

# 武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征

王 森 舒良树\*

(南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 岩石地球化学研究表明, 华南造山带东段武夷山新元古代蛇绿混杂岩中的玄武岩和安山岩可以分为两种类型: 一种为拉斑玄武岩类,  $\text{TiO}_2$  含量为 2.26%~2.59% (平均 2.43%), 轻稀土元素比重稀土元素富集,  $(\text{La})_N / (\text{Yb})_N = 6.4 \sim 9.4$  (平均 7.8), 相对富集 Nb、Ta 和 Ti, 微量元素特征类似于洋岛玄武岩; 另一种岩石属于钙碱系列,  $\text{TiO}_2$  含量为 0.69%~0.93% (平均 0.83%), 表现为轻稀土元素富集,  $(\text{La})_N / (\text{Yb})_N = 4.2 \sim 12.6$  (平均 8.4), 略显 Eu 负异常, 并以低 Nb、Ta、Ti 等元素为特征, 富集 Ba、Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 具有岛弧玄武岩的特征, 属于俯冲作用的产物。蛇绿混杂岩中这两类岩石共生, 记录了扬子地块和华夏地块之间古大洋消减闭合和弧-弧碰撞拼贴的历史。

**关键词:** 蛇绿混杂岩; 地球化学; 弧-弧碰撞; 新元古代; 华南武夷山

**中图分类号:** P588.12<sup>+</sup>4~5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2007)04-0572-12

以前蛇绿岩通常被认为产生于洋中脊环境<sup>[1]</sup>。但在 20 世纪 80 年代以来, 人们逐渐认识到蛇绿岩代表古大洋碎块可产生于洋中脊、岛弧、弧前和弧后盆地等多种环境中, 绝大部分蛇绿岩残留在消减带环境中<sup>[2-7]</sup>。

武夷山地区出露了华南最大面积的前泥盆纪变质变形岩石和多期次火成岩, 保存了大量复杂的古构造演化纪录。江山—绍兴断裂带和上虞—政和—大埔断裂带是武夷山地区两条重要的区域性边界断裂带, 其中江山—绍兴断裂带是扬子陆块与华夏陆块的碰撞拼贴带<sup>[8-9]</sup>, 政和—大埔断裂带是一条推覆—走滑韧性剪切带<sup>[10]</sup>(图 1)。武夷山新元古代构造带具有多期活动特点, 从成冰纪开始, 经历了从裂解—沉积到碰撞造山的复杂历程<sup>[11]</sup>。在武夷山造山带的南北两缘, 沿江山—绍兴断裂带和上虞—政和断裂分布着一系列的蛇绿混杂岩块, 主要出露在浙江诸暨、陈蔡、龙游六连岗、江西新余岭上(北带)和浙江龙泉青坑、福建政和马面山、长城、建瓯水南、建阳北历、吴中等地, 多呈透镜体产出, 很难发现完整的层序。超镁铁质、镁铁质岩块具外来岩块特征, 与围岩均呈断层接触, 无冷凝边及围岩的烘烤边, 属于冷侵位。

该套蛇绿岩自 20 世纪 80 年代初就有报道。郭令智等<sup>[12]</sup>根据野外考察和钻孔资料研究认为该镁铁—超镁铁质岩石是蛇绿岩套, 代表古俯冲带; 汪新等<sup>[13]</sup>认为从福建南平—建瓯到浙江龙泉松阳存在一条北东走向的碰撞混杂岩带; 聂淦波

等<sup>[14]</sup>对闽北政和建瓯一带的蛇绿岩作岩石学和地球化学研究后认为该蛇绿岩形成于前寒武纪大洋中脊背景; 陈迪云等<sup>[15]</sup>则认为该套岩石并非形成于洋中脊环境, 而是更近似于岛弧环境; 任胜利等<sup>[16]</sup>通过对闽北政和马面山超镁铁岩作岩石地球化学及矿物化学分析后, 认为该套岩石组合可能为蛇绿岩的组成部分; 张福勤等<sup>[17]</sup>认为浙闽龙泉松溪镁铁—超镁铁杂岩带为一新元古代蛇绿混杂岩带, 其形成年龄为 8~9 亿年。近期, 笔者对政和地区新元古代蛇绿混杂岩带进行了详细的野外地质考察(图 2~4), 在政和马面山、稻香、铁山、蝴蝶街以及洋后等地发现多处混杂岩块体。

最新年代学结果表明, 许多原定早古生代的蛇绿岩和火山岩很可能形成于前震旦纪 800~900 Ma, 如舒良树<sup>[18]</sup>通过对出露在武夷山东南缘福建政和建瓯等地的蛇绿岩的野外考察, 发现这些岩石均杂乱散布于前成冰纪龙泉群或麻源群片麻岩或混合岩中, 未见超镁铁—镁铁岩团块与震旦纪或寒武—奥陶纪浊积岩混杂, 揭示了构造混杂体在震旦纪之前就已完成。通过对该混杂体中的玄武岩岩浆锆石做精细测年, 获得的 SHRIMP U-Pb 测年值为  $(853 \pm 4)\text{Ma}$  (8 组自形锆石)、 $(797 \pm 7)\text{Ma}$  (14 组自形锆石) 和  $(858 \pm 11)\text{Ma}$  (14 组自形锆石)<sup>[18]</sup>。近变质流纹岩中的锆石获得相近的 SHRIMP U-Pb 测年为  $818 \pm 9\text{Ma}$ <sup>[19]</sup>。

最近 3 年, 笔者等对武夷山北缘新余、龙游、诸暨、陈蔡

收稿日期: 2006-12-10; 改回日期: 2007-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40634022, 40572118)、教育部博士点基金项目(20060284008)和创新群体项目(40221301)资助。

作者简介: 王森, 女, 1982 年生, 硕士生, 构造地质学专业; E-mail: Purplewater@126.com。

\* 通讯作者: E-mail: Lsshu2003@yahoo.com.cn。

以及赣南地区吉安、峡江、南城、会昌、于都、寻坞和宜黄等地多处出露的前泥盆纪玄武岩进行了野外实地考察,发现它们均呈夹层状分布在青白口系神山群千枚岩中。在研究区开展的 1:25 万地质图修编<sup>①</sup>和 1:5 万地质填图<sup>②</sup>均表明,前泥盆纪蛇绿岩和火山岩都形成于前南华纪。

因此有必要对武夷山蛇绿混杂岩的构造属性及其演化特征进行再研究。笔者主要从岩石地球化学的角度对该地区

蛇绿混杂岩岩石的构造属性及其构造演化历史进行探讨。

### 1 区域地质背景

武夷山地区位于华南加里东期褶皱造山带东段,处于绍兴—江山—萍乡和上虞—政和—大埔两条主干断裂之间(图 1),呈走向北东—南西、开口向南西的喇叭形,其北面为江南造山带,主要由低绿片岩相变质的中新元古代细碧岩、角斑

