



皖南鹤城科马提质变玄武岩地球化学特征及 大地构造意义

汪 龙¹, 刘春明^{1,2}, 胡召齐³, 江来利³, 黄德志¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083;

3. 安徽省地质调查院, 合肥 230001)

摘 要: 江南造山带新元古变基性岩为区域构造事件和演化模型的建立提供地质依据。对江南造山带东段皖南鹤城地区变玄武质岩的地球化学及岩石成因进行研究。鹤城变玄武岩呈北东—南西向沿瑶里—鹤城—江潭一带分布。元素地球化学的研究表明: 休宁鹤城变玄武岩同科马提质玄武岩及岛弧玄武岩相类似; 富集 Rb、Ba、Th、U 等强不相容元素, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta, 指示其成因可能与富集地幔的部分熔融有关, 同时有地壳物质的混染, 其可能属于皖南伏川蛇绿岩西延组成部分, 与伏川蛇绿岩组成一个弧后杂岩带, 形成于与俯冲有关的弧后小洋盆环境。结合区域资料, 表明新元古代板块俯冲、岛弧岩浆活动以及拼合是江南造山带形成的比较合理的构造演化过程。

关键词: 江南造山带东段; 鹤城; 变玄武岩; 科马提质玄武岩; 岛弧玄武岩

中图分类号: P611; P618.51

文献标志码: A

“江南造山带”出露于扬子板块与华夏板块之间, 主要由一套浅变质、强变形的(中)新元古代巨厚沉积—火山岩系及同时代的侵入体组成的地质构造单元, 呈北东东—南西方向延伸, 向北西弧形突出^[1], 跨越了桂北、黔东、湘西、湘北、赣北、皖南和浙北的广大区域, 制约着我国南方显生宙以来地质构造的演化。对于造山时间, 目前多数学者认为发生于古生代^[2-3], 但有研究认为^[4-5], 江南造山带是格林威尔期形成的弧—陆碰撞造山带, 属于失败的裂谷, 在 Rodinia 超大陆裂解时, 并没有完全裂解开来。而周金城等^[6]则认为, 江南造山带无论是从造山作用发生的年限还是构造演化等方面都无法确定它是否属于格林威尔造山带。也有学者认为^[7], 在新元古代中期, 扬子古陆存在一个(超级)地幔柱, 它沿扬子板块周边形成的新元古代双峰式火山岩, 是超级地幔柱岩浆作用的产物, 随着该超级地幔柱的作用最终导致了 Rodinia 超大陆裂解。另外, 朱光等^[8]则认为皖南地区的江南隆起带为印支—早燕山期的陆内造山带, 形成于北部华北与扬子板块发生陆—陆碰撞、华南板块向北推挤区域动力学背景

下。马慧英等^[9]对江南造山带中段湘黔桂地区的新元古代“南华纪”沉积盆地基底火山岩研究认为“南华纪”盆地由挤压造山—初始裂解—全面伸展的体制转换, 盆地进入稳定发展阶段, 直至震旦纪初的广泛海侵, 淹没碳酸盐台地形成。随着赣东北蛇绿混杂岩、皖南伏川蛇绿混杂岩以及江绍断裂带东端蛇绿混杂岩的不断被确定, 以及多条与这些缝合带有关、具有岛弧性质的火山岩带的确定, 暗示江南造山带具有多岛弧拼贴、多缝合的特点。近几年, 新的同位素年龄资料揭示, 不同缝合带闭合的时间可能存在着明显的差异。YAO 等^[10]通过江南造山带西段元宝山地区的镁铁质岩和花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 认为扬子板块和华夏板块缝合时间为 850~800 Ma。很多学者在伏川蛇绿岩辉长岩中获得(822±3) Ma、(819±3) Ma 和(827±3) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 认为伏川蛇绿岩就位于 840~820 Ma^[11-13]。WANG 等^[14]测得双桥山群和溪口群的碎屑锆石 U-Pb 年龄分别为 831~815 Ma 和 833~817 Ma, 集中分布于 830~850 Ma, 说明在 980~860 Ma 形成了新生地壳, 在 860~810 Ma 新生地

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103); 安徽省公益性地质调查项目(2012-g-38); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2151)

收稿日期: 2015-04-08; **修订日期:** 2015-09-05

通信作者: 刘春明, 讲师, 博士; 电话: 13755190421; E-mail: lifuming001@163.com

壳和循环物质一起发生岩浆作用, 然后在 805~750 Ma, 古老地壳重熔, 这 3 个阶段分别对应了江南造山带东段的岛弧作用, 大陆岩浆弧和后碰撞裂谷期。侵位于赣东北蛇绿岩套中、具有大洋性质的埃达克质岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (968 ± 23) Ma^[15], 暗示发生在该缝合带上的俯冲作用可能早达新元古代早期。

相对于整个江南造山带而言, 其东段受后期(这里主要是指加里东期和印支期-早印支期)造山作用改造的程度明显低于西南段的桂北和湘南地区, 是研究江南造山带新元古造山作用过程相对理想的区域^[1]。近年来, 本文作者在安徽休宁鹤城一带溪口岩群地层中发现了一套枕状变玄武岩。江南造山带东段这套具有洋壳性质的玄武岩的发现, 不仅意味着该时期造山带东段的洋盆尚未完全闭合, 而且暗示皖南伏川缝合带有可能呈近东西向, 经休宁、鹤城一直延伸到赣北的庐山地区, 而非以前认为的接赣东北缝合带。本文作者通过野外详细调查, 采取江南造山带东段皖南休宁鹤城的枕状变玄武岩样品, 并对该岩体进行了系统的主量、微量和稀土元素分析, 结合区域上的最新地质资料和数据, 示踪了岩浆来源, 探讨了岩浆作用的构造环境, 以期建立该区的构造演化模型。

1 地质背景概况

研究区位于扬子板块东南部、江南造山带东段(见图 1)。区域上主要发育新元古界青白口系、南华系、震旦系及少量寒武系、奥陶系、偶见石炭系、二叠系零星露头, 另在祁门县城、休宁—屯溪一带发育侏罗—白垩系红色盆地沉积。以祁门—潜口断裂为界, 南区(包括本区)基底由溪口群漳前组(Pt_3z)、木坑组(Pt_3m)和板桥组(Pt_3b)片岩、千枚岩、板岩、千枚岩化砂岩组成, 部分地区出露变质流纹岩(井潭组, Qnj)。南华系及其上地层构成了该地区的第一盖层。区内主要断裂构造有近东西向的祁门—潜口断裂, 以及加里东—燕山期形成的 NE、NW 向断裂。祁门断裂走向近东西, 是区域上一条较大规模的断裂, 属皖浙赣断裂带体系, 控制区内岩浆岩、矿产和中生代红色盆地的展布, 是一条重要的控岩控矿断裂^[16]。区内主要发育晋宁期和燕山期岩浆岩^[17-19]。

研究区位于皖南休宁县南部鹤城乡, 处于黄山市西南部, 西北与祁门县祁红乡搭界, 西、西南与江西婺源、浮梁两县相邻, 东接流口镇、汪村镇, 距休宁

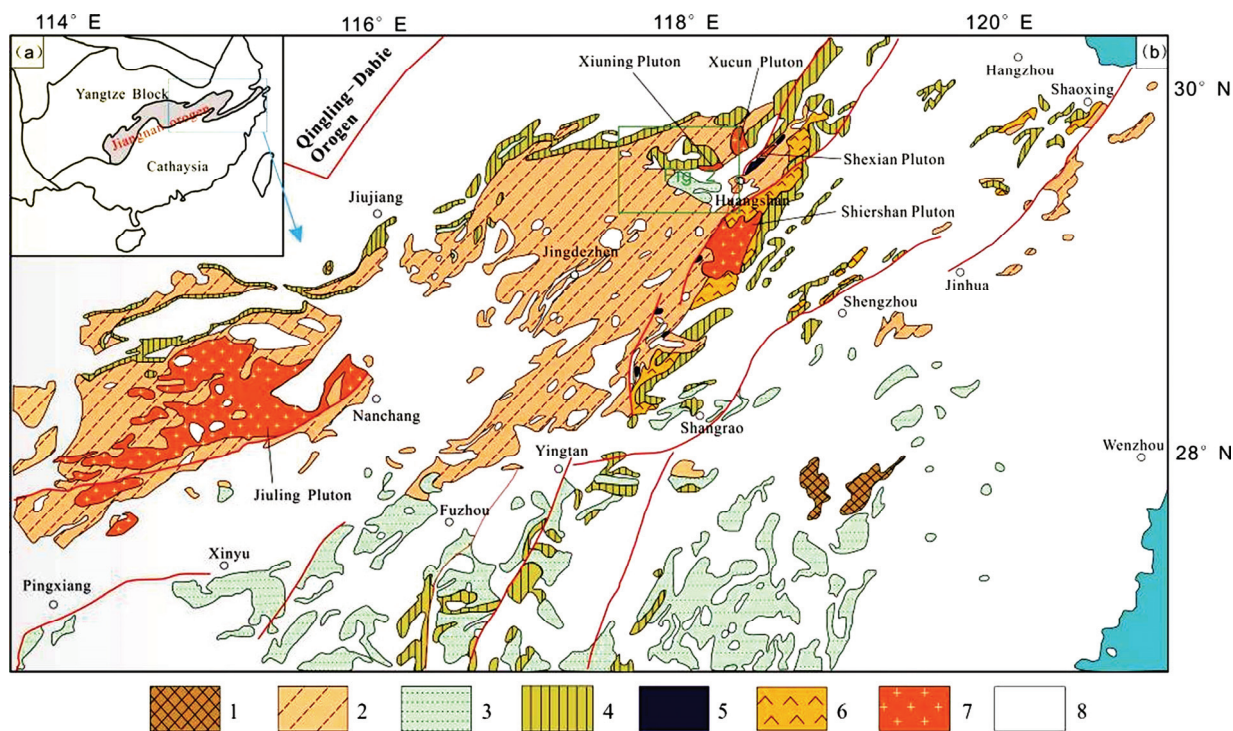


图 1 江南造山带东段地质简图^[16]: 1—古元古系列; 2—中新元古基底; 3—新元古盖层; 4—南华-震旦系统; 5—元古代蛇绿岩; 6—新元古火山沉积地层; 7—新元古花岗岩质; 8—显生宙地层和岩浆岩

