

doi: 10.12029/gc20160309

董学发, 余盛强, 唐增才, 等. 浙江“陈蔡增生杂岩”中洋内弧型变基性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 817–828.
Dong Xuefa, Yu Shengqiang, Tang Zengcai, et al. Geochemical characteristics of the intra-oceanic arc type metabasic-volcanics in Chencai accretion complex of Zhejiang Province and their geological significance[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 817–828(in Chinese with English abstract).

浙江“陈蔡增生杂岩”中洋内弧型变基性火山岩的地球化学特征及其地质意义

董学发^{1,2} 余盛强² 唐增才² 肖庆辉³ 袁 强² 陈忠大² 周宗尧² 吴小勇²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311203; 3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 文章报道了浙江“陈蔡增生杂岩”中新发现一类特殊的变质基性火山岩组合, 主要由斜长角闪岩和角闪岩组成, 岩石具有低 Ti 高 Mg 的地球化学特征, 原岩为拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩。岩石稀土总量较低, ΣREE 平均为 25.46×10^{-6} , 轻重稀土比值 LREE/HREE 及 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 比值较小, 平均分别为 1.87 和 1.30, δEu 平均为 0.97, 稀土配分与 N-MORB 及 T-MORB 类似, 而微量元素显示为富集相容元素 Cr、Ni 及大离子亲石元素 (LILE) K、Rb、Ba、U, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Zr、P、Ti。上述地球化学特征与玻安质岩石十分相似, 微量元素比值及图解判别均指示该套变基性火山岩形成于大洋岛弧 (洋内弧) 环境。该洋内弧型变基性火山岩的发现表明原定陈蔡群极有可能为新元古代中期至早古生代含有古大洋地壳残片的俯冲增生杂岩, 而不是华夏古陆块的基底。

关键词: 洋内弧; 变基性火山岩; 陈蔡增生杂岩; 地球化学; 浙江

中图分类号: P588.14⁺.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)03-0817-12

Geochemical characteristics of the intra-oceanic arc type metabasic-volcanics in Chencai accretion complex of Zhejiang Province and their geological significance

DONG Xue-fa^{1,2}, YU Sheng-qiang², TANG Zeng-cai², XIAO Qing-hui³, YUAN Qiang²,
CHEN Zhong-da², ZHOU Zong-yao², WU Xiao-yong²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, Zhejiang, China; 3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper reports the discovery of a special kind of metabasic-volcanics combination in Chencai accretion complex of Zhejiang Province. It is mainly composed of amphibolite and hornblendite. Geochemical characteristics of the rocks are low Ti and

收稿日期: 2016-01-20; 改回日期: 2016-02-12

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120114068901)、浙江省国土资源厅项目 (2014004, 2010001) 联合资助。

作者简介: 董学发, 男, 1979 年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事区域地质及矿产调查工作; E-mail: dongxuefa@qq.com。

通讯作者: 肖庆辉, 男, 1939 年生, 博士生导师, 研究员, 主要从事花岗岩大地构造学、矿产资源成矿地质背景研究与中国岩石圈三维结构研究; E-mail: qinghuixiao@126.com。

high Mg. Their protoliths are tholeiite and calcalkali basalts. The rocks have low values of REE, and the average REE is 25.46×10^{-6} . The ratios of LREE to HREE and La_N to Yb_N are lower, and the average of the ratios are respectively 1.87 and 1.30. The average of δ (Eu) is 0.97. The REE distribution model is similar to N-MORB and T-MORB. Trace elements show enrichment of incompatible elements Cr, Ni and LILE such as K, Rb, Ba and U and depleted in HFSE such as Nb, Zr, P and Ti. The geochemical characteristics are very similar to those of boninites. The ratios and discrimination diagrams of trace elements indicate that the metabasic-volcanics were formed in an intra oceanic arc. The discovery of the intra oceanic arc type metabasic-volcanics shows that Chencai Group resulted most probably from the subducted accretionary complex which contained ancient fragments of oceanic crust from the middle Neoproterozoic to early Paleozoic rather than the Cathaysia Block basement.