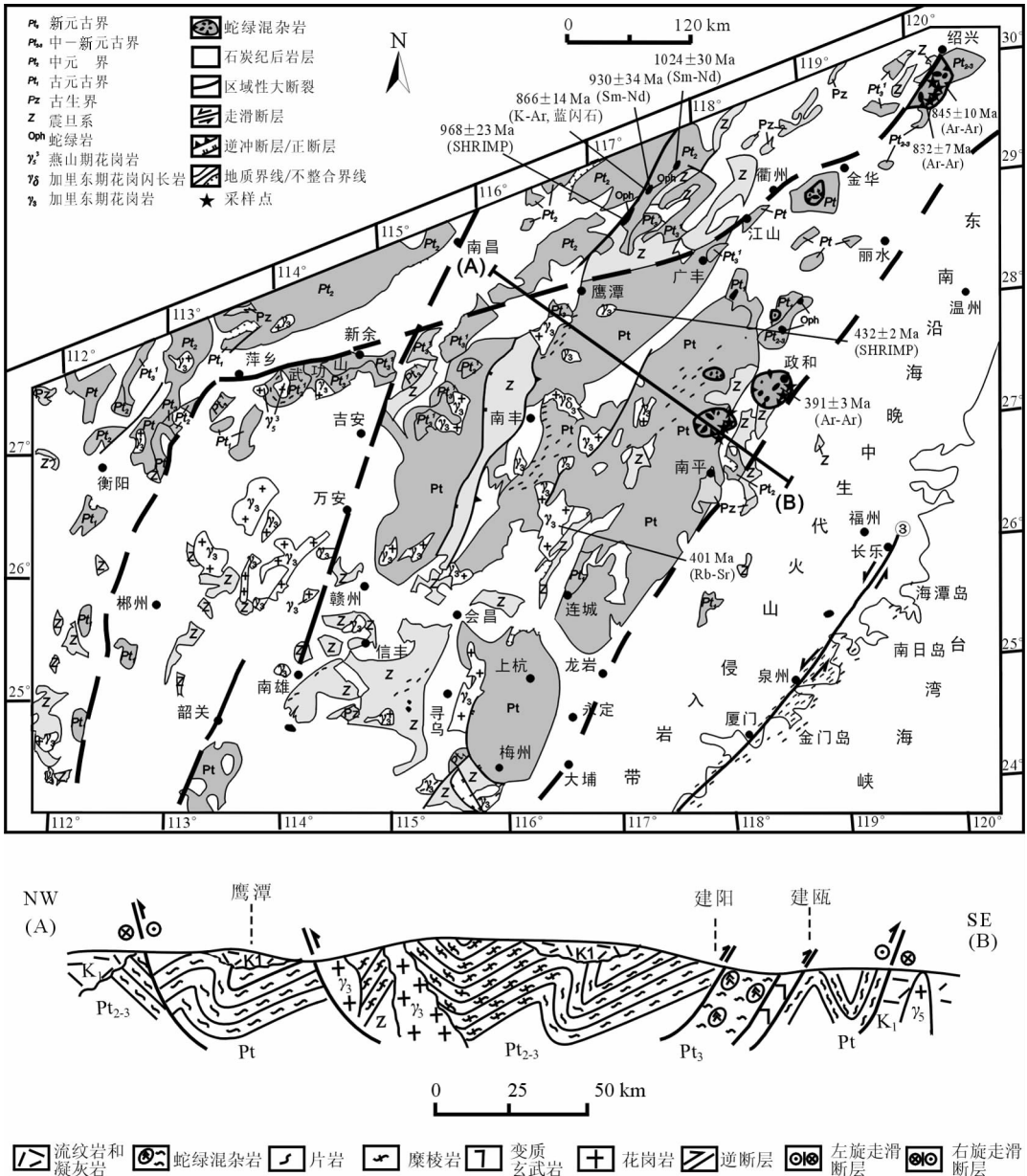


图 1 武夷山区域地质图(上)及构造剖面图(下)

Fig.1 Regional geological map (upper) and tectonic section (lower) in the Wuyi Mountains

① 江西省地质调查院. 1:25 万上饶市幅、南昌市幅区域地质调查报告, 2002.

岩、海相复理石和钙碱性火山岩、火山碎屑岩组成,其南面为东南沿海晚中生代火山侵入杂岩带。武夷山地区前泥盆纪变质基底是多阶段地壳活动的产物,可将其细分为不同时代、不同变形强度的两个物质层:(1)前南华纪中深地壳层次变质层(千枚岩、变粒岩、片岩、片麻岩、混合岩),(2)震旦纪—晚奥陶世低绿片岩相变质层(板岩为主),即此区存在上下两个前泥盆纪变质基底层<sup>[2]</sup>。野外资料表明,该区志留系呈区域性缺失,晚泥盆世粗碎屑岩层角度不整合覆盖在老地层之上<sup>[4]</sup>;对武夷山地区强烈韧性剪切变质岩石中的新生矿物白云母测年表明<sup>[23]</sup>,该地区经受过志留纪末到泥盆纪初的强烈韧性剪切变形。武夷山地区的蛇绿混杂岩主要沿绍兴—江山—萍乡和上虞—政和—大埔两条主干断裂带分布,主要岩石类型有变质橄榄岩、斜辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩、变质玄武岩、枕状玄武岩、安山玄武岩、安山岩、变质硅质岩、大理岩等,呈不规则团块状、透镜状产出,围岩为片岩、片麻岩的泥砂质浊积岩,在建阳崇雒和龙泉,超镁铁岩团块的围岩为片麻岩和长英质混合岩。

## 2 样品采集及化学分析

为探讨研究区蛇绿岩的形成环境,沿绍兴江山萍乡和上虞、政和大埔两条断裂带采集了蛇绿混杂岩中 10 件玄武岩

和安山岩样品并做了主量元素、微量元素和稀土元素的地球化学分析(表 1),玄武岩为灰绿色气孔状,气孔清晰,排列有序,具枕状构造,枕体大者达 50 cm×30 cm×30 cm。有的玄武岩呈少斑状结构、基质间粒结构,其主要矿物为:基性斜长石 40%~50%,辉石 20%,角闪石 20%,另见少量绿帘石和绿泥石。斜长石多为长条状,边缘不规则,常为钠—更长石,粒度 0.1~0.3 mm。安山岩为灰绿色块状,碳酸盐化强烈,可见方解石细脉,岩石发生面理化,偶见压扁的长石。有的呈微晶细粒状,具斑状结构,主要矿物为斜长石 30%~40%,角闪石 30%,方解石 20%,绿帘石 5%,另见少量榍石和磁铁矿。有些长石具有环带构造或者双晶,部分长石矿物被后期交代为方解石。

## 3 地球化学特征

### 3.1 主量元素特征分析

从岩石化学成分含量(表 1)可以将蛇绿混杂岩中的岩石样品明显分为两类, I 类 SiO<sub>2</sub> 含量为 47.24%~51.68%(平均为 49.5%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 12.89%~13.71%(平均为 13.32%),TiO<sub>2</sub> 为 2.26%~2.59%(平均为 2.43%),MgO 为 4.45%~8.57%(平均为 6.49%),FeO/MgO 比值为 1.13~2.51; II 类 SiO<sub>2</sub> 含量为 58.54%~61.04%(平均为 59.7%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14.27%~15.93%(平均为 15.09%),TiO<sub>2</sub> 为 0.69%~0.93%(平均为

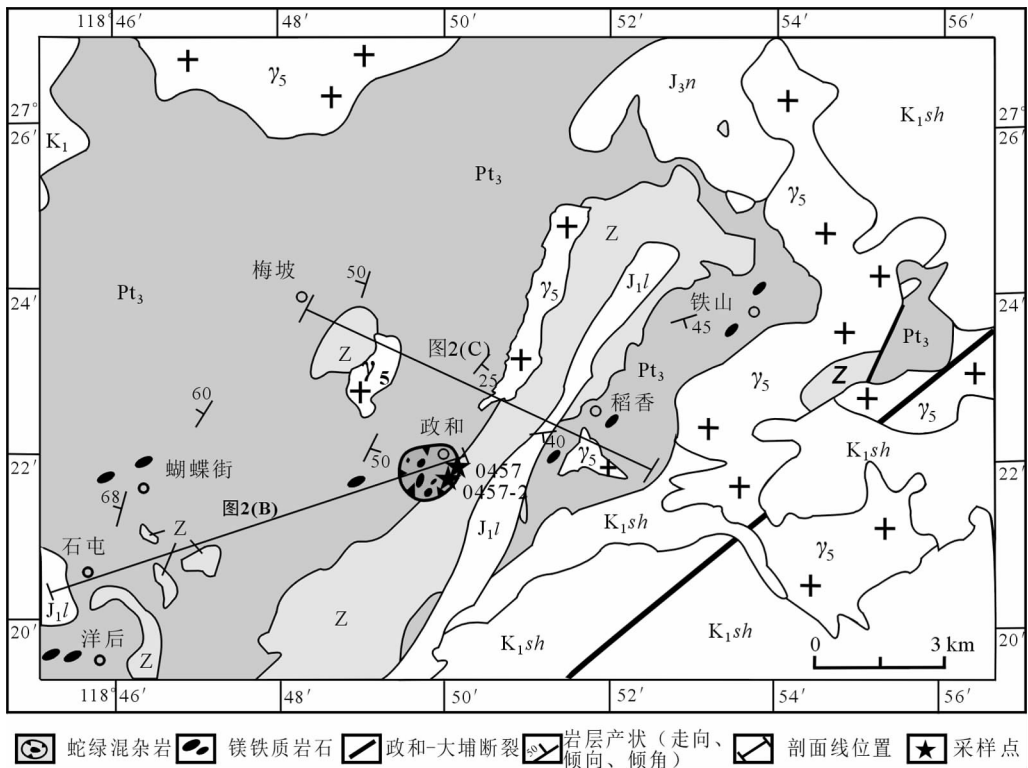


图 2 政和蛇绿混杂岩地质图(据政和 1:5 万地质图修改)

Pt<sub>3</sub>—上元古界;K<sub>1sh</sub>—下白垩统石帽山群;J<sub>1l</sub>—下侏罗统梨山组;γ<sub>5</sub>—燕山期花岗岩;Z—震旦系

Fig.2 Geological map of the Zhenghe ophiolitic mélangé (modified from the 1:50,000 Geological Map of Zhenghe)

Pt<sub>3</sub>—Early Proterozoic;K<sub>1sh</sub>—Shimashan Group;J<sub>1l</sub>—Lishan Formation;γ<sub>5</sub>—Yanshanian granites;Z—Sinian