Fig. 1 Geological map of eastern part of Jiangnan orogen^[16]: 1—Paleoproterozoic; 2—Meso-to Neoproterozoic basement sequences; 3—Neoproterozoic cover; 4—Nanhua-Sinian system; 5—Proterozoic ophiolites; 6—Neoproterozoic volcano-sedimentary strata; 7—Neoproterozoic granitoids; 8—Phanerozoic strata & magmatic rocks

县城 67 km。研究区出露的前寒武纪基底岩系为中元古代溪口群(见图 2)。溪口群分布在皖南地区历口群之下的一套浅变质岩系, 自下而上为樟前(岩)组、板桥(岩)组、木坑(岩)组、牛屋组。岩性主要是一套浅变质的板岩和千枚岩, 局部夹薄层灰岩条带或灰岩透镜体。岩石的粒度以砂-粉砂级和粘土级占优势, 碎屑成分复杂, 其中樟前组、板桥组和木坑组富含火山碎屑成分。该套岩石中发育复理石层和舌状、长条状印模及微细层理, 发育较完整的鲍马序列。复理石特征以板

桥组及牛屋组最为清楚, 反映海槽(盆)相环境^[1]。

对于溪口群的形成时代, 高林志等^[22]测得上部牛屋组中英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(866±9) Ma。江西省地质调查院在从事赋春幅 1:50000 地质调查中, 用稀释法测得木坑岩组变斑状石英角斑岩中单颗粒锆石的 U-Pb 年龄为(1113±118) Ma。在涌山幅 1:50000 地质调查中, 分别在木坑岩组、郑家坞岩组所夹变角斑岩、变石英角斑岩中获得(1334±10) Ma 和 (1308±9) Ma 的锆石 U-Pb 年龄^[23]。溪口群火山岩较为

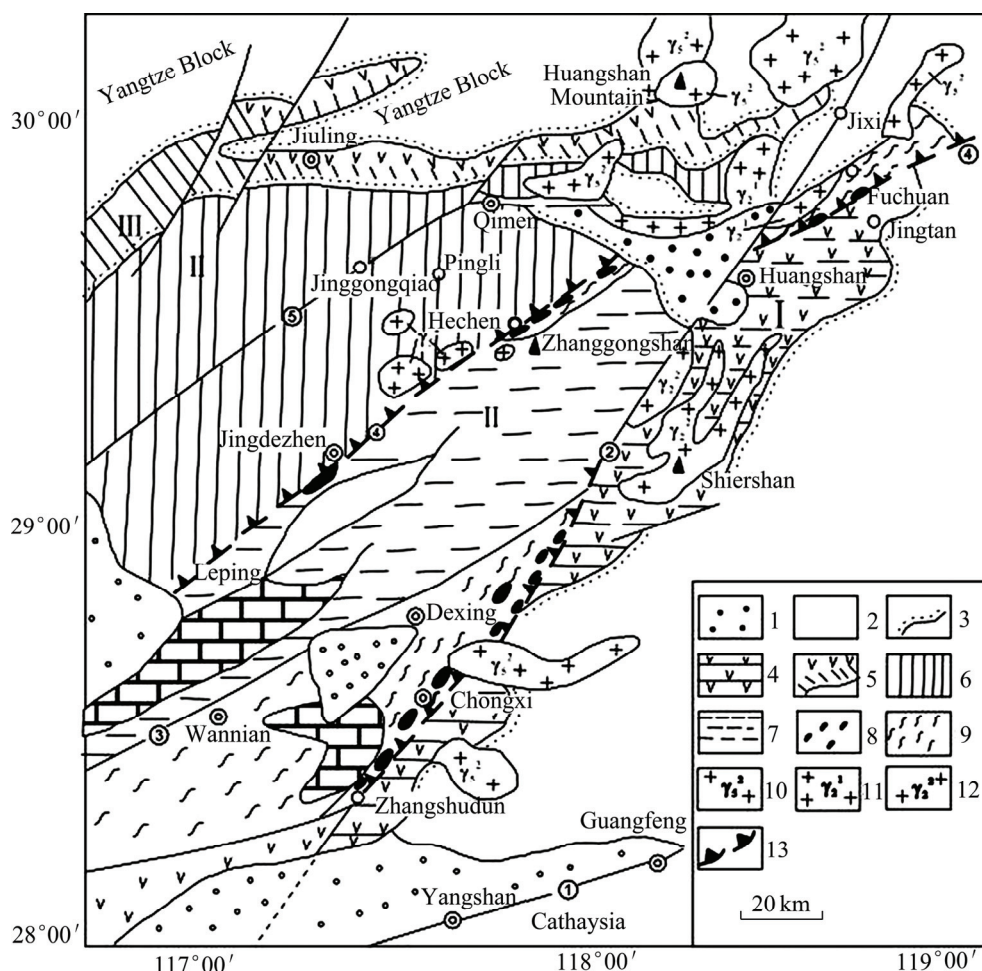


图 2 鹤城地区地质构造略图^[20-21]: 1—中、新生界; 2—石炭-三叠系; 3—震旦系-早古生界; 4—怀玉岛弧新元古代火山岩; 5—九岭陆缘青白口纪晚期火山-沉积建造; 6—新元古代双桥山群火山-沉积复理石; 7—新元古代溪口岩群浅变质复理石; 8—新元古代基性-超基性岩碎块; 9—混杂岩带剪切基质; 10—燕山期花岗岩; 11—晋宁期花岗闪长岩; 12—晋宁期花岗岩; 13—推测俯冲断裂带 (I—皖浙赣岛弧褶带; II—鄱公山陆缘弧后盆地冲褶带; III—九岭陆缘褶带。①—江-绍复合断裂带; ②—皖浙赣复合断裂带; ③—乐安江断裂; ④—景德镇-伏川复合断裂带; ⑤—祁门复合断裂带)

Fig. 2 A sketch showing geological structures of Hecheng area in South Anhui, China^[20-21]: 1—Meso-Cenozoic; 2—Carboniferous-Triassic; 3—Sinian-Early Palaeozoic; 4—Neoproterozoic volcanic rocks of Huaiyu island arc; 5—Late Qingbaikou volcanic-sedimentary formation of Jiuling continental margin; 6—Neoproterozoic volcanic-sedimentary flysch of Shungqiaoshan Group; 7—Neoproterozoic epimetamorphic flysch of Xikou Group-complex; 8—Neoproterozoic basic-ultrabasic rock fragments; 9—Shearing matrix of the mélangé zone; 10—Yanshanian granite; 11—Jinningian granodiorite; 12—Jinningian granite; 13—Speculative subduction fault belt, Northern margin of Jiangnan orogen (I—Anhui-Zhejiang-Jiangxi island arc fold belt; II—Thrust-fold belt of the back arc basin along Zhanggongshan continental margin; III—Jiuling continental margin fold belt. ①—Jiangshan-Shaoxing fault belt; ②—Anhui-Zhejiang-Jiangxi fault belt; ③—Le'anjiang fault; ④—Jingdezhen-Fuchuan fault belt; ⑤—Qimen fault belt)

发育，出露有变细碧岩、变角斑岩等，推测其形成环境应为火山弧-弧后盆地^[1, 24]。

鹤城变玄武岩呈北东-南西向沿瑶里-鹤城-江潭一线以构造碎块或碎片形式产于溪口岩群火山-陆缘细碎屑岩组成的复理石基质中，总体显示构造混杂岩带特征^[24-25]。其向北东延伸跨过休宁中生代陆相红盆

后可与伏川蛇绿岩带相接，南西向经赣东北瑶里镇可与景德镇—宜丰深断裂带相连，是一条多期活动的中深层为主、中浅层构造掺杂的区域性超壳构造变形带，构造变形主要显示自北而南多层次多期叠瓦状复合逆冲运动学特征。鹤城玄武岩具枕状构造(见图 4(a))，普遍具有脱玻化的玻质外壳(见图 4(b))，有轻微的原生

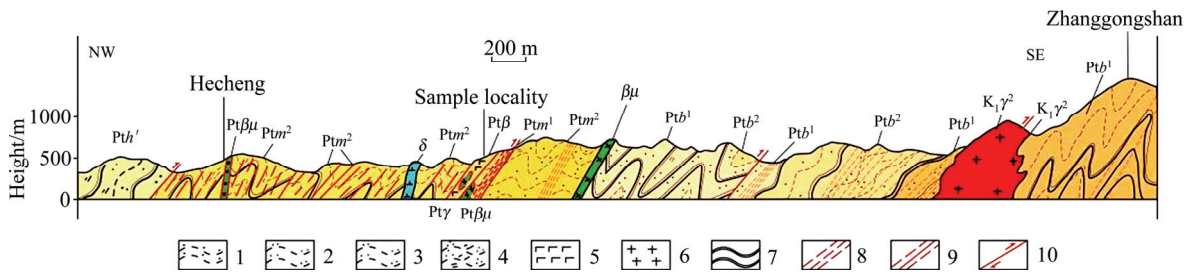


图 3 鹤城变玄武岩带剖面图：1—千枚状变砂岩；2—千枚状变粉砂岩；3—千枚状变含砂粉砂岩；4—细砂质绢云石英千枚岩；5—玄武岩；6—花岗岩；7—板岩；8—韧性剪切带；9—脆性剪切带；10—实测平移断层

Fig. 3 A section of the Hecheng meta-basalt belt: 1—Phyllited meta-sandstone; 2—Phyllited meta-siltstone; 3—Phyllited meta-sandy siltstone; 4—Fine sandy sericite quartz phyllite; 5—Basalt; 6—Granite; 7—Slate; 8—Ductile shear zone; 9—Brittle shear zone; 10—Measured translation fault

