特曼指数  $\delta = 1.77 \sim 2.85$ , 平均  $2.2$ , 属高钾钙碱性系列。

### 3.2 稀土元素、微量元素

在稀土元素组成(表 2, 图 4a)方面, 晚侏罗世末栅溪闪长岩类  $w(\sum \text{REE}) = 155.32 \times 10^{-6} \sim 156.70 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土分异较明显,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.23 \sim 9.24$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 9.26 \sim 11.61$ ,  $\delta(\text{Eu}) = 0.74 \sim 0.80$ , 具弱负偏异常, 球粒陨石标准化稀土配分曲线具有向右弱倾的特征; 广山花岗岩类  $w(\sum \text{REE}) = 120.71 \times 10^{-6} \sim 290.34 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土分异不明显,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 2.27 \sim 6.35$ ,

$(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.43 \sim 5.02$ ,  $\delta(\text{Eu}) = 0.04 \sim 0.26$ , 具强负偏异常, 球粒陨石标准化稀土配分曲线具有相似的“V”型特征。早白垩世末期郭家山闪长岩类  $w(\sum \text{REE}) = 129.38 \times 10^{-6} \sim 171.52 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 9.4 \sim 14.97$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.94 \sim 21.28$ , 轻重稀土分异较为明显,  $\delta(\text{Eu}) = 0.83 \sim 0.85$ , 具弱负偏异常, 稀土配分曲线具右倾特征; 马家地花岗岩-花岗斑岩  $w(\sum \text{REE}) = 113.91 \times 10^{-6} \sim 218.87 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 16.81 \sim 18.69$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 26.8 \sim 30.1$ , 轻重稀土分异较为明显,  $\delta(\text{Eu}) = 0.47 \sim 0.61$ , 具强负偏异常, 稀土配分曲线具右倾特征。

在微量元素组成(表 2, 图 4b)方面, 晚侏罗世末栅溪闪长岩类富集 K, Rb, Ba 等大离子亲石元素(LILE), 弱亏损 Nb, Ta, 富集 Th, U 等高场强元素(HFSE), Sr, Ti 亏损不明显; 广山花岗岩类强富集 K, Rb 等大离子亲石元素(LILE), 相对富集 Nb, Ta, Th, U 等高场强元素(HFSE), 但强亏损 Ba, Sr, Ti 等元素, 相对亏损 Cr, Co, Ni, V 等元素, 具有 A 型花岗岩特征。早白垩世末期郭家山闪长岩类富集 K, Rb, Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb, Ta, 富集 Th, U 等高场强元素, Sr, Ti 亏损不明显; 马家地花岗岩-花岗斑岩富集 K, Rb 等大离子亲石元素, 亏损 Nb, Ta, Ti, P 等高场强元素; 亏损 Sr 元素, 但不亏损 Ba 元素。