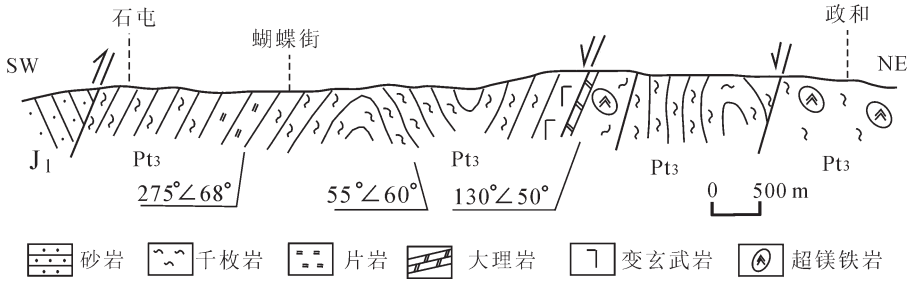


图 3 石屯—政和地质剖面图

J<sub>1</sub>—下侏罗统;Pt<sub>3</sub>—新元古代

Fig.3 Geological section from Shitun to Zhenghe

J<sub>1</sub>—Lower Jurassic;Pt<sub>3</sub>—Neoproterozoic

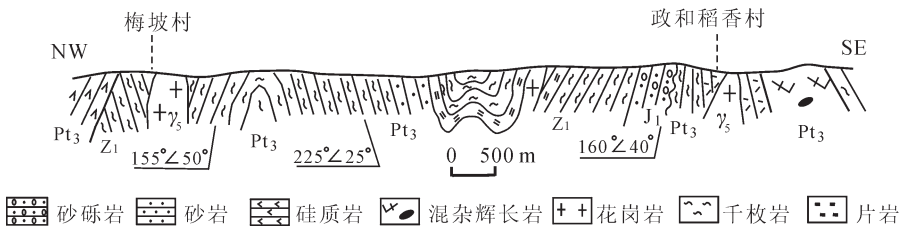


图 4 梅坡村—稻香村地质剖面图

J<sub>1</sub>—下侏罗统;Z<sub>1</sub>—下震旦统;Pt<sub>3</sub>—新元古代

Fig.4 Geological section from Meipocun to Daoxiangcun

J<sub>1</sub>—Lower Jurassic;Z<sub>1</sub>—Lower Sinian;Pt<sub>3</sub>—Neoproterozoic

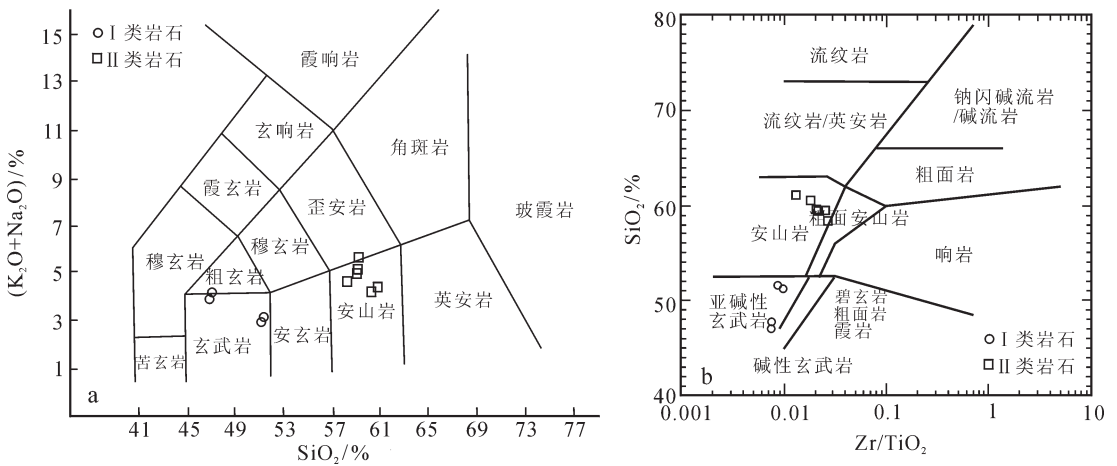


图 5 武夷山蛇绿混杂岩的 TAS(SiO<sub>2</sub>-ALK)<sup>[23]</sup>和 SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub><sup>[24]</sup>岩石分类图

Fig.5 TAS (SiO<sub>2</sub>-ALK) and SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub> classification diagrams of ophiolitic mélanges of the Wuyi Mountains

0.83%), MgO 为 3.82%~4.53% (平均为 4.11%), FeO/MgO 比值为 1.55~1.81。很明显, I 类样品属于高 Ti 型, II 类样品属于低 Ti 型。在 TAS(SiO<sub>2</sub>-ALK) 岩石分类图(图 5-a)上可以看出 I 类样品全投在玄武岩区, II 类样品都投在安山岩区;同样的,在 SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub> 岩石化学分类图(图 5-b)上, I 类样品全投在亚碱性玄武岩区, II 类样品都投在安山岩区。

在 Miyashiro(1974)的 TiO<sub>2</sub>-MnO×10-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>×10 构造判别图解上(图 6), I 类样品均落入 OIA 区,表明其为洋岛玄

武岩; II 类样品落入 IAT 以及 IAT 与 CAB 的过渡区域。再将样品数据投在 FeO/MgO-TiO<sub>2</sub> 判别图解上, II 类样品都投在 IAT 区域,表明 II 类样品产于岛弧环境。

### 3.2 稀土元素特征分析

两类岩石的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 7)都呈右倾型或轻微右倾型,表现为轻稀土富集的特点。具有 E-MORB 或 OIB 的稀土特征<sup>[29]</sup>。两类岩石的稀土含量特征略有不同, I 类岩石 ΣREE 含量为 148×10<sup>-6</sup>~163×10<sup>-6</sup> (平均

表 1 主元素(%), 稀土元素和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )分析结果  
 Table 1 Major element (%), REE and trace element ( $\mu\text{g/g}$ ) analysis