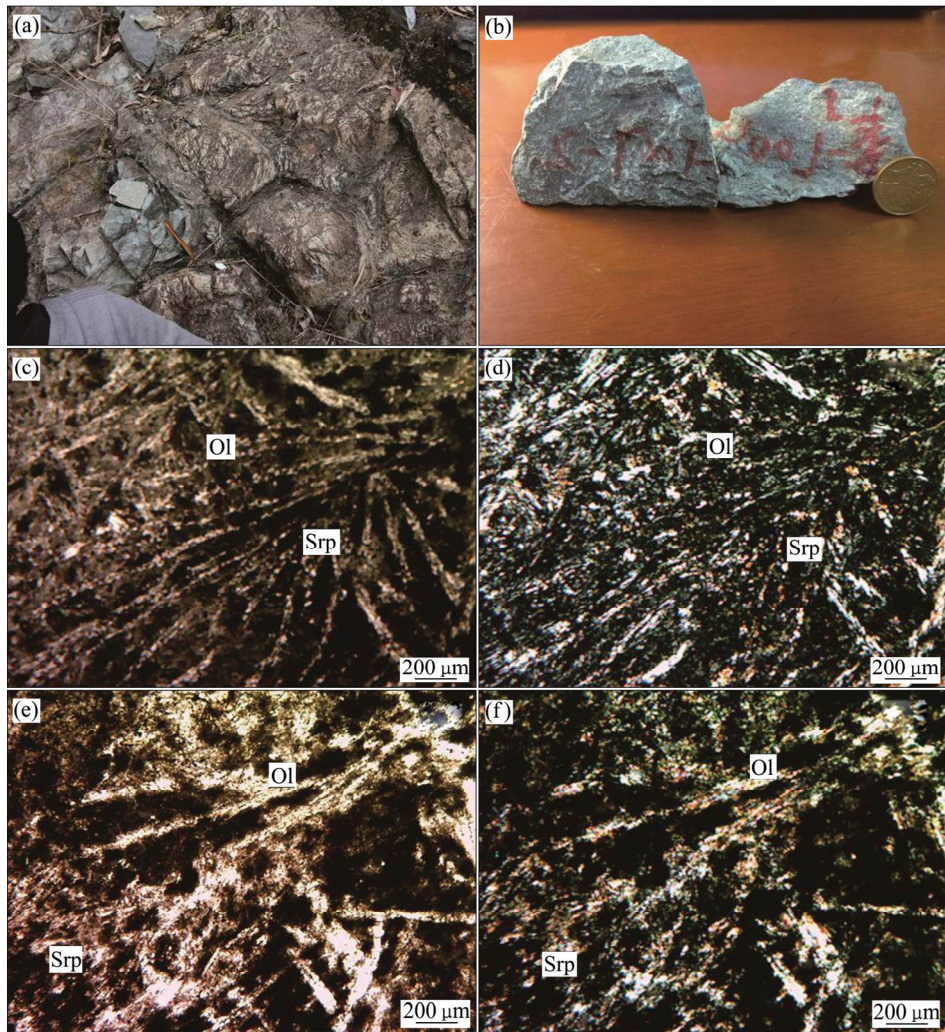


图 4 鹤城变玄武岩枕状构造、手标本照片及正交偏光及单偏光镜下显微照片(Ol—橄榄石；Srp—蛇纹石)

Fig. 4 Pillow structure of Hecheng meta-basalts(a), field photographs(b) and micrographs with crossed polars and single polar(c)–(f)) (Ol—Peridot; Srp—Serpentine)

“鬣刺结构”残余(见图 4(c)~(f)), 鬣次结构呈树枝状(见图 4(d))和叉状结构(见图 4(f)), 其中树枝状的蛇纹石鬣中有橄榄石残留。而长板状的橄榄石与侵入岩中的形态差异很大, 推测其为火成的淬火结构, 为残留的鬣刺结构, 基质中的透闪石等矿物为科马提岩形成时的火山玻璃转变而成。枕间由基性玻璃碎块和硅质岩充填; 岩石蚀变程度较高, 为透闪石、绢云母、滑石和绿帘石等矿物交代, 透闪石长 0.5~1.0 mm, 宽 0.025~0.05 mm, 呈放射状, 束状散布于蚀变基质中。鹤城变玄武岩的枕状构造表明其具有典型的水下喷发熔岩特点。

2 采样与分析方法

研究样品采自 E117°45'05", N29°38'27"(见图 3), 出露岩石为灰绿色变玄武岩, 与溪口群呈断层接触。样品的采集是沿着公路进行的, 共采集样品 9 件。样品大多新鲜无风化, 呈灰色出露, 少部分样品表面有轻微风化。样品薄片在安徽省地质研究院磨制, 样品地球化学数据分析均在国土资源部中南矿产资源监督测试中心(武汉)完成, 测试方法及步骤如下:

主量元素分析结果如下: 全分析主量元素采用熔片-X 荧光光谱法, 方法是取烘干样品于 Pt-Au 坩埚中, 用 Li₂B₄O₇ 与 LiBO₂(体积比 2:1)混合熔剂于 1100~1200 °C 熔融制得玻璃片, 由计算机全程自动控制分析过程, 通过测定特征谱线的强度来进行分析物质中元素含量的定量。所用仪器为荷兰帕拉科公司生产的 AXIOS 型 X-荧光光谱仪, 端窗铑靶 X 光管; 4 kW, SuperQ 分析软件, 分析精度 1%。

微量及稀土元素分析结果如下: 微量及稀土元素分析采用 ICP-MS 法, 方法是酸溶样品制成溶液上机

进行测定, 所用仪器为美国热电公司生产的 X II Series 型等离子体质谱仪, 工作参数如下: 功率 1350 W; 冷却气流量 13 mL/min, 辅助气流量 0.8 mL/min; 雾化器流量 0.8 L/min; 样品提升量 1.0 mL; 采样锥孔径 1.0 mm; 截取锥孔径 0.7 mm; 分辨率 0.7 aum; 测量方式为跳峰; 分析方式为脉冲计数; 采样深度 135 mm; 扫描次数 15; 停留时间 10 ms; 每个质量通道数 3; 校正方式, 外标法; 内标元素 Rh, 分析精度优于 5%。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

休宁鹤城变玄武岩的主量元素数据见表 1。

本区变玄武岩 SiO₂ 含量在 49.99%~53.38%(质量分数, 下同)之间, 具有富铁(FeO=8.49%~10.16%)、偏碱(Na₂O+K₂O 含量为 0.4%~4.64%, 平均为 2.03%)、高镁(MgO 含量为 7.38%~9.01%)的特征, CaO 含量介于 6.3%~12.51%之间, Al₂O₃ 含量介于 12.87%~15.9%之间。TiO₂ 丰度较低, 介于 0.63%~0.79%之间, 平均为 0.69%, 与岛弧区火山岩的 TiO₂ 含量(0.58%~0.85%)相当。FeO^T/(FeO^T+MgO)为 0.51~0.54, 鹤城变玄武岩岩石化学成分与伏川蛇绿岩基性火山岩成分较相近, 二者 FeO^T/(FeO^T+MgO)值基本一致(伏川为 0.47~0.63)^[26]; 与赣东北蛇绿岩变基性火山熔岩相比, 鹤城变玄武岩 TiO₂, P₂O₅ 明显偏低(赣东北樟树墩蛇绿岩的 TiO₂ 含量为 0.64%~3.3%, 平均为 1.37%; P₂O₅ 为 0.1%~0.62%, 平均为 0.35%)^[24], CaO, MgO 含量略高, 可能说明伏川、鹤城变玄武岩与赣东北蛇绿岩形成环境的差异。在 TAS 图解(见图 5(a))、Zr/TiO₂-Nb/Y(见图 5(b))以及 SiO₂-FeO^{*}/MgO 图解(见图 6)中,

表 1 皖南鹤城变玄武岩主要元素组成

Table 1 Major element contents of Hecheng meta-basalts from South Anhui, China

Sample No.	Mass fraction/%													
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg
H007-1	53.38	0.651	13.11	1.85	6.9	0.157	8.15	9.85	2.01	0.124	0.069	2.8	99.051	0.63
H007-2	50.87	0.762	15.9	1.14	8.08	0.164	8.23	6.3	3.75	0.894	0.064	2.77	98.924	0.62
H007-3	49.99	0.786	14.43	1.2	9.08	0.176	9.01	8.11	3.04	0.27	0.078	2.64	98.81	0.61
H007-4	50.07	0.741	14.59	1.77	8.25	0.18	8.59	7.83	3.44	0.123	0.074	3.27	98.928	0.61
H007-5	52.6	0.633	12.87	2.53	6.59	0.165	8.19	11.94	0.279	0.251	0.066	2.98	99.094	0.62
H007-6	52.31	0.646	14.37	3.01	5.91	0.153	7.38	12.34	0.15	0.394	0.063	2.43	99.156	0.6
H007-7	52.06	0.688	14.1	1.44	7.7	0.158	8.72	8.66	1.72	0.987	0.068	2.66	98.961	0.63
H007-8	53.51	0.628	13.31	2.72	6.05	0.155	7.59	12.46	0.183	0.221	0.063	2.25	99.14	0.61
H007-9	52.18	0.657	13.92	2.79	6.19	0.159	7.67	12.51	0.132	0.268	0.064	2.57	99.11	0.61

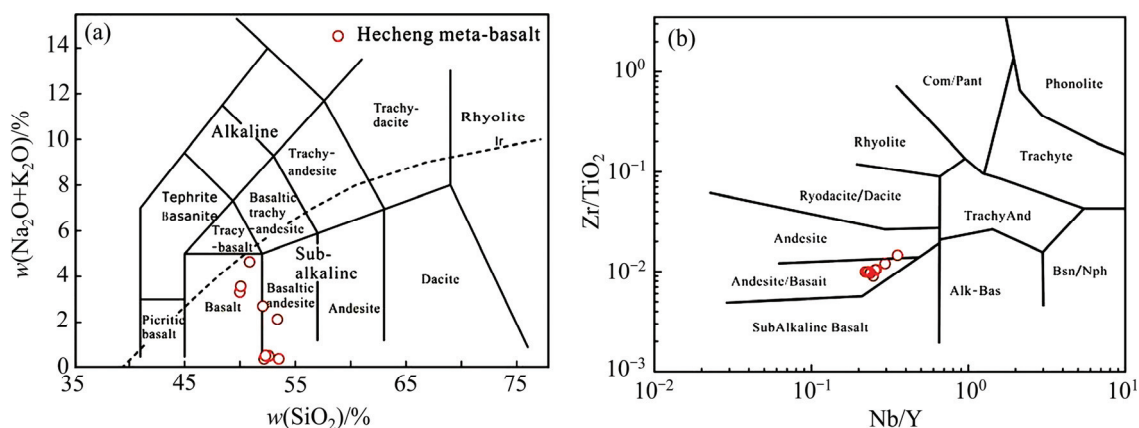


图 5 鹤城变玄武岩 TAS 图解^[27]与 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解^[28]