## 4 侵入岩成因与构造背景

花岗岩根据其源岩性质通常被分为 I 型、S 型和 M 型, A 型花岗岩具有特殊的地球化学特征和

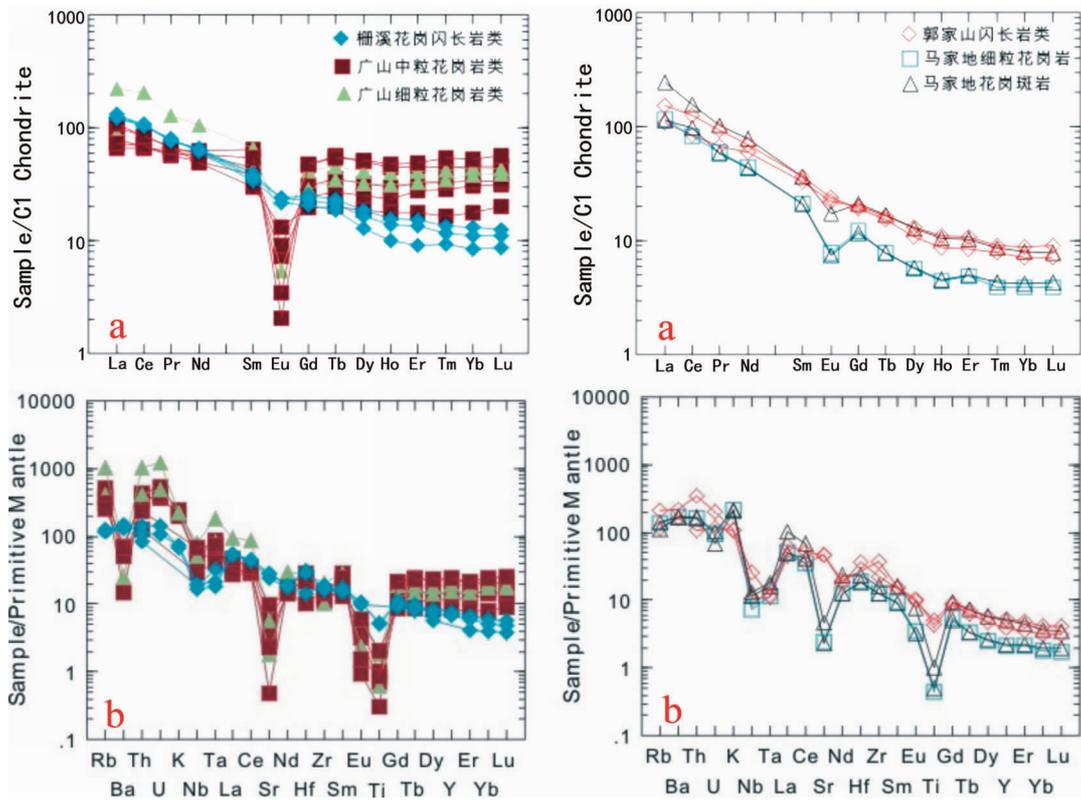


图 4 稀土元素球粒陨石标准化配分型式(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns(a) and primitive mantle normalized trace element spidergram(b)

构造背景。A 型花岗岩与 I 型花岗岩相比,往往具有相对较高的  $K_2O$ , HFSE (Zr, Ce, Nb, Y) 含量及  $FeO/MgO$ ,  $10^4 Ga/Al$  值等,有时 A 型花岗岩与高分异 I 型花岗岩也很难区分<sup>[13]</sup>。

如前所述,两期侵入岩地球化学特征,晚侏罗世末花岗(石英)闪长岩类  $TFeO/MgO$  值(2.23~3.94)与 I 型花岗岩平均值(2.27)<sup>[14]</sup> 相近,  $10^4 Ga/Al$  值为 2.68~2.71,中粒及细粒花岗岩  $TFeO/MgO$  值分别为 1.86~33.30 和 3.1~44.70,平均分别为 6.55 和 11.87,与 A 型花岗岩平均值(13.4)<sup>[15]</sup> 相近,  $10^4 Ga/Al$  值为 2.62~3.27。早白垩世末期侵入岩  $TFeO/MgO$  值为 0.91~10.16,平均为 3.10,与 I 型花岗岩平均值(2.27)相近,  $10^4 Ga/Al$  值为 2.3~2.73。在  $K_2O-Na_2O$  图解(图 5a)中,两期闪长岩类均落入 I 型花岗岩区域,花岗(斑)岩类均落入 A 型花岗岩区域;晚侏罗世末期柵溪花岗(石英)闪长岩和早白垩世末期郭家山(辉石)闪长岩地球化学特征类似,均具有低硅,贫碱,富钙、镁和铁, Sr, Eu, Ti 亏损均不明显,属于 I 型花岗岩类;而晚侏罗世末期广山花岗岩和早白垩

世末期马家地花岗(斑)岩则具有高硅,富碱,贫钙、镁、铁的特征,经历了高程度的分异演化,但两者稀土、微量元素特征具有较明显的区别,与浙东南沿海地区晚中生代 I-A 型复合花岗岩地球化学特征相比,广山花岗岩具有 A 型花岗岩特征,而马家地花岗(斑)岩则可能属于高分异 I 型花岗岩。