样号	O410	0410-2	O475	0475-2	O407	0407-2	O472	0472-2	O457	0457-2
岩性	安山岩	安山岩	安山岩	安山岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	安山岩	安山岩
采样地点	浙江陈蔡	浙江陈蔡	福建建瓯	福建建瓯	浙江陈蔡	浙江陈蔡	福建建瓯	福建建瓯	福建政和	福建政和
SiO <sub>2</sub>	60.54	61.04	59.45	59.44	47.24	47.45	51.52	51.68	58.54	59.36
TiO <sub>2</sub>	0.84	0.86	0.93	0.93	2.39	2.26	2.59	2.49	0.69	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.93	14.27	15.47	14.62	13.6	12.89	13.71	13.10	15.93	15.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.44	0.34	0.35	1.41	1.50	1.11	1.19	0.68	0.72
FeO	6.93	7.03	6.91	6.85	10.07	9.67	11.18	10.91	6.83	6.93
MnO	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.2	0.19	0.12	0.12
MgO	4.24	4.53	3.82	3.99	8.17	8.57	4.45	4.75	3.9	4.19
CaO	2.78	2.91	2.27	2.34	9.42	10.02	7.38	7.93	4.52	4.80
Na <sub>2</sub> O	2.96	3.07	1.03	1.14	2.6	2.76	2.59	2.76	3.2	3.49
K <sub>2</sub> O	1.46	1.51	4.37	4.69	1.51	1.60	0.59	0.58	1.62	1.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.29	0.19	0.19	0.67	0.63	0.43	0.43	0.24	0.24
LOI	3.00	3.13	3.87	4.00	1.8	2.12	2.70	2.95	2.49	2.21
SUM	99.91	100.61	100.27	100.15	100.26	100.64	100.26	100.61	99.86	100.85
La	16.25	15.51	41.99	36.62	32.47	28.82	26.47	24.07	28.08	22.76
Ce	35.42	33.84	82.17	75.08	59.50	55.62	58.17	55.09	54.31	48.50
Pr	4.35	4.69	9.47	9.12	7.18	6.81	7.57	7.07	6.65	5.56
Nd	17.84	19.10	36.17	33.43	30.30	28.59	32.62	30.63	25.59	21.45
Sm	3.53	4.22	7.05	7.08	7.20	7.17	7.55	7.69	5.28	4.60
Eu	0.96	1.31	1.56	1.61	2.43	2.33	2.12	1.97	1.18	1.10
Gd	3.18	3.65	6.99	6.67	7.43	6.65	8.15	7.05	5.30	4.53
Tb	0.38	0.52	0.89	1.06	0.91	0.96	1.11	1.24	0.71	0.71
Dy	2.40	3.12	6.23	6.59	5.52	5.76	7.54	8.28	4.81	4.76
Ho	0.49	0.54	1.32	1.28	1.01	0.89	1.68	1.55	1.03	0.87
Er	1.37	1.78	3.86	4.29	2.52	2.70	4.77	5.25	3.00	3.08
Tm	0.19	0.20	0.55	0.57	0.31	0.27	0.67	0.61	0.44	0.38
Yb	1.24	1.37	3.55	3.63	1.85	1.71	4.19	4.08	2.80	2.54
Lu	0.19	0.18	0.55	0.53	0.24	0.21	0.63	0.57	0.43	0.36
Y	12.31	14.80	33.48	35.93	24.56	25.01	41.28	43.74	26.53	25.34
ΣREE	87.8	90.0	202.3	187.6	158.9	148.5	163.2	155.2	139.6	121.2
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.389	8.133	8.49	7.229	12.601	12.100	4.53	4.24	7.20	6.435
δEu	0.876	1.022	0.680	0.716	1.014	1.032	0.824	0.819	0.682	0.736
Li	66.37	65.23	79.71	88.25	8.39	8.11	36.22	37.41	36.79	37.26
Be	0.45	0.94	1.02	1.62	1.02	1.56	0.79	1.30	0.62	1.06
Sc	22.61	21.02	21.94	19.92	20.59	19.89	36.02	35.31	25.89	24.15
Ti	42839	47091	4806	5517	12330	15340	13483	15560	3552	4222
V	224.5	213.4	155.5	148.0	214.3	208.8	364.8	352.1	270.5	281.8
Cr	37.2	28.5	113.2	135.5	174.6	220.4	19.7	18.1	73.7	89.2
Co	26.78	27.04	24.73	24.35	49.20	51.13	45.74	46.93	26.54	27.38
Ni	16.64	20.42	56.48	62.57	161.96	195.04	22.96	28.55	58.39	69.55
Ga	15.14	18.18	18.21	23.48	17.42	21.96	17.29	21.55	15.00	19.14
Rb	35.71	35.52	172.44	187.48	31.63	35.16	67.70	76.33	56.50	65.89
Sr	350.5	411.3	97.7	101.5	762.3	921.5	142.0	165.6	183.3	208.9
Zr	152.2	111.8	236.8	203.6	181.0	170.8	246.1	212.9	180.2	159.2
Nb	5.14	5.06	18.81	19.95	54.99	58.68	29.18	30.86	7.99	8.47
Sn	0.97	1.11	3.72	4.23	2.02	2.13	2.27	2.43	2.22	2.58
Cs	0.73	0.73	4.76	5.52	0.54	0.54	20.26	23.97	1.58	1.70
Ba	363.9	424.9	722.1	915.0	468.4	565.6	73.9	78.5	289.8	362.7
Hf	3.19	2.76	5.46	5.91	3.88	3.89	5.42	5.62	4.02	4.04
Ta	0.31	0.37	1.38	1.77	3.20	4.08	1.91	2.38	0.62	0.81
Pb	4.40	8.42	21.58	24.83	4.89	6.78	6.80	9.76	7.67	10.73
Bi	0.02	0.08	0.36	0.40	0.01	0.09	0.03	0.10	0.02	0.12
Th	1.72	1.61	12.15	13.60	4.06	4.37	2.57	2.71	9.76	9.35
U	0.35	0.41	2.07	2.74	0.80	0.95	0.53	0.65	1.68	1.88
Rb/Sr	0.102	0.086	1.765	1.848	0.041	0.038	0.041	0.038	0.477	0.461
Nb/Ce	0.145	0.150	0.229	0.266	0.924	1.055	0.502	0.560	0.147	0.175
Hf/Ta	10.233	7.511	3.953	3.340	1.212	0.955	2.839	2.360	6.503	4.997
Zr/Nb	29.631	22.105	12.589	10.206	3.291	2.911	8.435	6.900	22.562	18.807
Nb/Th	2.983	3.150	1.549	1.466	13.549	13.430	11.368	11.399	0.818	0.905

注: 主量元素含量由南京大学现代分析中心张孟群用荧光法 XRF<sup>24</sup>测定, 稀土和微量元素含量由南京大学成矿作用国家重点实验室高剑峰完成, 所用仪器为美产德造 Finnigan MAT Element II 型 ICP-MS<sup>24</sup>, 美国标样, 高压罐溶样。

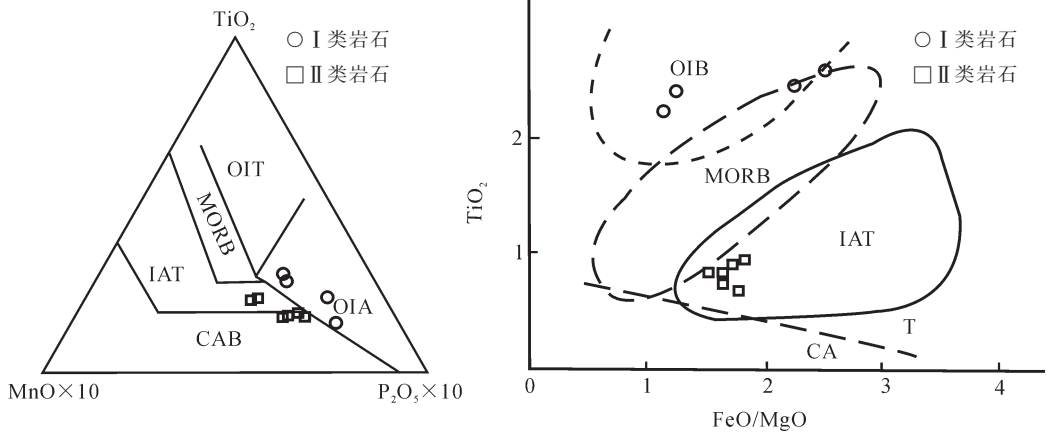


图 6 武夷山蛇绿混杂岩 FeO/MgO-TiO<sub>2</sub>(据 Miyashiro<sup>[27]</sup>)及 TiO<sub>2</sub>-MnO×10-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>×10(据 Mullen<sup>[28]</sup>)判别图解  
 OIT—大洋岛屿拉斑玄武岩;OIA—大洋岛屿碱性玄武岩;MORB—洋中脊玄武岩;IAT—岛弧拉斑玄武岩;  
 CAB—钙碱性玄武岩;OIB—洋岛玄武岩

Fig.6 FeO/MgO-TiO<sub>2</sub> (after Miyashiro<sup>[27]</sup>) and TiO<sub>2</sub>-MnO×10-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>×10 (after Mullen<sup>[28]</sup>) tectonic discrimination diagrams for the Wuyishan ophiolitic mélange  
 OIT-ocean island tholeiite; OIA-ocean island alkali-basalt;MORB-mid-ocean ridge basalt;IAT-island-arc tholeiite;  
 CAB-calc-alkali basalt;OIB-ocean island basalt

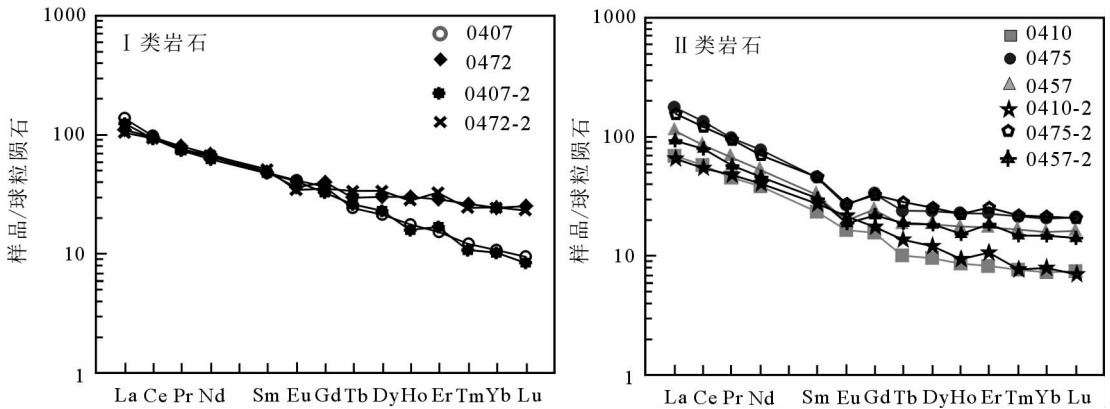


图 7 稀土元素球粒陨石标准化图解(据 Boyton<sup>[29]</sup>)

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the Wuyishan ophiolitic mélanges (after Boyton<sup>[29]</sup>)