Key words: intra oceanic arc; metabasic-volcanics; Chencai accretion complex; geochemistry; Zhejiang

About the first author: DONG Xue-fa, male, born in 1979, doctor candidate, senior engineer, engages in the study of regional geology and mineral resources; E-mail: dongxuefa@qq.com.

About the corresponding author: XIAO Qing-hui, male, born in 1939, supervisor of doctor candidates, senior researcher, engages in the study of granite tectonics, metallogenic geological background of mineral resources and three-dimensional structure of the lithosphere of China; E-mail: qinghuixiao@126.com.

Fund support: Supported by Program from China Geological Survey (No. 12120114068901) and Programs from Zhejiang Department of Land and Resources (No. 2014004, 2010001).

浙江地处扬子陆块区与“华夏造山带”^[1](也称武夷—云开—台湾造山系^[2]、“华南新元古代—早古生代造山带”^[3]等)交界部位之北东端,区内地质构造演化历史极其复杂,是研究扬子、华夏古板块碰撞拼合、新元古代Rodinia超大陆裂解等一系列重大科学问题的关键地区之一。浙江中部(大致位于江山—绍兴断裂带与丽水—余姚断裂带之间)是浙江省中深变质岩集中出露区,该区变质岩在区域上属于闽浙东部变质岩亚区^[4],在层位上分别归属为八都群和陈蔡群^[5],一般认为八都群形成于古元古代^[5-6],而有关陈蔡群的形成时代则有中元古代、新元古代、早古生代等不同认识^[5,6-10]。陈蔡群主要沿着庆元、龙泉、松阳、陈蔡、上虞一线分布,其中庆元—松阳一带也称“龙泉群”,主体由一套经受绿片岩相—角闪岩相变质的片麻岩、片岩、变粒岩、斜长角闪岩、大理岩、石英岩组成的变质岩系组成,其原岩建造为基—中酸性火山岩、硅质岩、碳质页岩、碳酸盐岩以及砂泥质碎屑岩,但不同地区出露的岩性组合及变质变形特征不尽相同,如庆元、龙泉、上虞等地以云母石英片岩为主,变质程度仅达绿片岩相,而陈蔡地区以长英质粒岩类及斜长角闪岩组合为主,变质程度通常可达角闪岩相。

有关陈蔡群(包括龙泉群及福建相当层位的马面山群)形成的大地构造环境,不同学者分别从不同方面做了积极探索,积累了丰富资料,并提出了

许多新看法,归结起来主要存在以下3种观点。第一种观点认为形成于陆内,与板块裂解作用有关,如水涛等^[11-12]、胡雄健等^[6]、李武显等^[13]、靳松等^[14]、Shu et al.^[8]将之与新元古代Rodinia超大陆裂解相联系,认为是超级地幔柱作用的结果。第二种观点认为陈蔡群分别形成于不同的环境,如孔祥生等^[7]认为其主体形成于岛弧环境,但也存在洋岛—海山组合;叶瑛等^[15]识别出陈蔡群中存在正、副两类斜长角闪岩,认为正岩系斜长角闪岩原岩为大洋玄武岩,地球化学特征与MORB类似,而副岩系的原岩形成于活动大陆边缘或岛弧环境;陈绍海等^[16]根据陈蔡群中斜长角闪岩的稀土元素配分具LREE富集特征以及微量元素蛛网图的斜率和Nb、Ta异常情况以及Zr—TiO₂相关性,认为斜长角闪岩主要分为岛弧和洋岛2种类型,并进一步认为陈蔡群的原岩形成于洋内俯冲和洋陆俯冲的环境。第三种观点认为陈蔡群变质岩为一套碰撞混杂岩和变质混杂岩,前者以郭令智等^[17]、汪新等^[18]为代表,他们提出上虞—政和—大浦—海丰深大断裂带是加里东期的俯冲—碰撞带,认为原划为龙泉群及八都群汤源组变质岩为碰撞混杂岩,由外来岩块、原地岩块和基质组成;后者以程海^[19]为代表,认为陈蔡变质混杂岩的物质来源很可能是浙西北岛弧,并提出新元古代中期陆—弧—陆(江南陆块—浙西北岛弧—浙东南陆块)碰撞造山模式。此外,Zhao et al.^[10]最近的研究则认为