许多学者认为,华南中侏罗世从特提斯体制向太平洋体制进行转变<sup>[16-19]</sup>,约在(165±5)Ma 进入太平洋构造域的活动大陆边缘挤压造山阶段<sup>[18-19]</sup>;早白垩世以后((140±5)Ma)转换为后碰撞拉张环境,持续大规模岩石圈伸展减薄作用<sup>[17,20-22]</sup>,造成大规模火山喷发。毛建仁等<sup>[23]</sup> 研究认为,晚中生代东南沿海经历了太平洋板块俯冲挤压(165~150 Ma)、左行走滑和板内环境(145~125 Ma)、大陆岩石圈伸展减薄(115~85 Ma)3 个构造阶段。部分学者也认为赣杭构造带在晚中生代发生 2 个阶段拉张活动:第一阶段发生晚侏罗世—早白垩世的板内拉张作用;第二阶段发生早白垩世末期的区域伸展作用<sup>[24-27]</sup>。根据年代学数据特征,从浙西北至浙东南,晚中生代侵入岩年龄有逐渐变年轻趋势,

这可能也与华南构造背景演化具有一定关系。

在(Y+Nb)—Rb 图解(图 5b)中,大部分样品落在后碰撞花岗岩区。在 Yb+Ta—Rb 图解、Y—Nb 图解、Rb/30—Hf—3Ta 图解中,晚侏罗世末栅溪闪长岩类主要落在弧花岗岩区,广山花岗岩类主要落在板内花岗岩或后碰撞花岗岩区,显示成岩构造环境具有从俯冲挤压碰撞作用向后碰撞或后造山作用演化趋势,与华南地区当时构造环境转换时间吻合<sup>[11]</sup>;而早白垩世末期侵入岩多落在弧花岗岩区,与当时整个华南地区陆内造山、后碰撞或后造山伸展构造环境不吻合;吴福元等<sup>[28]</sup>和张旗等<sup>[29]</sup>曾强调花岗岩的地球化学特征主要取决于其源岩的性质、熔融时的物理化学条件和岩浆的演化作用,尤其与花岗岩形成压力密切相关,当压力较大时,岩石常显示明显 HREE 亏损和 Nb, Ta 负异常,

可能与源区斜长石、石榴石、金红石残留有关,这与晚中生代侵入岩显示为部分熔融的特征一致,其主要为增厚下地壳部分熔融的产物,其中早白垩纪末期基-中性(辉石)闪长岩可能来源于经太平洋板片流体(或熔体)改造的岩石圈地幔部分熔融岩浆作用混合(图 6);邱检生等<sup>[1]</sup>也认为浙闽沿海 I-A 型复合花岗岩的岩浆源区相同,其形成是区域构造应力、断裂构造、幔源岩浆卷入和岩浆分异演化多种因素综合作用的结果。因此,浙西北萧山—诸暨地区晚侏罗世末期侵入岩成岩构造环境具有从俯冲挤压碰撞作用向后碰撞或后造山作用演化的特征,早白垩世末期侵入岩主要与火山-次火山喷发-侵入作用关系密切,成岩构造环境主要与区域伸展作用有关,表明江绍结合带晚中生代经历了多阶段的构造运动。

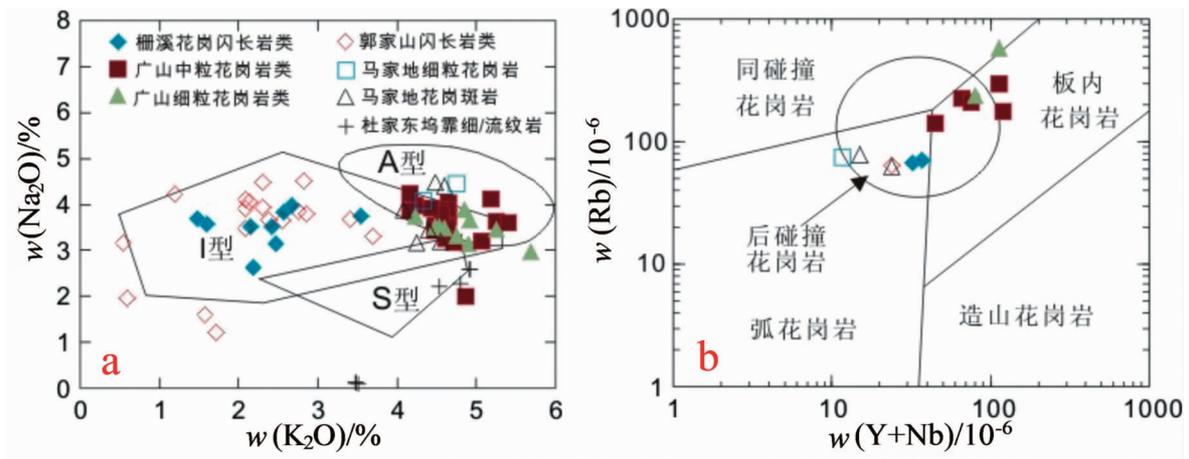


图 5  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ (a) 和  $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b) 判别图解