156×10<sup>-6</sup>),LREE/HREE 比值为 4.4~7.0 (平均 5.7), (La)<sub>N</sub>/(Yb)<sub>N</sub>=4.2~12.6(平均 8.4),类似于夏威夷 Kilaues 洋岛拉斑玄武岩<sup>[30]</sup>; II 类 ∑REE=88×10<sup>-6</sup>~202×10<sup>-6</sup>(平均 138×10<sup>-6</sup>), LREE/HREE 比值为 6.0~8.3 (平均 7.0), (La)<sub>N</sub>/(Yb)<sub>N</sub>=6.4~9.4(平均 7.8),与爪哇地区岛弧玄武质安山岩类似<sup>[31]</sup>。I 类岩石几乎无 Eu 异常,显示其在岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用不明显。II 类岩石略显负异常,说明在岩浆的演化过程中发生过斜长石的分离结晶作用。

3.3 微量元素特征

在轻微蚀变及低级变质条件下,大离子亲石元素(LILE)(Cs,K,Rb,Ba,Sr)是活动的,而高场强元素(HFSE)(Sc,Y,

Th,Zr,Hf,Ti,Nb,P 等)和 REE 是不活泼的<sup>[32]</sup>。因此,在讨论岩石地球化学特征及成因时主要用不活泼元素。

在原始地幔标准化蛛网图(图 8)上可以明显看出, I 类岩石样品相对 Nb、Ta、Ti 富集;部分样品显示的 Rb、Th、K、Sr 异常,可能为岩石后期遭受蚀变的结果。II 类岩石样品 Nb、Ta、Ti、P、Sr 明显亏损,而 Ba、Rb、Th、K 含量相对较高,说明岩石的形成与洋壳俯冲消减有关,指示有地壳物质的加入,并且很可能是受到上地壳物质的混染作用。另外, II 类岩石样品在蛛网图(图 8)上存在明显的 Sr 亏损,说明在岩浆演化过程中发生过斜长石的分离结晶作用。

I 类岩石 Zr/Nb 比值为 2.9~8.4(平均 5.4),相当于 N-

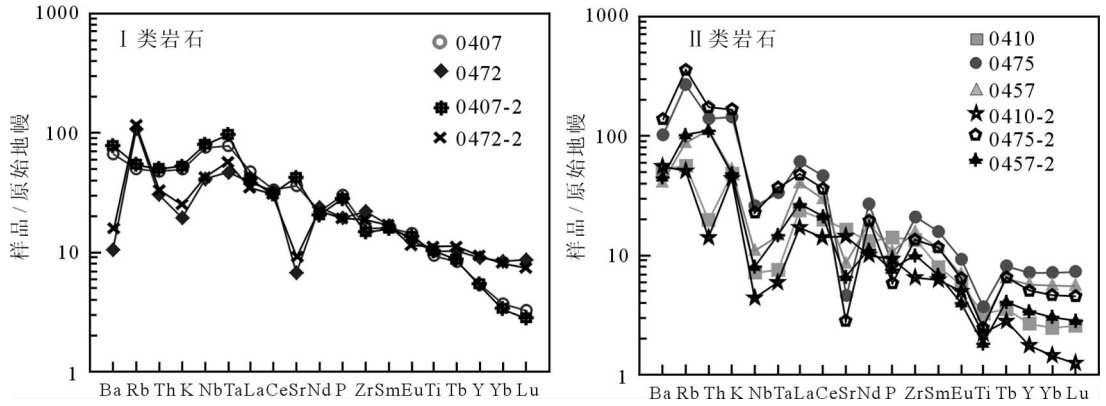


图8 微量元素标准化比值蛛网图(据 Sun et al. [33])

Fig.8 Trace element diagram (after Sun et al. [33]) of the Wuyishan ophiolitic mélange

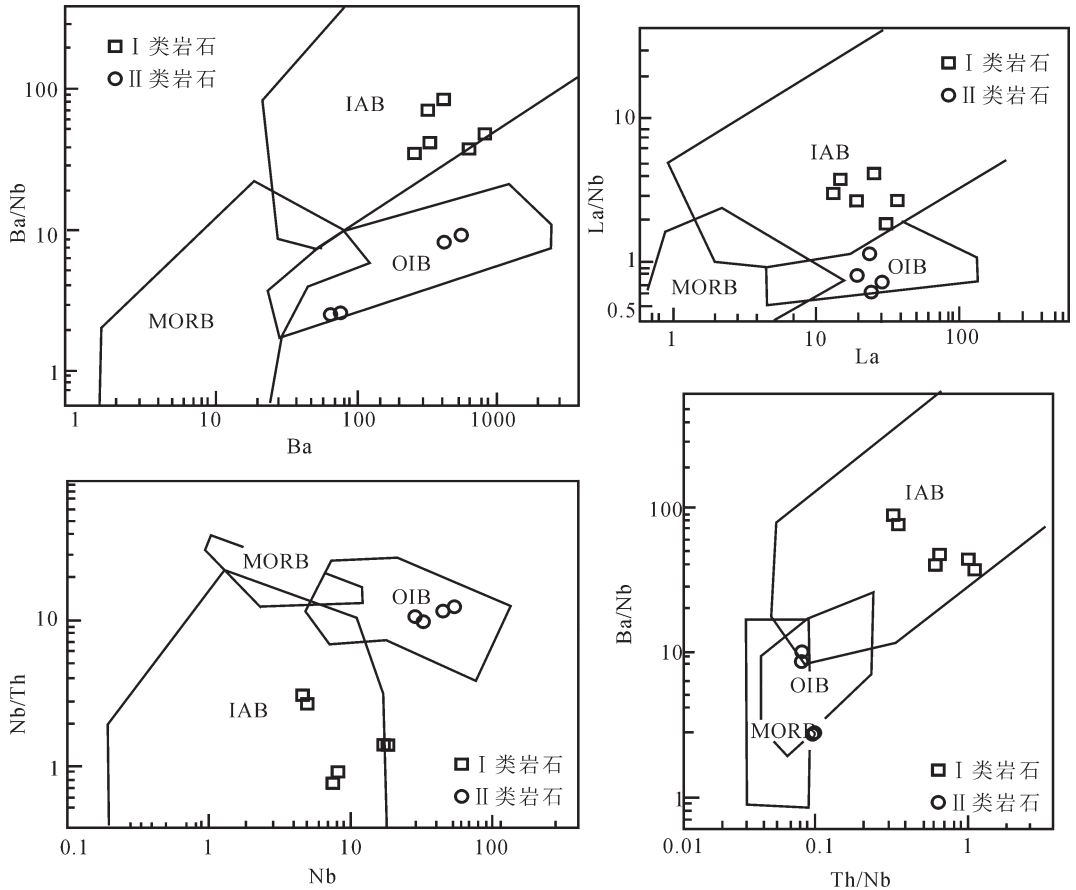


图9 微量元素构造判别图(据李曙光[38])图例同上

MORB—洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩;IAB—岛弧玄武岩

Fig.9 Trace element tectonic discrimination diagrams[38] for the Wuyishan ophiolitic mélange

MORB—mid-ocean ridge basalt;OIB—ocean island basalt; IAB— island-arc basalt

MORB 范围; II类岩石 Zr/Nb 比值为 10.2~29.6 (平均 19.3), 相当于 E-MORB 范围 [33]。I类岩石 Hf/Ta 比值为

1.0~2.8(平均 1.8),反映其具有洋岛玄武岩特征,而非大陆玄武岩[34]。另外, I类岩石 Nb/Th 比值为 11.4~13.5(平均12.4);

II类岩石的 Nb/Th 比值为 0.8~3.2(平均 1.8)。据 Ryerson 等<sup>[36]</sup>研究,洋中脊玄武岩的 Nb/Th 比值为 25;洋岛玄武岩的 Nb/Th 比值为 10;岛弧玄武岩的 Nb/Th<5 因此,这两类岩石形成环境分别相当于洋岛玄武岩和岛弧玄武岩。

### 4 武夷山地区前寒武纪构造演化

将王仁民<sup>[36]</sup>和 Pearce<sup>[37]</sup>的标准图谱与本研究区的蛇绿混杂岩微量元素标准化蛛网图进行对比(图 9),可以明显的看出, I 类岩石图谱类似于洋岛玄武岩, II 类岩石图谱类似于岛弧环境形成的火山岩。在微量元素构造判别图解上也可以清楚看出, I 类岩石产出于洋岛环境, II 类岩石产出于岛弧环境。

武夷山地区新元古代存在一期碰撞构造事件已被前人<sup>[39-40]</sup>研究证实。但迄今为止,有关蛇绿岩形成时代的年龄不多。水涛等<sup>[41]</sup>用 K-Ar 法测得陈蔡单斜辉石橄榄岩中单斜辉石的年龄为 892 Ma。劳秋元等<sup>[42]</sup>从诸暨石角斜长角闪岩中分离出角闪石单矿物,用 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法测试,获加权年龄为(844.7±9.7) Ma。张福勤等<sup>[17]</sup>认为浙闽龙泉—松溪蛇绿混杂岩的形成年龄为 8~9 亿年,但缺乏具体年龄数据的支撑。任胜利等<sup>[16,43]</sup>研究