陈蔡群可能形成于古生代陆缘弧环境,代表古生代洋壳残片的石榴斜长角闪岩及成熟的弧根高铝和低铝的铁镁质岩石提供了关键证据。

为进一步厘定陈蔡群的构造属性,深化对华南前泥盆纪大地构造格架及演化的认识,笔者等近年来在搜集前人资料的基础上,对出露于浙江中部原定为陈蔡群的变质岩进行了反复实地考察研究,通过地质、岩石、地球化学、年代学等多种手段从中发现了大量具有洋壳构造属性的变质基性火山岩,它们呈条带状、透镜状产于庆元—上虞一带的陈蔡群

变质岩中,其中洋内弧型变基性火山岩属首次发现,这一发现结合 Zhao et al.^[10]的研究,表明陈蔡群极有可能为含有古大洋地壳残片的俯冲增生杂岩,而不是华夏古陆块的基底。因此,前人依据成层有序的叠置方法所命名的“陈蔡群”已不能客观反映该地质体的特点,为此本文建议将原陈蔡群更名为“陈蔡俯冲增生杂岩”,简称为“陈蔡增生杂岩”。

1 地质背景

研究区(图1)以出露“一老一新”地质体为特

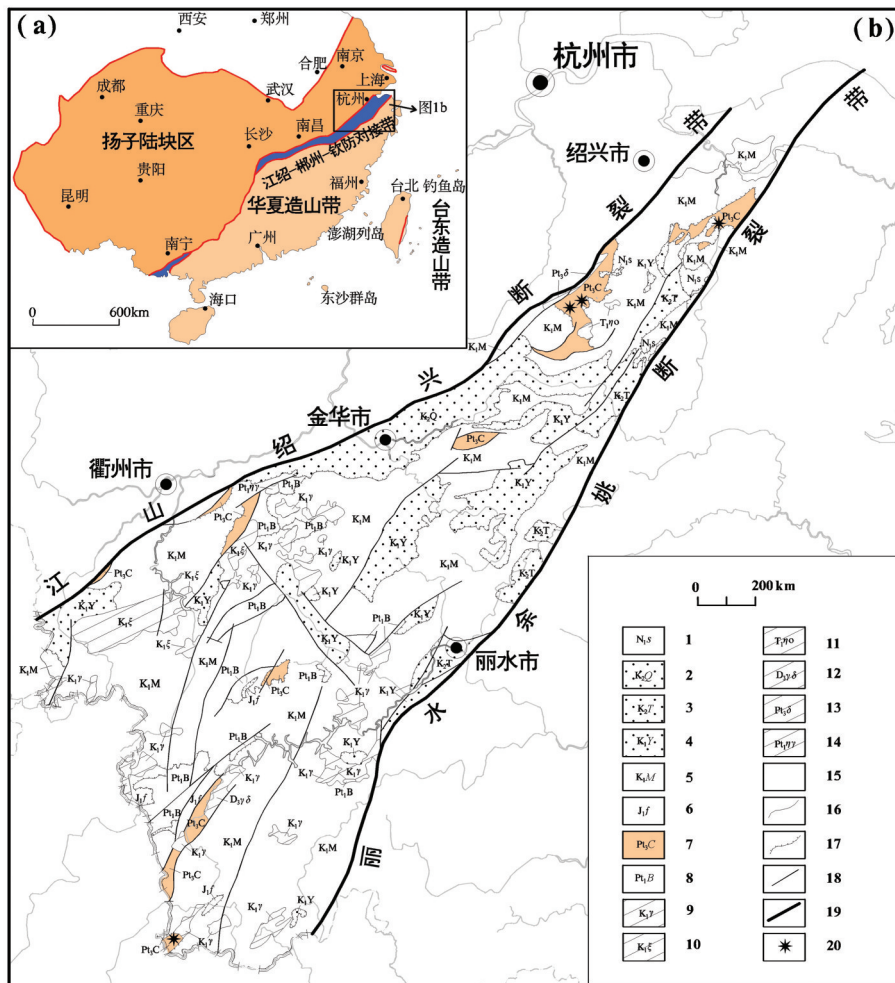


图1 研究区区域地质图

- 1—嵊县组;2—衢江群;3—天台群;4—永康群;5—磨石山群;6—枫坪组;7—陈蔡增生杂岩;8—八都岩群;9—早白垩世花岗岩;
- 10—早白垩世正长岩;11—早三叠世石英二长岩;12—早泥盆世花岗闪长岩;13—新元古代闪长岩;14—古元古代二长花岗岩;
- 15—镁铁—超镁铁质岩;16—地质界线;17—不整合界线;18—一般性断裂;19—深大断裂;20—采样位置

Fig. 1 Regional geological map of the study area

- 1—Shenxian Formation;2—Qujiang Group;3—Tiantai Group;4—Yongkan Group;5—Moshishan Group;6—Fengping Formation;7—Chencai accretion complex;8—Badu Group;9—Early Cretaceous granite;10—Early Triassic quartz monzonite;12—Early Devonian granodiorite;13—Neoproterozoic diorite;14—Paleoproterozoic monzonitic granite;15—Mafic-ultramafic rocks;16—Geological boundary;