Fig. 5 TAS classification diagram^[27] and Zr/TiO₂ vs Nb/Y plot^[28] for meta-basalts from Hecheng

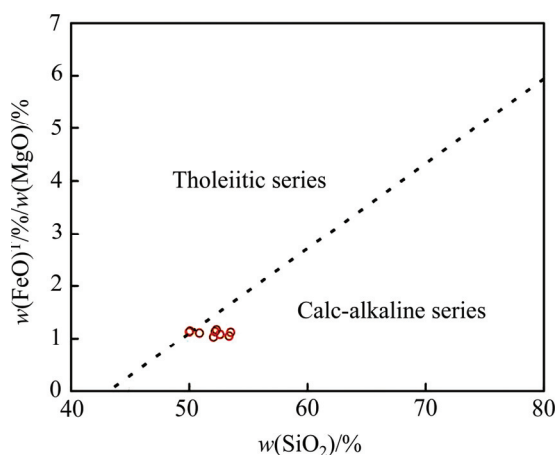


图 6 鹤城变玄武岩 SiO₂-FeO^T/MgO 图解^[29]

Fig. 6 SiO₂-FeO^T/MgO diagram of meta-basalts in Hecheng area, South Anhui, China^[30]

本区变玄武岩属钙碱性玄武岩类。

3.2 稀土元素

鹤城变玄武岩微量元素含量列于表 2。

休宁鹤城变玄武岩稀土总量为(47.79~57.92)×10⁻⁶, 平均为 51.73×10⁻⁶, (La/Yb)_N=3.01~3.89, 轻重稀土分异不明显, 总体为轻稀土元素略富集的右倾模式(见图 7(a)), 其重稀土元素曲线较平坦, Eu 无明显异常($\delta \text{Eu} = 0.88 \sim 1.11$, $\delta \text{Eu} = \text{Eu}_N / \sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}$)。

3.3 微量元素

鹤城变玄武岩 N-MORB 标准化曲线上(见图 7(b))Th 相对富集(2.61~3.91), 略富集 U、LREE 等不相容元素, 具有显著的 Nb、Ti 谷(Nb/Nb*=0.31~0.56, Ti/Ti*=0.68~0.80), Zr、Hf 略亏损, 非常类似于岛弧玄武岩(IAB)。根据 CONDIE 等^[32]提出的形成于岛弧

环境的前寒武纪玄武岩的判别标准(有关数据列于括号中), 鹤城变玄武岩 Na/La=0.005~0.15(<8), Hf/Ta=5.94~6.76(>5), La/Ta=15.58~27.31(>15), Ti/Y=202.19~245.57(<350), Tb/Yb=1.31~2.16(>0.1), Th/Nb=0.54~0.63(>0.07), Hf/Th=0.76~0.98(<9), 明显属岛弧玄武岩, 表现出岛弧火山岩的岩石地球化学特征。

4 讨论

4.1 岩石成因

地球化学特征及 Al₂O₃-MgO-(Fe₂O₃+FeO+TiO₂)三角图解(见图 8)表明鹤城变玄武岩具有科马提质玄武岩特征。前人认为江南造山带玄武岩具有较高的 MgO 含量(10.85%~14.3%), 来自弧下地幔的原始岩浆, 是地幔柱的产物^[34-35]。通过岩石学实验表明, 江南造山带出露的科马提质玄武岩并非地幔柱的作用, 而应该是形成于岛弧环境的高 MgO 玄武岩^[6]。ZHENG 等^[36]则认为江南造山带中这种高 MgO 玄武岩是俯冲带成因。鹤城变玄武岩在 Ti-Zr(见图 9(a))以及 Ta/Yb-Th/Yb(见图 9(b))图解中, 位于弧火山岩区, 但是其又具有岛弧玄武岩的特征, 表明形成于岛弧构造环境, 但它的科马提质玄武岩的成分特性又与俯冲带的高 MgO 玄武岩有明显区别。对于岛弧地区高 MgO 玄武岩浆来说, 在其形成后如果是在相对干的条件下从地幔源区分离的, 就能保持高 MgO 的原始岩浆成分, 如果源区含水量较高, 则到达地表的残留玄武岩浆的 MgO 就会降低。因此, 如果岛弧地区高 MgO 玄武岩浆或科马提质玄武岩浆能喷到地表, 就说明他们在较干的条件下从地幔源分离的, 不是地幔柱岩浆作

用的产物而是俯冲带成因^[38]。本区变玄武岩 MgO 含量只达 8%~9%, 因此并不是地幔柱成因而更可能是俯冲成因造成的。

微量元素中 Nb 是不相容程度高的元素, 在部分熔融中易进入熔体, 且在岩浆演化中基本上不随分离结晶而改变, 故若无同化混染, 岩浆中 Nb 基本保持

表 2 皖南鹤城变玄武岩微量元素及稀土元素组成

Table 2 Trace and rare earth elements analyses of Hecheng meta-basalts from South Anhui

Sample	Mass fraction/ 10^{-6}													
No.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
H007-1	9.56	17.2	2.49	10.8	2.71	0.76	2.55	0.51	3.46	0.72	1.91	0.3	1.83	0.23
H007-2	9.86	18.2	2.7	11.7	2.92	0.88	2.77	0.53	3.48	0.71	1.84	0.29	1.82	0.22
H007-3	7.72	15.2	2.33	10.5	2.77	0.82	2.74	0.56	3.79	0.8	2.14	0.33	1.95	0.23
H007-4	7.96	15	2.27	10.1	2.69	0.79	2.59	0.52	3.59	0.76	2.04	0.31	1.9	0.24
H007-5	8.06	15	2.25	9.85	2.45	0.74	2.32	0.47	3.18	0.67	1.79	0.29	1.75	0.23
H007-6	8.1	15.1	2.26	9.87	2.5	0.89	2.4	0.48	3.2	0.68	1.83	0.29	1.81	0.24
H007-7	8.8	16.1	2.42	10.4	2.57	0.74	2.5	0.5	3.38	0.7	1.87	0.28	1.68	0.2
H007-8	7.85	14.6	2.18	9.48	2.39	0.75	2.3	0.46	3.12	0.65	1.76	0.28	1.74	0.23
H007-9	8.49	15.6	2.32	10.2	2.56	0.9	2.43	0.49	3.3	0.7	1.91	0.3	1.88	0.24

Sample	Mass fraction/ 10^{-6}													
No.	Rb	Sr	Y	Zr	Hf	Ba	Nb	Ta	Th	U	ΣREE	$(\text{La/Yb})_{\text{N}}$	δEu	
H007-1	6.11	158	19.3	67.5	2.12	27.4	4.43	0.35	2.79	0.61	55.03	3.75	0.88	
H007-2	37.8	102	18.6	71.2	2.26	212	4.62	0.37	2.87	0.6	57.92	3.89	0.95	
H007-3	11.1	127	21.4	81.1	2.5	73	4.74	0.37	2.55	0.57	51.88	2.84	0.91	
H007-4	5.45	114	20.3	74.6	2.38	48.7	4.81	0.37	2.61	0.58	50.76	3.01	0.92	
H007-5	16.7	194	17.9	79.4	2.54	87.8	5.3	0.42	3.19	0.73	49.05	3.3	0.95	
H007-6	38.6	228	18.4	98.6	3.09	154	6.53	0.52	3.91	0.84	49.65	3.21	1.11	
H007-7	67.2	90	18.8	69.1	2.2	237	4.48	0.35	2.7	0.6	52.14	3.76	0.89	
H007-8	12.4	274	17.6	68.2	2.14	66.6	4.56	0.36	2.62	0.59	47.79	3.24	0.98	
H007-9	17.7	275	18.6	71.2	2.26	65.4	4.75	0.37	2.86	0.64	51.32	3.24	1.1	

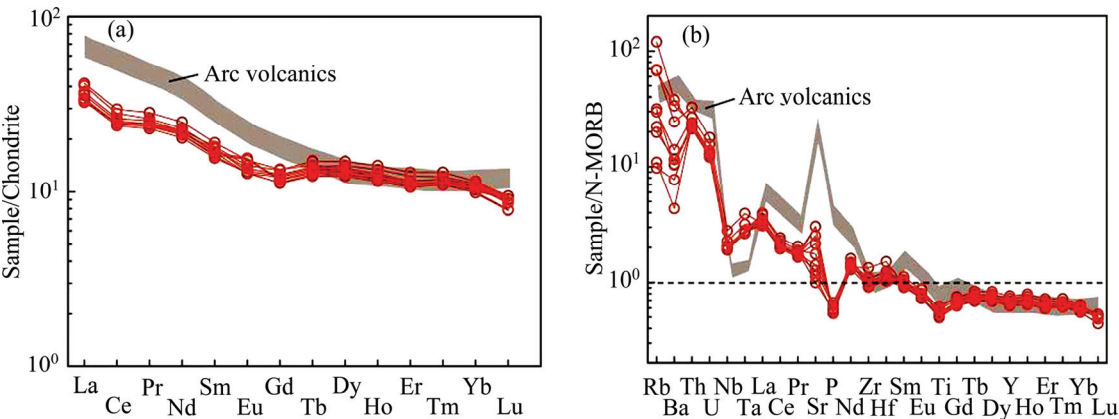


图 7 鹤城变玄武岩稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素 N-MORB 标准化图解(标准数据值据 Sun and McDonough^[30]; 岛弧火山岩数据据 Luhr and Haldar^[31])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and N-MORB-normalized trace elements pattern(b) for meta-basalts in Hecheng area, South Anhui, China (Normalized values after Sun and McDonough^[30]; Arc volcanic rocks values after Luhr and Haldar^[31])

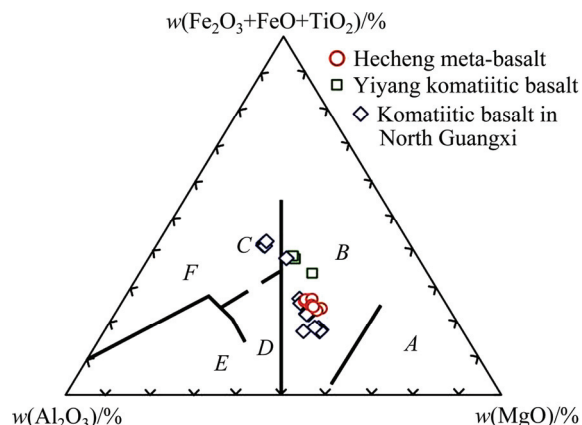


图8 鹤城变玄武岩 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-(Fe}_2\text{O}_3\text{+FeO+TiO}_2\text{)}$ 图解 (益阳科马提质玄武岩数据^[34]; 桂北科马提质玄武岩数据^[35])^[33]: A—科马提岩; B—科马提质玄武岩; C—高铁拉斑玄武岩; D—高铁拉斑玄武岩; E—玄武岩; F—安山岩