表明,武夷山蛇绿岩形成于晚震旦世到早古生代,笔者最近获得一批该套岩石中玄武岩自形岩浆锆石的 U-Pb SHRIMP 年龄数据为 800~900 Ma,说明该蛇绿岩的形成年代为新元古代(另文发表)。根据上述武夷山蛇绿混杂岩的岩石地球化学分析结果,结合该套岩石的年龄数据资料,笔者初步得出了武夷山地区的大地构造演化历史:

(1)2000~1100 Ma 是华夏地块形成阶段。越来越多的年龄测试数据及地质事实皆证实中国东南部在元古代曾存在一个古老陆块,各种测试方法所得到的年龄主要集中在 2000~1100 Ma<sup>[21,44-49]</sup>。另外,东南沿海火成岩的 Nd 模式年龄较老(元古代居多),而且在温州东侧的东海灵峰—井曾采收片麻岩岩心全岩 Rb-Sr 年龄 1806 Ma<sup>[50]</sup>,故推测东海大陆架之下存在元古代古陆块。但浙闽粤沿海区的地下深处存在多大和怎样的古陆块,目前尚缺实际资料(地震和钻孔等)。

(2)1100~1000 Ma 古华南洋板块形成(图 10-A)。浙江陈蔡群的原岩建造主要是成层的火山-沉积岩系,这种岩石的形成环境已有学者进行过研究;徐步台等<sup>[51]</sup>对陈蔡群斜长角闪岩-大理岩-石墨石英片岩组合中的大理岩作碳氧稳定同位素测定,结果反映海相碳酸盐特征,推测其沉积环境为浅海-滨

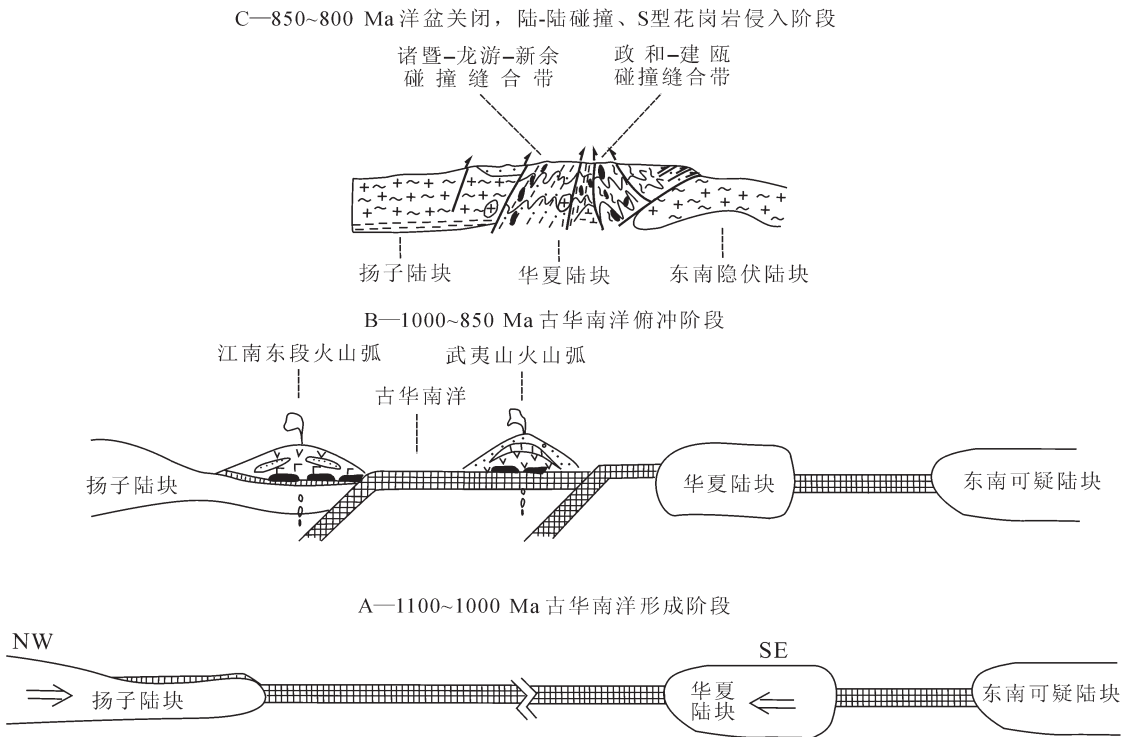


图 10 武夷山地区前寒武纪构造演化示意图

A—1100~1000 Ma, 古华南洋形成阶段; B—1000~900 Ma, 古华南洋俯冲阶段;  
C—900~850 Ma, 洋盆关闭, 陆-陆碰撞、S 型花岗岩侵入阶段

Fig.10 Schematic diagram of the Precambrian tectonic evolution of the Wuyishan area.

A—1100~1000 Ma: formation stage of the ancient South China Ocean;

B—1000~900 Ma: subduction stage of the ancient South China Ocean;

C—900~850 Ma: stage of ocean basin closing and continent-continent collision and S-type granite intrusion



海;孔祥生等<sup>[53]</sup>又对该大理岩进行全岩化学分析,认为其形成于深水环境。彭松柏等<sup>[54]</sup>通过对云开地区蛇绿岩中变基性岩做 Sm-Nd、Rb-Sr 全岩同位素分析,得到(824±77)Ma 的等时线年龄,证明华南存在新元古代洋盆。另外,云开地区露出的大量硅质岩也显示了深水环境。由此可见,在中元古代晚期至新元古代早期,在扬子地块与华夏地块间存在一个洋盆。

(3)1000~850 Ma 为洋壳的俯冲消减、陆-陆碰撞阶段(图 10-B,10-C)。中新元古代时期,在扬子陆块东南缘,沉积了巨厚的火山沉积岩系。900~800 Ma 期间,随着华夏地块与扬子陆块间的华南海的俯冲消减,在扬子一侧产生大陆边缘的火山岛弧,如双溪坞大陆岛弧<sup>[54]</sup>、皖浙赣火山弧<sup>[14]</sup>,而在华夏地块一侧则产生了大洋岛弧,如陈蔡大洋岛弧<sup>[54]</sup>、马面山大洋岛弧<sup>[19]</sup>。继之洋壳关闭,在 860~900 Ma<sup>[11]</sup>时,发生弧-弧碰撞→陆-陆碰撞作用,形成陈蔡和政和蛇绿混杂岩。稍后,有 S 型花岗岩形成,年龄在 810~830Ma,如唐峰红等<sup>[55]</sup>对赣皖交界处石耳山花岗岩体进行单颗粒锆石 U-Pb 法定年,得到(825±3)Ma 的锆石结晶年龄,吴荣新等<sup>[56]</sup>得到该岩体中锆石的 U-Pb SHRIMP 年龄为(825±15) Ma。另外,皖南许村堇青石花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 法年龄为(823±8) Ma<sup>[53]</sup>,江西九岭北缘堇青石花岗岩体 SHRIMP U-Pb 法年龄为(819±9)Ma<sup>[57]</sup>。

## 5 结 论

根据常量元素、微量元素及稀土元素地球化学特征,武夷山地区的蛇绿混杂岩中的上部单元可明显分为两种岩石类型产出背景, I 种为洋岛型拉斑玄武岩类,其相对富集 Nb、Ta、Ti、Zr/Nb 比值为 5.4, Nb/Th 比值为 12.4; 稀土配分曲线上几乎无 Eu 异常; II 种为岛弧钙碱性火山岩类,其 Nb、Ta、Ti、P、Sr 明显亏损,而 Ba、Rb、Th、K 含量相对较高, Zr/Nb 比值为 19.3, Nb/Th 比值为 1.8,且在稀土配分曲线上 Eu 出现负异常。

在同一个蛇绿混杂岩带内同时出现发育在洋壳之上的洋岛型拉斑玄武岩类和代表大陆边缘环境的岛弧火山岩类,均说明:1)在扬子地块和华夏地块碰撞之前,本区存在一个古大洋和大洋俯冲产生的活动大陆边缘;2)存在大洋关闭、扬子和华夏地块的碰撞,正是这一碰撞,使两个相距较远的不同单元聚合混杂,最终形成蛇绿混杂岩。沿着绍兴—江山—萍乡和上虞—政和—大埔两条断裂带分布的蛇绿岩团块群纪录了这一弧-弧碰撞→陆-陆碰撞的历史。

本文在写作和修改过程中得到周新民教授悉心的指导,于津海教授也给予本研究大力的帮助,在此表示感谢!