- 17—Unconformity boundary;18—General fracture;19—Deep fracture;20—Sampling location

色。老的基底变质岩系包括八都岩群、陈蔡增生杂岩,呈北东向断块状展布,普遍由绿片岩相一角闪岩相片麻岩、片岩、变粒岩、角闪质岩、大理岩、石英岩等区域变质岩类组成,岩石局部具有较强的混合岩化,岩石中普遍发育韧性构造变形,岩石具有复杂的年龄构成。在这些变质岩中常常相伴发育各类变质变形侵入体,常见的为变质超镁铁-镁铁质岩类和变质花岗岩类。老的变质岩系周围被大面积白垩纪火山岩覆盖,并被同期深成岩侵入,火山岩地层主要归属磨石山群和永康群。区域构造线主要呈北东向展布,局部有北西向和东西向构造形迹。

本文发现的“洋内弧”型变质火山岩主要分布于庆元隆宫、诸暨陈蔡、上虞章镇等地,原岩岩性为基性火山岩,经过角闪岩相变质,岩性已转变为斜长角闪岩、角闪岩,其层位归属相当于《浙江省岩石地层》^[9]中的陈蔡群(本文称陈蔡增生杂岩)。野外露头上,变质的斜长角闪岩和角闪岩呈大小不等的岩块赋存于斜长石石英粒岩和黑云斜长片麻岩等长英质基质中(图2-a、b),斜长角闪岩有时呈较小的独立岩块产出(图2-a),有时与角闪岩共生产出(图2-b),两者渐变过渡,边部可见韧性变形改造,形成初糜棱岩(图2-c)。各岩块与长英质围岩均呈构造接触,接触处围岩强烈变形,变形的面理与接触面平行(图2-d)。各样品采样位置见图1。

变基性火山岩岩性主要为斜长角闪岩和角闪岩,岩石呈暗绿色-深黑绿色。两者常呈条带状、条纹状交替产出。显微镜下角闪岩显示镶嵌粒状变晶结构(图2-e),斜长石与角闪石矿物颗粒之间的两面角呈120°接触,显示两者在变质作用过程中达平衡状态。斜长角闪岩则主要为粒状变晶结构(图2-f)。岩石矿物成分主要由角闪石和斜长石组成,角闪岩中角闪石含量可高达90%,有的含有少量辉石,斜长角闪岩中角闪石、斜长石含量相当,矿物自形程度从半自形-他形。矿物粒度细小,一般0.2~0.5 mm,角闪岩较斜长角闪岩矿物粒度稍大,岩石呈定向构造-块状构造。岩石局部有较强蚀变,主要为绿泥石化、绢云母化。