Fig. 5 Discrimination diagrams for  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ (a) and  $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b)

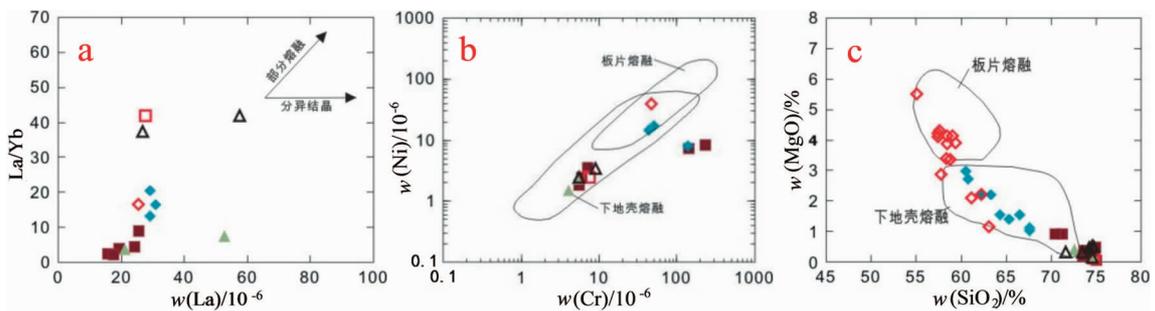


图 6  $\text{La}/\text{Yb}-\text{La}$ (a),  $\text{Ni}-\text{Cr}$ (b) 和  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  (c) 判别图解

Fig. 6 Discrimination diagrams for  $\text{La}/\text{Yb}-\text{La}$ (a),  $\text{Ni}-\text{Cr}$ (b) and  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  (c)

图例同图 2

## 5 结论

(1) 萧山—诸暨地区晚中生代发育两期侵入岩, 早期岩性为花岗(石英)闪长岩-花岗岩组合, 成岩时代为晚侏罗世末期; 晚期岩性为(辉石)闪长岩-花岗岩-花岗斑岩-霏细岩(流纹岩)组合, 成岩时代为早白垩世末期。

(2) 岩石学、地球化学特征研究显示, 晚侏罗世末期侵入岩具有 I-A 型花岗岩特征, 成岩构造环境具有从俯冲挤压碰撞作用向后碰撞或后造山作用演化的特征; 早白垩世末期侵入岩具有 I 型或高分异 I 型花岗岩特征, 成岩主要与火山-次火山喷发-侵入作用关系密切, 成岩构造环境主要与区域伸展作用有关。

### 注释:

- ① 南京地质矿产研究所. 1:25 万嵊县幅区域地质调查报告. 2004.
- ② 浙江省地质调查院. 1:25 万杭州市幅区域地质调查报告. 2004.
- ③ 浙江省区域地质调查大队. 1:5 万绍兴夏履桥—萧山浦阳地区区域地质调查报告. 1980.
- ④ 浙江省地质局浙江省地质职工大学. 1:5 万漓渚幅区域地质调查报告. 1981.

### 参考文献:

- [1] 邱检生, 王德滋, McInnes B I A. 浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 237-246.
- [2] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 229-321.
- [3] 周金城, 王德滋, 汪相, 等. 对桐庐早白垩世火山-侵入岩成因的几点认识[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 263-271.
- [4] 刘亮, 邱检生, 李真. 浙江沐尘石英二长岩及其镁铁质包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成——对岩浆混合作用的示踪[J]. 地质论评, 2011, 57(3): 327-336.
- [5] 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 等. 浙东南石平川花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及构造意义[J]. 地质论评, 2009, 55(5): 673-684.
- [6] 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 等. 浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约[J]. 地球科学, 2010, 35(4): 585-596.
- [7] Martin H, Bonin B, Capdevila R, et al. The Kuyi peralkaline granitic complex (SE China): petrology and geochemistry[J]. *Petrol J.* 1994, 35(4): 983-1015.
- [8] 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 等. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、

地球化学及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1431-1440.