## 参考文献 (References):

- [1] Coleman R G. Ophiolites. Ancient Oceanic Lithosphere [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977:78-123.  
[2] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of super-subduction zone ophiolites [C]//Kokelar B P,

Howells M F, (eds.). Marginal Basin Geology. Geological Society Special Publication 16, 1984:77-79.

- [3] Stern R J, Bloomer S H, Lin P H, et al. Submarine arc volcanism in the southern Mariana arc as an ophiolite analogue[J]. Tectonophysics, 1989, 168:151-170.  
[4] Bloomer S H, Stern R J, Smoot N C. Physical volcanology of the submarine Mariana and volcano arcs [J]. Bulletin of Volcanology 51, 1989:210-224.  
[5] 沙绍礼,尹光候,敖德恩,等.滇西北点苍山蛇绿混杂岩德发现及意义[J].中国地质,2002,29(1):44-47.  
Sha Shaoli, Yin Guanghou, Ao De'en, et al. Discovery and significance of ophiolite mélanges at Diancang Mountain in northwestern Yunnan[J]. Geology in China, 2002, 29(1):44-47(in Chinese with English abstract).  
[6] 杨经绥,王希斌,史仁灯,等.青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩:一个被肢解了的古特提斯洋壳[J].中国地质,2004,31(3):225-239.  
Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust [J]. Geology in China, 2004, 31(3):225-239(in Chinese with English abstract).  
[7] 邱瑞照,周肃,邓晋福,等.西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代[J].中国地质,2004,31(3):262-268.  
Qiu Ruizhao, Zhou Su, Deng Jinfu, et al. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet—with a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt[J]. Geology in China, 2004, 31(3):262-268(in Chinese with English abstract).  
[8] 周新民,朱云鹤.江绍断裂带岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质[J].中国科学(B辑),1992,22(3):298-303.  
Zhou Xinmin, Zhu Yunhe. Jiangshao fracture belt, E-China: magma mingling and related Precambrian geology [J]. Science in China(Ser. B), 1992, 35(5):601-611.  
[9] Shu L S, Charvet J. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang-Shexian ductile shear zone: With HP metamorphism and ophiolitic mélange (Jiangnan Region, South China) [J]. Tectonophysics, 1996, 267:291-302.  
[10] 舒良树,卢华复,贾东,等.华南武夷山早古生代构造事件的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年代研究[J].南京大学学报(自然科学),1999,35(6):668-674.  
Shu Liangshu, Lu Huafu, Jia Dong, et al. Study of the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic age for the Early Paleozoic tectonothermal event in the Wuyishan region, South China [J]. Geological Journal of Nanjing University, 1999, 35(6):668-674(in Chinese with English abstract).  
[11] 舒良树,施央申,郭令智,等.江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学[M].南京:南京大学出版社,1995:1-174.  
Shu Liangshu, Shi Yangshen, Guo Lingzhi, et al. The Late Proterozoic Plate Tectonics and Collisional Kinematics in the Middle Part of the Jiangnan Belt [M]. Nanjing: Nanjing University

- Press, 1995:1-174(in Chinese with English abstract).
- [12] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化[C]//国际交流地质学术论文集(1). 北京:地质出版社, 1980:109-116.  
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. The geotectonic framework and crustal evolution of South China[C]//International Communication Memoir of Geology (1). Beijing:Geological Publishing House, 1980: 109-116(in Chinese with English abstract).
- [13] 汪新, 杨树锋, 施建宁, 等. 浙江龙泉碰撞混杂岩的发现及其对华南碰撞造山带研究的意义[J]. 南京大学学报(自然科学), 1988, 24(3):367-378.  
Wang Xin, Yang Shufeng, Shi Jianning, et al. Discovery of collision recamb in Longquan, Zhejiang province and its significance for studying collision orogenic belt in Southeastern China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 1988, 24(3):367-378(in Chinese with English abstract).
- [14] 聂淦波, 王勇. 福建前寒武纪蛇绿岩物质成分的研究[J]. 福建地质. 1992, 11(1):48-59.  
Nie Ganbo, Wang Yong. Geological features of Precambrian ophiolite in Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1992, 11(1): 48-59(in Chinese with English abstract).
- [15] 陈迪云, 聂淦波, 王勇. 龙泉-南平一带蛇绿岩的地球化学特征[J]. 地质地球化学, 1993, 3(1):69-73.  
Chen Diyun, Nie Ganbo, Wang Yong. The geochemistry of the ophiolite in Longquan-Nanping, Fujian Province [J]. Geology and Geochemistry, 1993, 3(1):69-73(in Chinese with English abstract).
- [16] 任胜利, 李继亮, 周新华, 等. 闽北政和洋后变质超镁铁岩的岩石地球化学及矿物化学研究[J]. 地球化学, 1997, 26(4):13-23.  
Ren Shengli, Li Jiliang, Zhou Xinhua, et al. Petrochemistry and mineral chemistry studies on metamorphic ultramafic rocks in Yangzhou area, Zhenghe County, Fujian Province [J]. China Geochemistry, 1997, 26(4):13-23(in Chinese with English abstract).
- [17] 张福勤, 谢鸿森, 许祖鸣. 华南前寒武纪镁铁-超镁铁杂岩的岩石大地构造格架[C]//李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993:162-172.  
Zhang Fuqing, Xie Hongsen, Xu Zuming. Litho geotectonic framework of recambrian mafic-ultramafic rocks in South Chian [C]//Li Jiliang (ed.). Lithospheric Structure and Geological Evolution in Southeast Continent of China. Beijing:Metallurgical Industry Press, 1993:162-172 (in Chinese with English abstract).
- [18] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):418-431.  
Shu Liangshu. Pre-Devonian Tectonic evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian folded orogenic belt [J]. Geological Journal of China University, 2006, 12 (4):418-431(in Chinese with English abstract).
- [19] Li Wuxian, Xianhua, Zhengxiang. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance [J]. Precambrian Research, 2005, 136:51-66.
- [20] 刘邦秀, 李永明. 江西省“九五”期间1:5万区调工作主要进展[J]. 江西地质, 2001(3):225-229.  
Liu Bangxiu, Li Yongming. Chief progress in 1:50 000 regional geological survey during the 9th five-year-plan in Jiangxi [J]. Jiangxi Geology, 2001(3):225-229(in Chinese with English abstract).
- [21] 邓平, 舒良树, 肖旦红. 中国东南部晚中生代火成岩的基底探讨[J]. 高校地质学报, 2002, 8(2):169-179.  
Deng Ping, Shu Liangshu, Xiao Danhong. A study on the tectonic basement of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China[J]. Geological Journal of China University, 2002, 8 (2):169-179 (in Chinese with English abstract).
- [22] 舒良树, 卢华复, Charvet J, 等. 武夷山北缘断裂带运动学研究[J]. 高校地质学报, 1997, 3(3):282-292.  
Shu Liangshu, Lu Huaifu, Charve J, et al. Kinematic study of the northern marginal fault zone of Wuyishan, South China [J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3 (3):282-292(in Chinese with English abstract).
- [23] Tertian R, Claisse F. Principles of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis[M]. Heyden & Son Ltd, London, 1982.
- [24] Falkner K K, Klinkhammer G P, Ungerer C A, et al. Inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Ann R Earth Planet Sci, 1995, 23: 409-449.
- [25] Irvine T N, Baragar V R. A guide to the chemical classification of the volcanic rocks [J]. Can. J. Earth. Sci., 1971, 8:523-48.
- [26] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20:325-343.
- [27] Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins [J]. Amer.J.Sci., 1974, 274:321-355.
- [28] Mullen E O. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: A minor-element discriminant for basaltic rocks of Oceanic environment and its implications for petrogenesis[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 62:53-62.
- [29] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C]//Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry, Developments in Geochemistry II. Amsterdam, Elsevier, 1984:63-114.
- [30] Wilson M M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach [M]. London:Unwin Hyman, 1989. 1-466.
- [31] Gill J B. Orogenic Andesites and Plate Tectonics [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1981:1-390.
- [32] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. Longman, New York:Wiley, 1993:215-315.
- [33] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//From Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [34] Wood D A, Joron J L, Treuile M. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1979, 45:326-336.