Fig. 8 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-(Fe}_2\text{O}_3\text{+FeO+TiO}_2\text{)}$ diagram of Hecheng meta-basalts (Values of Yiyang and North Guangxi Komatiitic basalts from Refs. [34–35])^[33]: A—Komatiite; B—Komatiitic basalt; C—High Fe tholeiite; D—High Mg tholeiite; E—Basalt; F—Andesite

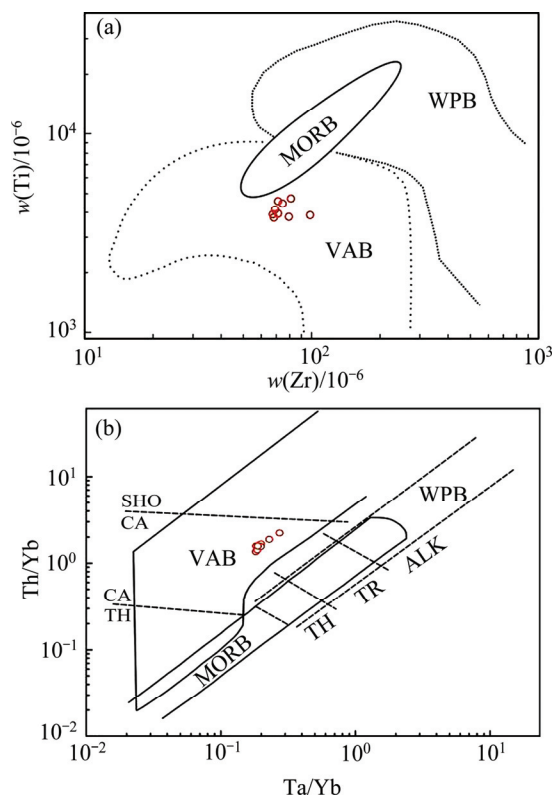


图9 鹤城变玄武岩 Ti-Zr 图解及 Ta/Yb-Th/Yb 图解^[37]: MORB—洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; VAB—火山弧玄武岩; SHO—橄榄玄粗岩系; CA—钙碱性; TH—拉斑玄武岩; TR—粗面岩; ALK—碱性

Fig. 9 Ti-Zr(a) and Ta/Yb-Th/Yb(b) diagrams of Hecheng meta-basalts^[37]: MORB—Mid-ocean ridge basalt; WPB—Within plate basalt; VAB—Volcanic arc basalt; SHO—Shoshonite; CA—Calc-alkalic; TH—Tholeiite; TR—Trachyte; ALK—Alkaline

不变, 在 Nb-Y 图(见图 10)中, 鹤城玄武岩样品中的 Nb 呈弱的倾斜线状, 反映岩浆演化遭受弱的同化混染作用。在 TREUIL 等^[40]提出的 $(\text{Ce/Yb})_N\text{-Ce}_N$ (见图 11) 及 Ce/Cr-Ce 、 Ce/Ni-Ce 、 Eu-Ce (图略) 等图解中反映本区玄武岩成分变化受地幔部分熔融程度的制约。由此说明, 鹤城变玄武岩岩浆上升过程中伴有弱的同化混染。

鹤城变玄武岩贫不相容元素、稀土元素总量较低、轻重稀土元素分异不明显, Nb、Ti 亏损, 与岛弧玄武岩类似, MgO 含量高, 说明岩浆形成深度较大, 部分熔融程度较高, 主要来源于富集地幔岩浆。其中 Eu 略具亏损, 暗示岩浆经历了结晶分离作用。

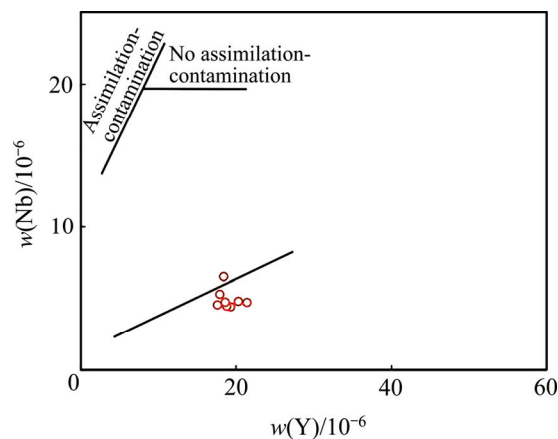


图10 鹤城变玄武岩 Nb-Y 关系图^[39]

Fig. 10 Nb-Y diagram of Hecheng meta-basalts^[39]

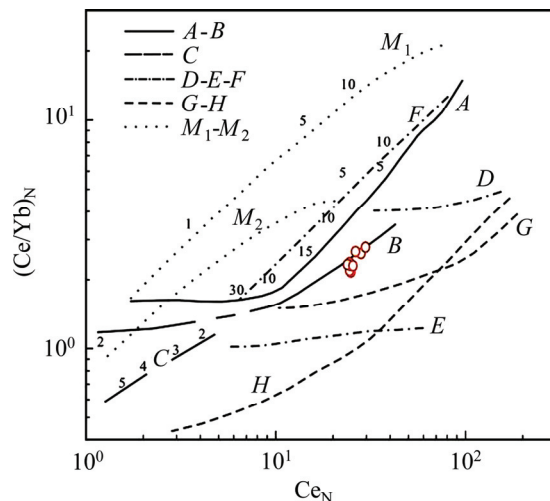


图11 鹤城变玄武岩图 $(\text{Ce/Yb})_N\text{-Ce}_N$ 图解^[40]: A-B: 部分熔融; C: 连续熔融; D-E-F: 晶体分离; G-H: 状晶体离; $M_1\text{-}M_2$: 二辉橄榄与未饱和岩浆混合

Fig. 11 $(\text{Ce/Yb})_N\text{-Ce}_N$ diagram of Hecheng meta-basalts^[40]: A-B: Partial melting; C: Continuous melting; D-E-F: Crystal separation; G-H: Appearance crystal separation; $M_1\text{-}M_2$: Unsaturation magma mixed with ilmenite

4.2 构造环境及构造意义

鹤城地区岩浆岩的成因和形成的构造背景与江南造山带及扬子板块有着密切关系。扬子克拉通内新元古代岩浆岩成因, 主要存在3种不同认识: 1) 地幔柱模式, 认为新元古代早期(≥ 880 Ma)的岩浆岩形成于Rodinia超大陆聚合有关的四堡期造山运动, 而新元古代中期(850~740 Ma)的岩浆岩为板内非造山成因, 其中830~795 Ma和780~750 Ma两个主要时期的岩浆活动很可能与导致Rodinia超大陆裂解的地幔柱-超级地幔柱活动有关^[7, 15]; 2) 岛弧模式, 认为扬子克拉通周边新元古代(特别是 ≥ 800 Ma)的岩浆活动与洋壳俯冲消减于扬子地块之下的俯冲造山运动有关, 属大陆边缘岩岛弧, 扬子地块周缘的俯冲造山运动可能持续到820 Ma或更晚^[41-43]; 3) 板块-裂谷模式, 认为扬子地块周缘新元古代岩浆活动是早期弧-陆碰撞、晚期伸展垮塌和大陆裂谷再造产物^[5, 36], 认为扬子和华夏地块之间的造山运动持续到约820 Ma, 大规模的820~830 Ma花岗岩形成于造山带垮塌阶段, 而随后的岩浆活动形成于岩石圈伸展-裂谷阶段。

在La/Nb-La图(见图12(a))中本区玄武岩落在岛弧玄武岩区域内; 在2Nb-Zr/4-Y图(见图12(b))及Th-Nb/16-Hf/3图(见图12(c))以及Ta/Hf-Th/Hf图(见图12(d))中, 本区变玄武岩显示火山弧玄武岩及裂谷玄武岩特征, 说明鹤城变玄武岩可能形成于板块俯冲有关的扩张弧后盆地环境。鹤城变玄武岩LREE略富集以及Eu略负异常, 富集Rb、Ba、Th、U等强不相容元素, 亏损高场强元素Nb和Ta, 明显不同于洋脊玄武岩, 指示其成因可能与富集型地幔的部分熔融有关, 同时有地壳物质的混染, 形成于与俯冲有关的弧后小洋盆环境。尽管目前在鹤城附近未发现超铁镁质岩, 但据其与伏川蛇绿岩基性岩类似的地球化学特征及相近的产出地质特征、空间位置和形态等, 推断鹤城变玄武岩可能为伏川蛇绿岩西延组成部分, 与伏川蛇绿岩组成了一个弧后杂岩带。前人认为伏川蛇绿岩形成于弧后盆地或陆缘小洋盆^[48]。鹤城变玄武岩及伏川蛇绿岩基性岩墙群不发育, 且含有较多深海-半深海沉积, 这些特征与张旗等提出的“仅出现镁铁质的喷出岩和侵入岩, 缺少席状岩墙群和堆晶超镁铁岩或堆晶岩不发育的洋壳厚度较小的蛇绿岩”组合相似^[49]。因此, 认为鹤城变玄武岩形成于低速扩张的陆缘小洋盆扩张脊环境。

中元古代末期-晚元古代早期(约1 Ga), 在扬子和华南两大块体之间存在一多岛弧共存的洋盆, 这些岛弧应包括原始大洋岛弧和大陆边缘岛弧两类。其实原

始大洋岛弧是由华南块体以北的洋壳对(扬子块体以南的)洋壳俯冲形成的。洋壳在俯冲过程中由于温度和压力增加而释放出流体和大离子亲石元素等活泼元素, 并交代了俯冲带的软流圈地幔楔。该俯冲作用导致了弧后盆地扩张和洋壳的形成(以赣东北蛇绿岩为代表)。弧后盆地扩张早期形成的岩浆在化学组成上有许多岛弧的特征(类似于本区变玄武岩以及一些具岛弧特征的火山岩), 随着弧后盆地扩张发展演化至晚期, 洋-弧俯冲带离盆地扩张中心越来越远, 而岩浆的岛弧特征则越来越不明显, 但越来越多地表现出MORB的特征^[48]。