- [9] 顾明光, 冯立新, 胡艳华, 等. 浙江绍兴地区广山—栅溪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对漓渚铁矿成矿时代的限定[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1212-1219.
- [10] 李祥辉, 陈斯盾, 罗家洪, 等. 浙江西部建德群锆石 LA-ICP-MS 之 U-Pb 同位素年龄及其地层学意义[J]. 地质论评, 2011, 57(6): 825-836.
- [11] 张建芳, 解怀生, 许兴苗, 等. 浙江漓渚地区栅溪—广山岩体地质地球化学特征、构造及找矿意义[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 403-413.
- [12] 胡永和, 朱兴盛, 徐有浪. 浙江省燕山期主要 Cu(Mo) 矿化岩体的地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(1): 36-46.
- [13] 李万友, 马昌前, 刘园园, 等. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 164-177.
- [14] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987, 95: 407-419.
- [15] Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos.* 1992, 28: 151-179.
- [16] 赵越, 徐刚, 张拴红, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 319-328.
- [17] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [18] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 451-463.
- [19] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
- [20] Peirong C, Renmin H, Bangtong Z, et al. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings [J]. *Science in China: Series D.* 2002, 45(8): 756-768.
- [21] Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: age, origin, and tectonic significance[J]. *International Geological Review.* 2003, 45: 898-921.
- [22] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510-526.
- [23] 毛建仁, 高桥浩, 房子龙, 等. 中国东南部与日本中-新生代构造-岩浆作用对比研究[J]. 地质通报, 2009, 28(7): 844-856.
- [24] 邓家瑞, 张志平. 赣杭构造带前寒武纪构造格局的探讨[J]. 铀矿地质, 1997, 13(6): 321-326.
- [25] 邓家瑞, 张志平. 赣杭构造带区域大地构造背景的探讨[J]. 铀矿地质, 1999, 15(2): 71-76.
- [26] 张星蒲. 赣杭构造带中生代火山盆地的形成和演化[J]. 铀矿

- 地质,1999,15(1):18-23.
- [27] 余心起,吴淦国,舒良树,等. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘,2006,13(3):31-43.
- [28] 吴福元,李献华,杨进辉,等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报,2007,23(6):1217-1238.
- [29] 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报,2007,23(11):2683-2698.

## Geochemistry and tectonic significance of Late Mesozoic intrusive rock in Xiaoshan-Zhuji region, Northwest Zhejiang

XIE Huaisheng, ZHANG Jianfang, GONG Ruijun, XU Xinmiao

(Geological Survey Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 311203, China)

**Abstract:** The Late Jurassic granite (quartz) diorite and Early Cretaceous (pyroxene) diorite are geochemically characterized by low silicon, poor in alkaline, rich in Ca, Mg, Fe, weak negative Eu anomaly, rightward REE curve, enrichment of K, Rb, Ba, Th, U, depletion of Nb, Ta, less depletion of Sr, Ti. The late granite of Late Jurassic Epoch and late granite (porphyry) of Cretaceous Epoch share the geochemical characteristics of high Si, enrichment of alkalis, poor in Ca, and Mg, strong negative Eu anomaly. However, the former is characterized by the "V" type REE distribution patterns, and strong enrichment of K, Rb, Th, U, relative rich in Nb, Ta, strong depletion of Ba, Sr, Ti etc. And the latter by the rightward REE curve, enrichment of K, Rb, Th, U, and depletion of Nb, Ta, Sr, Ti, but no depletion of Ba. Petrological, geotectonic and geochemical plots show that the diagenetic tectonic environment of the type I-A intrusive rock at the end of the late Jurassic evolved from the subduction extrusion collision to post-collision or post-orogeny. At end of the late Early Cretaceous the highly differentiated type I granite is closely related to the volcanic-sub-volcanic eruption-intrusion. The diagenetic tectonic setting is mainly related to regional extension.

**Key Words:** Northwestern Zhejiang province; Late Mesozoic; intrusive rocks petrochemistry; tectonic geochemistry