2 分析方法与结果

样品主要在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室分析完成,主量元素含量

采用湿化学方法获得,全岩微量元素分析仪器为Agilent 7500a/7700x型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度优于5%~10%,具体样品制备、分析方法、流程参考Liu et al.^[20]。少数样品在中国地震局地壳动力学重点实验室分析完成,主量元素在Panalytical Axios X荧光光谱仪上分析,微量元素分析仪器为Thermo X-series II ICP-MS,测试时内标为Rh和Re,测试数据误差RSD≤5%。样品的主量元素和微量元素分析结果列于表1。

2.1 岩石系列

对于变质岩来说,由于岩石经历变质作用改造,一些活动性元素(如大部分主量元素和大离子亲石元素)可能会发生迁移,这些元素的含量变化也许不能代表原岩岩浆成分,而微量元素Y、Zr、Nb、V、Cr、Co、Ni、REEs、Th及Ta则相对稳定^[22],特别是过渡金属元素Ti、V、Ni、Cr、Co、Cu、Zn、Fe、Mn及Mg等在中等至高级变质作用中也能保持较小的活跃程度^[23]。所以以下本文主要依据上述相对稳定的元素进行岩石系列、成因及构造环境的讨论。

由岩浆岩的碱性指数Nb/Y比值来看,上虞章镇地区的一个样品具有最高的Nb/Y比值,其值达到0.17,而陈蔡地区的样品除一个样品为0.1外,其他均集中在0.039~0.057,庆元地区的样品Nb/Y比值集中于0.044~0.049,说明章镇地区岩石的碱性程度较陈蔡、庆元两地略大。在Winchester and Floyd^[24]的Zr/TiO₂-Nb/Y分类图上(图3-a),上述3个地区所有样品均落入亚碱性玄武岩区。在Pearce^[25]的Th/Yb-Ta/Yb判别图(图3-b)上,庆元地区的样品投点均落入钙碱性系列区,陈蔡地区的一部分样品落入拉斑玄武岩系列区,另一部分与章镇的一个样品投在钙碱性与拉斑系列过渡区。总之,上述图解判别表明,该类变基性火山岩原岩可能既有钙碱性系列玄武岩也有拉斑系列玄武岩。

2.2 主量元素

该类变基性火山岩SiO₂含量介于42.53%~50.42%,平均为48.57%;TiO₂含量较低,介于0.28%~1.43%,平均为0.60%,其中庆元地区样品的TiO₂含量平均为0.34%,明显低于陈蔡、上虞两地(平均分别为0.85和0.99)的样品;样品Al₂O₃含量介于3.22%~13.07%,平均为10.89%,少数样品Al₂O₃含量明显偏低;ΣFe₂O₃含量变化于8.65%~