张彦杰等^[50]测得伏川蛇绿岩伟晶辉长岩及其上覆岩系英安质凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(844 $\pm$ 11) Ma。丁炳华等^[26]获得的皖南伏川蛇绿岩套中方辉橄斑岩堆晶岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄仅为(827 $\pm$ 9) Ma, 侵入到其中的辉长岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(848 $\pm$ 12) Ma。董树文等^[51]在江西庐山地区双桥山群地层中发现了一套具枕状构造的细碧岩-角斑岩-石英角斑岩组合, 并测得与其共生的英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(840 $\pm$ 7) Ma。江南造山带东段彰源枕状玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(832 $\pm$ 19) Ma, 与庐山地区枕状玄武岩形成时代一致, 为新元古代中期弧后洋盆的产物^[52]。江南造山带西南段梵净山地区出露的枕状熔岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(821 $\pm$ 4) Ma^[53]。结合地质背景, 认为鹤城变玄武岩与伏川蛇绿岩中的基性火山岩年龄相似。结合近年来在皖南祁门附近溪口群中新发现的枕状熔岩^[25, 52]、湖南北部益阳冷家溪群中的枕状熔岩^[34]以及黔东南梵净山地区梵净山群中的枕状熔岩^[53], 在江南造山带的近扬子陆块一侧, 隐约存在着一条走向大致平行于造山带的枕状熔岩带, 可能代表着弧后洋盆最终消失的部位。与鹤城处于同一构造带的赣东北蛇绿岩有关西湾斜长花岗岩中 SHRIMP U-Pb 年龄为(968 $\pm$ 23) Ma^[7]及赣北庐山筲箕洼-汉阳峰组岛弧火山岩的锆石 U-Pb 年龄分别为(917 $\pm$ 36) Ma 和(878 $\pm$ 51) Ma^[54], 说明(900~850) Ma 浙北-皖南-赣北一线, 出现了大量的岛弧岩浆岩活动, 扬子板块与华夏板块处于会聚阶段^[6-7]。

吴荣新等^[18]通过对皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 表明约(881 $\pm$ 9) Ma 出现过大规模的岛弧岩浆活动, 皖南石耳山花岗岩和浙北虹赤村/上墅组玄武岩-流纹岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(779 $\pm$ 11) Ma 和(797 $\pm$ 11) Ma^[7], 指示这个构造带出现晚期双峰式岩浆活动^[55-56]。江西九岭花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(819 $\pm$ 9) Ma^[7]。表

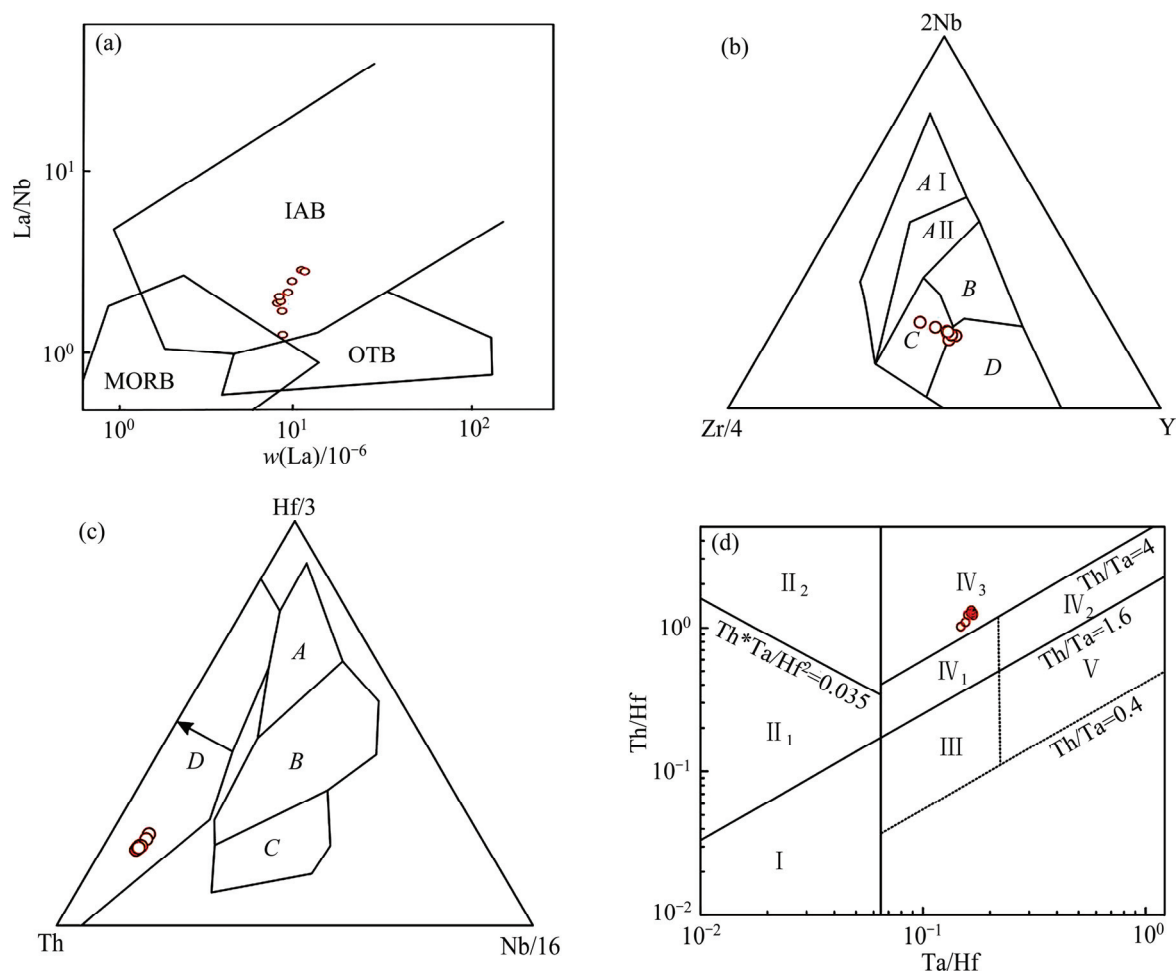


图 12 鹤城变玄武岩构造环境判别图解(a) La-La/Nb 图解^[44]: MORB-洋中脊玄武岩; OTB-洋岛拉斑玄武岩; IAB-岛弧玄武岩; (b) Zr/4-Y-2Nb 三角图解^[45]: A I—板内碱性玄武岩; A II—板内拉斑玄武岩; B—富集型 MORB; C—火山岛玄武岩; D—正常型 MORB 火山弧玄武岩; (c) Th-Nb/16-Hf/3 三角图解^[46]: A—N 型 MORB; B—E 型 MORB 及板内拉斑玄武岩; C—板内碱性玄武岩; D—破坏性板块边缘玄武岩及其分异物; (d) Ta/Hf-Th/Hf 图解^[47]: I—板块发散边缘 N-MORB 区; II—板块汇聚边缘(II 1—大洋岛弧玄武岩区; II 2—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV—大陆板内(IV 1—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV 2—陆内裂谷碱性玄武岩区; IV 3—大陆拉张带或初始裂谷玄武岩区); V—地幔热柱玄武岩区

Fig. 12 Tectonic discrimination diagrams for Hecheng meta-basalts, South Anhui: (a) La-La/Nb diagram^[44]: MORB-ocean ridge basalt; OTB—Ocean island tholeiite basalt; IAB—Island arc basalt; (b) Zr/4-Y-2Nb diagram^[45]: A I—Within-plate alkali basalt; A II—Within-plate tholeiite; B—Enriched type MORB; C—Volcanic island arc basalt; D—Normal type MORB volcanic arc basalt; (c) Th-Nb/16-Hf/3 diagram^[46]: A—N-type MORB; B—E-type MORB and within-plate tholeiite; C—Within-plate alkali basalt; D—Destructive plate margin basalt and differentiation. (d) Ta/Hf-Th/Hf diagram^[47]: I—Plate divergence margin N-MORB; II—Plate convergent margin (II 1—Ocean arc basalt; II 2—Continental margin arc and continental margin volcanic arc basalt); III—Oceanic within-plate island, seamount basalt and T-MORB, E-MORB; IV—Continental within-plate (IV 1—Continental rift and continental margin rift tholeiite; IV 2—Continental rift alkali basalt; IV 3—Continental extension or original rift basalt); V—Mantle plume basalt

明浙北-皖南-赣东北一带存在 820 Ma 的岩浆活动记录。

通过以上分析讨论,可以将鹤城变玄武岩形成与演化的过程概括如下(见图 13): 1) 约 1300~900 Ma, 华夏板块与扬子板块之间处于洋壳消减俯冲阶段(见

图 13(a))。在洋壳消减俯冲过程中,俯冲洋壳的部分熔融形成了皖南蛇绿岩套。2) 约 900~830 Ma(见图 13(b)), 俯冲消减引起地幔对流使扬子板块东南缘引张,出现了大规模的岛弧岩浆活动,导致岛弧型岩浆岩在扬子板块东南缘的浙北-皖南-赣东北地区广泛