- [35] Ryerson F J, Watson E B. Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts[J]. Earth planet. Sci. Lett., 1987, 86:225-239.
- [36] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京:地质出版社, 1987:1-199.  
Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. The Distinguishing Diagrams for Protolith of Metamorphic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1-199(in Chinese with English abstract).
- [37] Pearce J A, Baker P E, Harvey P K, et al. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the south Sandwich island arc [J]. J Petrol, 1995, 36(4): 1073-1109.
- [38] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. 岩石学报, 1993, 9(2):146-157.  
Li Shuguang. Tectonic setting of ophiolite discriminated by diagram of Ba-Th-Nb-La[J]. Acta Petrologica sinica, 1993, 9(2): 146-156(in Chinese with English abstract).
- [39] 周新华, 胡世玲, 任胜利, 等. 东南陆壳超多阶段构造演化同位素年代学制约[C]//李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993:69-77.  
Zhou Xinhua, Hu Shiling, Ren Shengli, et al. Chronology confinement to super-phases tectonic evolution of the continent crust in Southeast China[C]//Li Jiliang (ed.). Lithospheric Structure and Geological Evolution in Southeast Continent of China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993:69-77 (in Chinese with English abstract).
- [40] 周新民, 朱云鹤. 中国东南部晚元古代碰撞造山带与地缝合带的岩石学证据[C]//李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993:87-97.  
Zhou Xinming and Zhu Yunhe. The lithospheric proof for collision orogenic belt and suture zone in Late Paleozoic era in southeast continent of China [C]//Li Jiliang (ed.). Lithospheric Structure and Geological Evolution in Southeast Continent of China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993:87-97 (in Chinese with English abstract).
- [41] 水涛, 徐步台, 梁如华, 等. 中国浙闽变质基底地质[M]. 北京:科学出版社, 1988:1-25.  
Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua, et al. Geology of Metamorphic Basement in Zhejiang and Fujian Provinces, Southeastern China [M]. Beijing: Science Press, 1988:1-25 (in Chinese with English abstract).
- [42] 劳秋元, 胡世玲. 利用  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年资料解释江绍断裂带的早期演化[C]//第四届全国同位素地质年代学(地球化学)学术讨论会论文(摘要)汇编, 1989.  
Lao qiuyuan, Hu Shiling. An interpretation of early evolution of Jiangshan-Shaoxin Fault Zone using  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology[C]// Proceeding of the Fourth National Academic Conference on Isotopic Geochronology (Geochemistry). 1989(in Chinese).
- [43] 任胜利. 闽北建瓯大康闪长质杂岩的年代学及岩石地球化学研究[J]. 矿物岩石, 1997, 17(2):78-83  
Ren Shengli. Studying on geochronology and litho-geochemistry of Dakang diorite complex in Jianou, northern Fujian, China [J]. J. Mineral. Petrol, 1997, 17(2):78-83(in Chinese with English abstract).
- [44] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(B), 1987, 17(4): 414-422.  
Shui Tao. Tectonic framework of continent basement in southeastern China [J]. Science in China (Series B), 1987, 17(4): 414-422(in Chinese).
- [45] 胡雄健, 许金坤, 童朝旭, 等. 浙西南前寒武纪地质[M]. 北京:地质出版社, 1991:1-277.  
Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Zhaoxu, et al. Precambrian geology in southwestern Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-277(in Chinese with English abstract).
- [46] 黄春鹏, 张家元, 詹玉亭. 福建尤溪梅仙龙北溪组变质火山岩的 Sm-Nd 同位素年龄研究[J]. 福建地质, 1991, 10(2):150-157.  
Huang Chunpeng, Zhang Jiayuan, Zhan Yuting. Sm-Nd Isotopic age of the metavolcanites of Longbeixi Formation in Meixian area of Youxi County, Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 1991, 10 (2):150-157 (in Chinese with English abstract).
- [47] 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 等. 闽北前寒武纪基底的地质年代学研究[J]. 福建地质, 1993, 12(1):17-32.  
Gan Xiaochun, Li Huiming, Sun Dazhong, et al. Geochronological study on the Precambrian metamorphic basement in North Fujian [J]. Geology of Fujian. 1993, 12 (1):17-32(in Chinese with English abstract).
- [48] 赵凤清, 金山山, 甘晓春, 等. 华夏地块前加里东变质基底的特征以及深部地壳性质[J]. 地球学报, 1995, (3):235-245.  
Zhao Fengqing, Jin Wenshan, Gan Xiaochun, et al. Discussion on the characteristics of the deep crust and pre-Caledonian metamorphic basement in the Cathysia Block, Southeast China[J]. Acta Geoscientia Sinica 1995, (3):235-245 (in Chinese with English abstract).
- [49] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄与地壳演化[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(5):471-478.  
Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, et al. Nd isotopic model ages of granite rock in southeastern China and crustal evolution [J]. Science in China. (Series D), 2000, 30(5):471-478(in Chinese with English).
- [50] 劳秋元. 东海的构造地层地体[C]//施央申, 等主编. 现代地质学研究文集(下). 南京:南京大学出版社, 1994:81-91.  
Lao Qiuyuan. Tectonostratigraphic terrane in the East China Sea [C]//Shi Yangshen, et al (eds.). Symposium of the Researches on Modern Geology(II), Nanjing: Nanjing University Press, 1994:81-91(in Chinese).
- [51] 徐步台. 浙江陈蔡群变质岩系的氢、氧、碳及铍稳定同位素研究[J]. 地球化学, 1988, 17(2):174-182.  
Xu Butai. Studies of H, O, C and Sr isotopes in metamorphic rocks of the Chencai Group, Zhejiang Province[J]. Geochimica, 1988, 17 (2): 174-182(in Chinese with English abstract).

- [52] 孔祥生, 包超民, 顾明光. 浙江诸暨地区陈蔡群主要地质特征及其构造演化探讨[J]. 浙江地质, 1994, 10(1):15-29.  
Kong Xiangsheng, Bao Chaomin, Gu Mingguang. Discussin for main geological features and tectonic evolution of Chencai Group in Zhuji District, Zhejiang Province[J]. Geology of Zhejiang, 1994, 10(1):15-29 (in Chinese with English abstract).
- [53] 彭松柏, 金振民, 付建明, 等. 云开地区新元古代蛇绿岩的地球化学证据及其构造意义[J]. 地质学报, 2006, 80(6):814-825.  
Peng Songbai, Jin Zhenmin, Fu Jianming, et al. The geochemical evidences and tectonic significance of Neoproterozoic ophiolite in Yunkai Area, western Guangdong Province, China [J]. Acta Geologica Sinica. 2006, 80(6):814-825.
- [54] 孔祥生, 李志飞, 冯长根, 等. 浙江省陈蔡地区前寒武纪地质[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-136.  
Kong Xiangsheng, Li Zhifei, Feng Changgen, et al. The Precambrian Geology of Chencai Region in Zhejiang Province[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1995:1-136 (in Chinese with English abstract).
- [55] 唐红峰, 张光辉, 周新民, 等. 一个造山后花岗岩基:石耳山花岗岩的形成时代和成因[J]. 南京大学学报(自然科学), 1997, 33(4):587-595.  
Tang Hongfeng, Zhang Guanghui, Zhou Xinmin, et al. A post-orogenic granite batholith: the age and genesis of Shiershan granite [J]. J. Nanjing Univ. (Natural Sci.) 1997, 33 (4):587-595 (in Chinese with English abstract)
- [56] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 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 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(3):364-382.  
Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granites at Shiershan in South Anhui Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11 (3):364-382 (in Chinese with English abstract).
- [57] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma [J]. Precambrian Reesearch, 2003, 122:45-83.

## Rock geochemical characteristics of the Neoproterozoic Wuyishan ophiolite mélangé

WANG Miao, SHU Liang-shu\*

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

**Abstract:** According to a rock geochemical study, basalt and andesite in the Neoproterozoic Wuyishan ophiolite mélangé in the South China orogenic belt may be divided into two types: one is tholeiite, which is characterized by  $\text{TiO}_2=2.26\%-2.59\%$  (average 2.43), LREE being richer than HREE,  $(\text{La})_N/(\text{Yb})_N=6.4-9.4$  (average 7.8), relative enrichment in Nb, Ta and Ti and the trace element characteristics being similar to those of OIB; and the other is of calc-alkaline type, which is characterized by  $\text{TiO}_2=0.69\%-0.93\%$  (average 0.83%), LREE enrichment,  $(\text{La})_N/(\text{Yb})_N=4.2-12.6$  (average 8.4), weak negative Eu anomaly, lower Nb, Ta and Ti contents and enrichment in LILE such as Ba, Rb, Th and K, shows the characteristics of IAB and is the product of subduction. The two types of rock coexist in the ophiolite mélangé and record the history of the subduction and closing of a paleo-ocean between the Yangtze block and Cathaysia block and arc-arc collision and amalgamation.

**Key words:** ophiolite mélangé; geochemistry; arc-arc collision; Neoproterozoic; Wuyi Mountains; South China

**About the first author:** WANG Miao, female, born in 1982, mainly engages in structural geology; E-mail: purplewater@126.com.

\*The corresponding author E-mail: Lsshu2003@yahoo.com.cn.