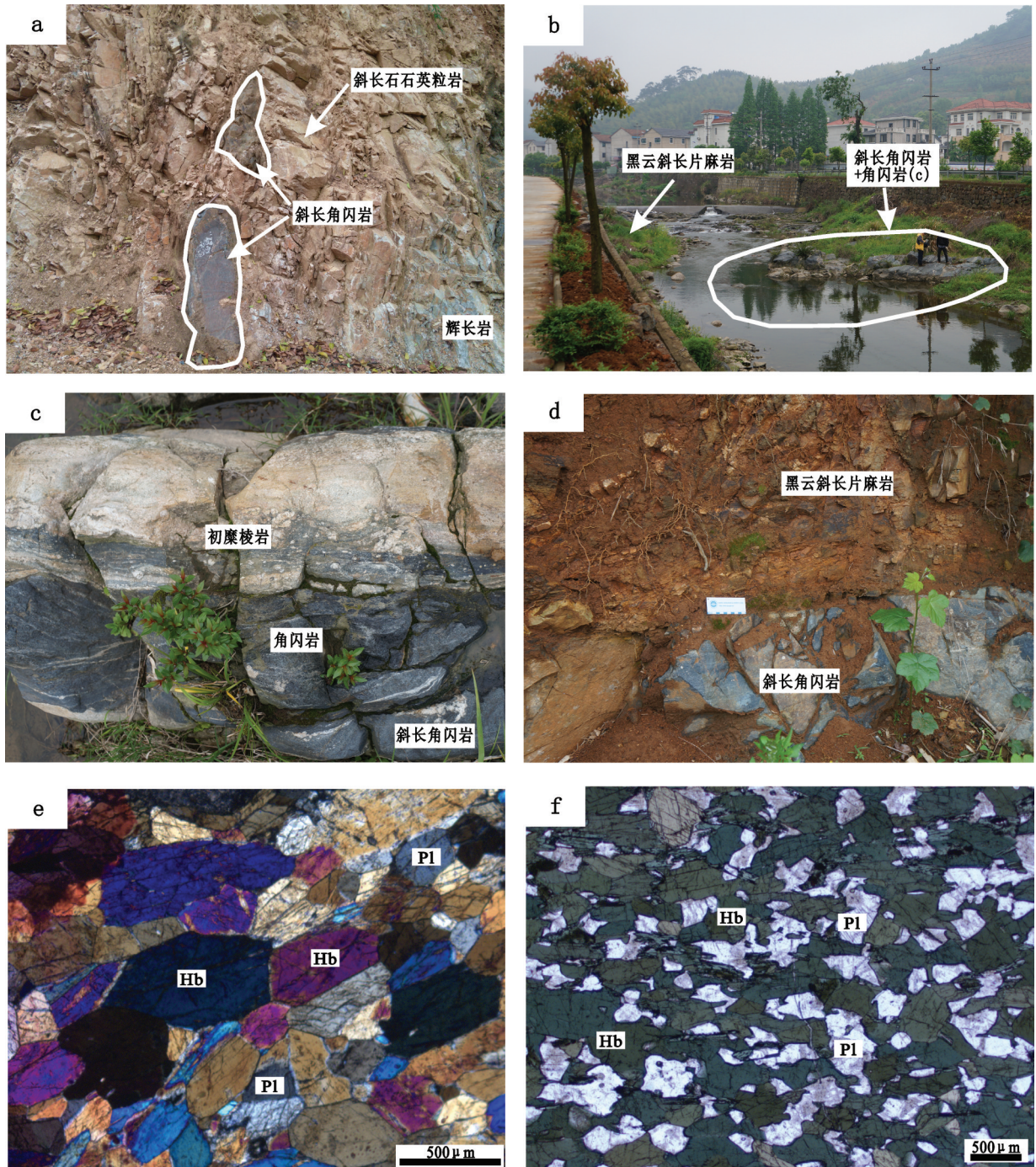


图2 陈蔡地区洋内弧型变基性火山岩野外露头及显微照片

a—斜长角闪岩呈岩块状产于斜长石石英粒岩中;b—斜长角闪岩与角闪岩呈岩块状赋存于黑云斜长片麻岩中;
c—斜长角闪岩与角闪岩呈渐变过渡,两者边界处为初糜棱岩;d—斜长角闪岩与黑云斜长片麻岩呈构造接触;e—角闪岩;
f—斜长角闪岩;Hb—角闪石;Pl—斜长石