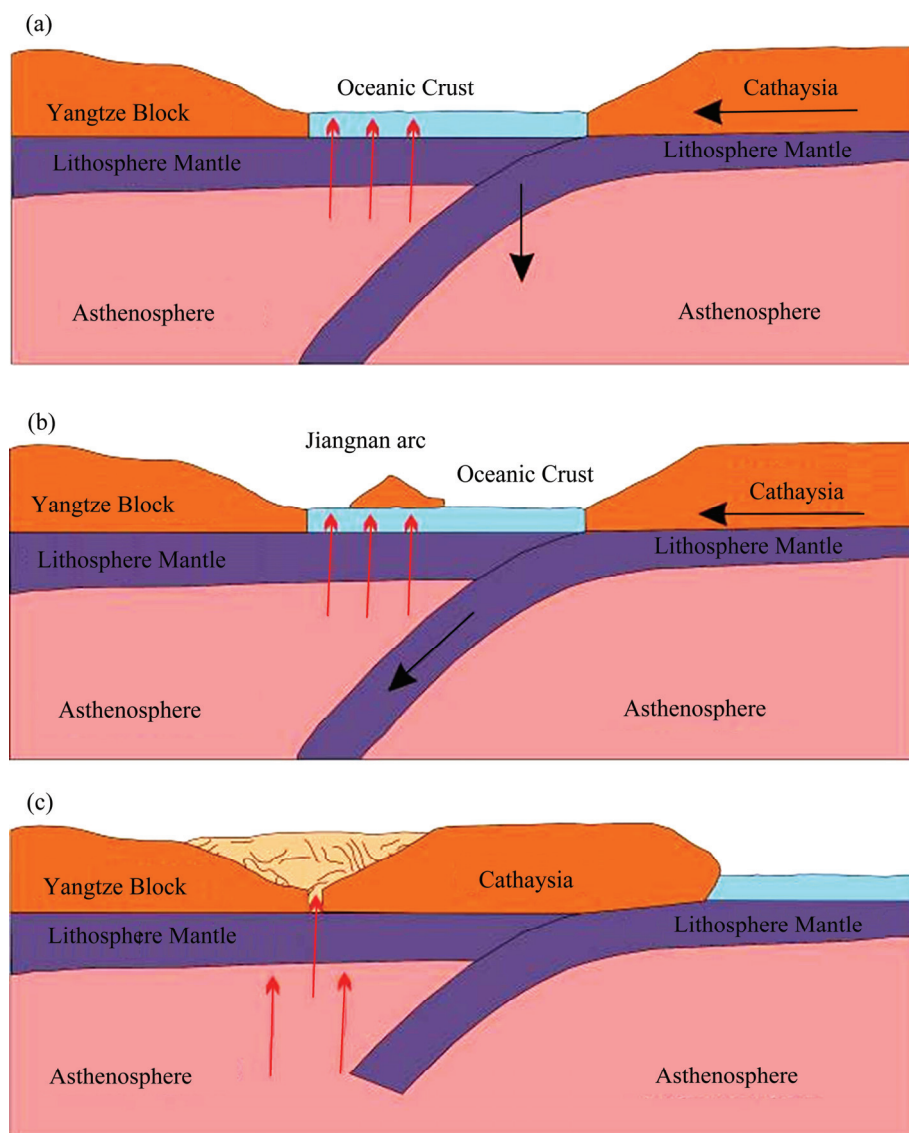


图 13 中-新元古代江南造山带演化模式简图

Fig. 13 Sketch evolution model for East Jiangnan Orogen during Meso-to Neoproterozoic: (a) Oceanic subduction (1.3–0.9 Ga); (b) Arc magmatism (0.9–0.83 Ga); (c) Collision (0.83–0.8 Ga)

发育, 沿着大陆边缘形成初生地壳。3) 约 830~800 Ma(见图 13(c)), 华夏板块与扬子板块之间的拼合结束, 形成拉张增生型造山带。高热流事件对造山带下伏岩石圈地幔及其上覆加厚地壳加热, 导致古扬子大陆边缘加厚地壳内部的富水的沉积岩高比例重熔, 形成典型的 S 型花岗岩岩浆, 并于中上地壳水平固结成岩。

5 结论

1) 鹤城变玄武岩具有低 SiO_2 含量(49.99%~53.38%), 富铁(FeO 含量为 8.49%~10.16%)、偏碱、高

镁(MgO 含量为 7.38%~9.01%), 稀土总量低, 具有轻稀土元素略富集的右倾模式; 富集 Rb、Ba、Th、U 等强不相容元素, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta, 具有岛弧玄武岩及科马提质玄武岩的地球化学特征, 岩浆形成深度较大, 部分熔融程度较高, 主要来源于富集地幔岩浆, 同时有地壳物质的混染。

2) 鹤城变玄武岩地质及地球化学特征表明其可能属于皖南伏川蛇绿岩西延组成部分, 与伏川蛇绿岩组成了一个弧后杂岩带, 形成于与俯冲有关的弧后小洋盆环境。

3) 新元古代板块俯冲、岛弧岩浆活动、拼合以及拼合后由于高热流事件形成典型的 S 型花岗岩岩浆是

江南造山带形成的比较合理的构造演化过程。

REFERENCES

- [1] 薛怀民, 马 芳, 宋永勤, 谢亚平. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3215–3244.
XUE Huai-min, MA Fang, SONG Yong-qin, XIE Ya-ping. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogeny, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3215–3244.
- [2] 水 涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 绍兴–江山古陆对接带[J]. 科学通报, 1986, 31(6): 444–448.
SHUI Tao, XU Bu-tai, LIANG Ru-hua, QIU Yu-shuang. Paleoland collisional zone of Jiangshan-Shaoxing[J]. Chinese Science Bulletin, 1986, 31(6): 444–448.
- [3] 程 海. 浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究[J]. 地质论评, 1991, 37(3): 203–212.
CHENG Hai. The late proterozoic collision orogeny in northwestern Zhejiang Province China[J]. Geological Review, 1991, 37(3): 203–212.
- [4] WU Rong-xin, ZHENG Yong-fei, WU Yuan-bao. Reworking of Juvenile crust element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China[J]. Precambrian Research, 2006, 146(3): 179–212.
- [5] ZHENG Yong-fei, ZHANG Shao-bing, ZHAO Zi-fu, WU Yuan-bao, LI Xian-hua, LI Zheng-xiang, WU Fu-yuan X. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust[J]. Lithos, 2007, 96(1): 127–150.
- [6] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件[J]. 高校地质学报, 2009, 15(4): 453–459.
ZHOU Jin-cheng, WANG Xiao-lei, QIU Jian-sheng. Some Neoproterozoic geological events involved in the development of the Jiangnan Orogen[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(4): 453–459.
- [7] LI Zheng-xiang, LI Xian-hua, KINNY P D. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle super plume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 2003, 122: 85–109.
- [8] 朱 光, 刘国生. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 103–111.
ZHU Guang, LIU Guo-sheng. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in Southern Anhui[J]. Geotect Metal, 2000, 24(2): 103–111.
- [9] 马慧英, 孙海清, 谢 维. 扬子东南缘“南华纪”火山岩与沉积盆地演化[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2631–2640.
MA Hui-ying, SUN Hai-qing, XIE Wei. “Nanhuaian” volcanic rocks and sedimentary basin evolution in southeastern margin of Yangtze platform[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2631–2640.
- [10] YAO Jin-long, SHU Liang-shu, SANTOSH M, ZHAO Guo-chun. Neoproterozoic arc-related mafic-ultramafic rocks and syn-collision granite from the western segment of the Jiangnan Orogen, South China: Constraints on the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. Precambrian Research, 2014, 243: 39–62.
- [11] ZHANG Shao-bing, WU Rong-xin, ZHENG Yong-fei. Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogen[J]. Precambrian Research, 2012, 220/221: 45–64.
- [12] ZHANG Chuan-lin, SANTOSH M, ZOU Hai-bo, LI Huai-kun, HUANG Wen-cheng. The Fuchuan ophiolite in Jiangnan Orogen: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and implications for the Neoproterozoic assembly of South China[J]. Lithos, 2013, 179: 263–274.
- [13] ZHANG Yu-zhi, WANG Yue-jun, GENG Hong-yan, ZHANG Yan-hua, FAN Wei-ming, ZHANG Hong. Early Neoproterozoic (~850 Ma) back-arc basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and petrogenetic constraints from meta-basalts[J]. Precambrian Research, 2013, 231: 325–342.
- [14] WANG Wei, ZHOU Mei-fu, YAN Dan-ping, LI Liang, MALPAS John. Detrital zircon record of Neoproterozoic active-margin sedimentation in the eastern Jiangnan Orogen, South China[J]. Precambrian Research, 2013, 235: 1–19.
- [15] LI Xian-hua, LI Zheng-xiang, GE Wen-chun, ZHOU Han-wen, LI Wu-xian, LIU Ying, WINGATE M T D. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca.825 Ma?[J]. Precambrian Research, 2003, 122: 45–83.
- [16] WANG Xiao-lei, SHU Liang-shu, XING Guang-fu, ZHOU Jin-cheng, TANG Ming, SHU Xu-jie, QI Liang, HU Yan-hua. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800–760 Ma volcanic rocks[J]. Precambrian Research, 2012, 222/223: 404–423.
- [17] 王德恩, 周 翔, 余心起, 杜玉雕, 杨赫鸣, 傅建真, 董会明. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1514–1529.
WANG De-en, ZHOU Xiang, YU Xin-qi, DU Yu-diao, YANG He-ming, FU Jian-zhen, DONG Hui-ming. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W-Mo ore district, Qimen area,

- southern Anhui[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1514–1529.
- [18] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 587–606.
- WU Rong-xin, ZHENG Yong-fei, WU Yuan-bao. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 587–606.
- [19] 翁望飞, 支利庚, 蔡连友, 徐生发, 王邦民. 皖南及邻区燕山期两个类型花岗岩地球化学对比与岩石成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(4): 433–448.
- WENG Wang-fei, ZHI Li-geng, CAI Lian-you, XU Sheng-fa, WANG Bang-min. Petrogenesis and geochemical comparison of two types of Yanshanian granite in South Anhui and its surrounding area[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2011, 30(4): 433–448.
- [20] 程光华, 汪应庚. 江南东段构造格架[J]. *安徽地质*, 2000, 10(1): 1–8.
- CHENG Guang-hua, WANG Ying-geng. The structural framework of the eastern section of the Jiangnan orogeny[J]. *Geology of Anhui*, 2000, 10(1): 1–8.
- [21] 余心起, 江来利, 许卫, 邱瑞龙, 杜建国, 戴圣潜. 皖浙赣断裂带的界定及其基本特征[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3): 102–113.
- YU Xin-qi, JIANG Lai-li, XU Wei, QIU Rui-long, DU Jian-guo, DAI Sheng-qian. Identification and basic characteristics of the Anhui-Zhejiang-Jiangxi fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 102–113.
- [22] 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 华北—江南地区中、新元古代地层格架的再认识[J]. *地球学报*, 2009, 30(4): 433–446.
- GAO Lin-zhi, ZHANG Chuan-heng, LIU Peng-ju, DING Xiao-zhong, WANG Zhi-qiang, ZHANG Yan-jie. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(4): 433–446.
- [23] 吴新华, 楼法生, 刘春根. 皖浙赣相邻区中元古代溪口岩群的划分与对比[J]. *资源调查与环境*, 2005, 26(2): 86–96.
- WU Xin-hua, LOU Fa-sheng, LIU Chun-gen. The division and the contrast of Middle Proterozoic Xikou rocks group in the boundary of Anhui Zhejiang Jiangxi Provinces[J]. *Resources Survey & Environment*, 2005, 26(2): 86–96.
- [24] 江西地质调查院. 1:25 万景德镇城区调查报告[M]. 2002.
- Jiangxi Geological Survey Institute. 1:25 million regional survey report of Jingdezhen amplitude[M]. 2002.
- [25] 张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 张晓东, 武彬, 王存智, 余明刚. 皖赣相邻鄱公山地区新元古代地壳组成及造山过程[J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1401–1427.
- ZHANG Yan-jie, ZHOU Xiao-hua, LIAO Sheng-bing, ZHANG Xiao-dong, WU Bin, WANG Cun-zhi, YU Ming-gang. The crustal composition and orogenic process in Neoproterozoic in Zhanggongshan area of Anhui-Jiangxi border region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(10): 1401–1427.
- [26] 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 郑磊, 陈雷. 江南造山带存在新元古代(~850 Ma)俯冲作用——来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(5): 375–388.
- DING Bing-hua, SHI Ren-deng, ZHI Xia-chen, ZHENG Lei, CHEN Lei. Neoproterozoic (~850Ma) subduction in the Jiangnan orogen: evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(5): 375–388.
- [27] LE MAITRE R W, BATEMAN P, DUDEK A. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [28] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products[J]. *Chem Geol*, 1977, 20: 325–343.
- [29] MIYASHIRO A. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *J Geol*, 1975, 83(2): 249–281.
- [30] SUN S S, MCDONOUGH W F. Magmatism in the ocean basin[M]. SAUNDERS A D, NORRIS M J. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [31] LUHR J F, HALDAR D. Barren Island Volcano (NE Indian Ocean): Island-arc high-alumina basalts produced by troctolite contamination[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 149: 177–212.
- [32] CONDIE K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. *Lithos*, 1989, 23: 1–18.
- [33] 车勤建, 彭和求, 李金冬, 贾宝华, 伍光英, 陈必河. 湘北益阳古火山岩的成因及其地质意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(6): 513–519.
- CHE Qin-jian, PENG He-qiu, LI Jin-dong, JIA Bao-hua, WU Guang-ying, CHEN Bi-he. Origin of the Yiyang paleovolcanic suite in northern Hunan, China, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(6): 513–519.
- [34] WANG Xiao-lei, ZHOU Jin-cheng, QIU Jian-sheng, GAO Jian-feng. Geochemistry of the Meso- to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen[J]. *Precambrian Research*, 2004, 135: 79–103.
- [35] ZHOU Mei-fu, ZHAO Tai-ping, MALPAS J, SUN Min. Crustal-contaminated komatiitic basalts in Southern China: Products of a Proterozoic mantle plume beneath the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2000, 103: 175–189.
- [36] ZHENG Yong-fei, WU Rong-xin, WU Yuan-bao. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidences from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163:

- 351–383.
- [37] PEARCE J A. Andesites[M]. THORPE R S. New York: Wiley, 1982: 528–548.
- [38] PICHAVANT M, MYSEN B O, MACDONALD R. Source and H₂O content of high-MgO magma in island arc settings: An experimental study of a primitive calc-alkaline basalt from St. Vincent, Lesser Antilles arc[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(12): 2193–2209.
- [39] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J Petrol*, 1984, 25: 956–983.
- [40] TREUIL M, JORON J L, JAFFREZIC H. Geochimie des elements hygromagmaphiles: Coefficients de partage mineraux/liquid et proprietes structurales de ces elements dans les liquids magmatiques[J]. *Bull Mkrul*, 1979, 102: 402–409.
- [41] 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, MALPAS J. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论—扬子地块西缘变质岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比[J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 249–256.
YAN Dan-ping, ZHOU Mei-fu, SONG Hong-lin, MALPAS J. Where was South China located in the reconstruction of Rodinia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 249–256.
- [42] ZHOU Mei-fu, ZHAO Jun-hong, XIA Xiao-ping, SUN Wei-hua, YAN Dan-ping. Comment on “Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China”[J]. *Precambrian Research*, 2007, 155: 313–317.
- [43] ZHAO Xin-fu, ZHOU Mei-fu, LI Jian-wei, WU Fu-yuan. Association of Neoproterozoic A-and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 1–15.
- [44] 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 Shu-guang. Ba-Th-Nb-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(2): 146–157.
- [45] MESCHÉDE M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207–218.
- [46] WOOD D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50(1): 11–30.
- [47] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413–421.
WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-zhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(3): 413–421.
- [48] 赵建新, 李献华, MCGULLOCH M T. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其构造意义: 元素和 Sm-Nd 同位素制约[J]. *地球化学*, 1995, 24(4): 311–324.
- ZHAO Jian-xin, LI Xian-hua, MCGULLOCH M T. Petrogenesis of ophiolites from South Anhui and Northeast Jiangxi, and their tectonic implications: Chemical and Sm-Nd isotopic constraints[J]. *Geochimica*, 1995, 24(4): 311–324.
- [49] 张旗, 陈雨, 钱青. 两类蛇绿岩剖面及其成因的探讨[J]. *自然科学进展*, 1998, 8(3): 326–330.
ZHANG Qi, CHEN Yu, QIAN Qing. Two types of ophiolite sections and their genesis[J]. *Progress in Natural Science*, 1998, 8(3): 326–330.
- [50] 张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 余明刚, 蒋仁, 姜杨. 江南造山带北缘鄂源基性岩地质—地球化学特征及成因机制[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(3): 393–405.
ZHANG Yan-jie, ZHOU Xiao-hua, LIAO Sheng-bing, YU Ming-gang, JIANG Ren, JIANG Yang. Geological and geochemical characteristics and petrogenesis of the mafic rocks from Zhangyuan, Northern Jiangnan Orogen[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(3): 393–405.
- [51] 董树文, 薛怀民, 项新葵, 马立成. 赣北庐山地区新元古代细碧—角斑岩系枕状熔岩的发现及其地质意义[J]. *中国地质*, 2010, 37: 1021–1033.
DONG Shu-wen, XUE Huai-min, XIANG Xin-kui, MA Li-cheng. The discovery of Neoproterozoic pillow lava in spilite-ceratophyre of Lushan area, northern Jiangxi Province, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2010, 37: 1021–1033.
- [52] 周效华, 高天山, 马雪, 张彦杰, 廖圣兵, 余明刚, 陈丹丹, 朱延辉. 江南造山带东段鄂源枕状玄武岩的年代学与构造属性研究[J]. *资源调查与环境*, 2014, 35(4): 235–244.
ZHOU Xiao-hua, GAO Tian-shan, MA Xue, ZHANG Yan-jie, LIAO Sheng-bing, YU Ming-gang, CHEN Dan-dan, ZHU Yan-hui. Study on geochronology and structural properties of pillow basalts in Zhangyuan region, eastern section of the Jiangnan orogen[J]. *Resources Survey and Environment*, 2014, 35(4): 235–244.
- [53] 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 江南造山带西南段梵净山地区镁铁质—超镁铁质岩: 形成时代、地球化学特征与构造环境[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 3015–3030.
XUE Huai-min, MA Fang, SONG Yong-qin. Mafic-ultramafic rocks from the Fanjingshan region, southwestern margin of the Jiangnan orogenic belt: Ages, geochemical characteristics and tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 3015–3030.
- [54] 谢国刚, 李均辉, 李武显, 唐红峰, 李惠民, 周新民. 庐山前震旦纪岩石中锆石 U-Pb 法定年与其地质意义[J]. *地质科学*, 1997, 32(1): 110–115.
XIE Guo-gang, LI Jun-hui, LI Wu-xian, TANG Hong-feng, LI Hui-min, ZHOU Xin-min. U-Pb zircon dating of presinian rocks at Lushan Mt. and its geological implication[J]. *Sci Geol Sin*,

- 1997, 32(1): 110–115.
- [55] ZHENG Yong-fei, FU Bin, GONG Bing, LI Long. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogeny in China: Implications for geodynamics and fluid regime[J]. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105–161.
- [56] ZHENG Yong-fei, WU Yuan-bao, GONG Bing, LI Long, ZHAO Zi-fu. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 4145–4163.

Tectonic significance and geochemistry of Komatiitic meta-basalt in Hecheng, southern Anhui

WANG Long¹, LIU Chun-ming^{1,2}, HU Zhao-qi³, JIANG Lai-li³, HUANG De-zhi¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection,
Central South University, Changsha 410083, China;

3. Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Anhui Province, Hefei 230001, China)

Abstract: The Neoproterozoic meta-mafic rocks of the Jiangnan Orogen in South China provide a critical geological record for unraveling regional tectonic history and testing previously proposed tectonic models. An integrated study of geochemistry and petrogenesis was carried out for the meta-basaltic rocks from Hecheng, south Anhui Province of the eastern Jiangnan Orogen, which distributed along the NE-SW Yaoli-Hecheng-Jiangtan line. The geochemical features of the Hecheng meta-basalt are similar to those of Komatiitic basalt as well as island arc basalt. The trace elements features, such as the enrichment in strongly incompatible elements (Rb, Ba, Th and U) and the depletion in high field strength elements (Nb and Ta), indicate that the Hecheng meta-basalt is derived from partial melting of enriched mantle, with crust materials contamination, suggesting that Hecheng meta-basalt is a westward extension of Fuchuan ophiolite in southern Anhui Province, and constitute a back-arc complex belt with Fuchuan ophiolite, attributed to the back arc basin environment related to the subduction. Integrating this information with previous studies, the plate subduction-island arc magmatism-assembly model is a more appropriate geodynamic interpretation for the Neoproterozoic tectonic evolution of South China.

Key words: Eastern Jiangnan orogen; Hecheng; meta-basalt; Komatiitic basalt; island arc basalt

Foundation item: Project(41174103) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2012-g-38) supported by Public Welfare Geological Research of Anhui Province, China; Project (2015JJ2151) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2015-04-08; **Accepted date:** 2015-09-05

Corresponding author: LIU Chun-ming; Tel: +86-13755190421; E-mail: lifuming001@163.com

(编辑 龙怀中)