Fig.2 Outcrops and microphotographs of the intra-oceanic arc type metabasic-volcanics in Chencai area
a—Amphibolite blocks occurring in plagioclase quartz fels;b—Block consisting of amphibolite and hornblende occurring in biotite plagioclase gneiss;c—Gradual contact relation between amphibolite and hornblende, the protomylonite lies on their boundary;d—Structural contact relation between amphibolite and biotite plagioclase gneiss;e—Hornblende;f— Amphibolite; Hb— Hornblende; Pl— Plagioclase

表 1 研究区变基性火山岩的主要元素(%)和微量元素(10^{-4})分析结果
 Table 1 Major elements(%) and trace elements(10^{-4}) analytical data of the metabasic-volcanics in the study area

分析项目	斜长角闪岩				辉石角闪岩				角闪岩					安山玄武岩	
	上虞章镇 ZZ01*	陈蔡峡山 XS01*	陈蔡高大 GD01*	陈蔡鲁村 FA01	FA02	FA03	FA03	FA03	庆元源头 YT01	YT02	YT03	YT04	YT05		庆元山丘 SQ01
SiO ₂	50.42	47.86	42.53	50.08	46.91	51.06	51.06	51.06	49.04	48.71	49.67	49.45	48.85	48.25	50.55
TiO ₂	0.99	0.72	1.43	0.35	1.36	0.37	0.37	0.33	0.33	0.31	0.31	0.35	0.41	0.28	1.05
Al ₂ O ₃	10.94	12.65	12.62	3.22	14.55	3.65	3.65	12.19	12.61	11.97	13.07	13.07	12.04	11.18	15.01
∑Fe ₂ O ₃	11.24	16.28	21.12	14.68	15.64	15.15	15.15	9.94	9.90	9.78	9.30	9.30	9.51	8.65	11.54
MnO	0.28	0.26	0.25	0.25	0.18	0.24	0.24	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.26	0.17
MgO	9.45	7.14	7.51	13.53	6.25	14.61	14.61	12.57	12.14	12.74	12.09	12.09	13.68	11.43	7.33
CaO	9.55	7.88	10.09	13.94	9.42	12.32	12.32	10.42	10.52	9.71	9.73	9.73	10.61	14.09	11.74
Na ₂ O	0.57	2.61	1.64	0.47	3.09	0.54	0.54	2.18	2.06	2.35	2.34	2.34	1.73	1.10	2.34
K ₂ O	3.53	2.75	2.16	0.12	0.71	0.13	0.13	0.63	0.75	0.55	0.82	0.77	0.77	1.85	0.17
P ₂ O ₅	0.12	0.06	0.00	0.02	0.15	0.02	0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.09
LOI	2.73	1.61	0.44	2.74	1.28	1.60	1.60	1.90	2.22	2.10	2.16	2.16	2.22	2.22	0.09
Total	99.81	99.83	99.80	99.40	99.54	99.69	99.69	99.41	99.46	99.38	99.50	99.50	100.03	99.35	100.00
Na ₂ O/K ₂ O	0.16	0.95	0.76	3.92	4.35	4.15	4.15	3.46	2.75	4.27	2.85	2.85	2.25	0.59	18.23
Mg#	65.15	49.36	44.14	67.19	47.03	68.18	68.18	73.75	73.15	74.32	74.29	74.29	76.17	74.60	58.21
La	3.79	3.02	0.86	1.87	9.77	1.09	1.09	2.55	2.64	2.29	2.49	2.49	2.06	1.87	2.04
Ce	9.95	6.15	2.06	4.12	25.3	2.45	2.45	4.94	5.25	4.69	4.74	4.74	4.12	3.90	5.80
Pr	1.44	0.79	0.32	0.57	3.57	0.37	0.37	0.75	0.79	0.69	0.76	0.76	0.62	0.53	0.98
Nd	7.67	3.98	1.94	2.79	16.5	1.91	1.91	3.63	3.69	3.26	3.62	3.62	3.03	2.52	5.57
Sm	2.41	1.55	0.88	1.11	3.93	0.84	0.84	1.05	1.13	1.01	1.13	1.13	0.94	0.81	2.21
Eu	1.06	0.79	0.52	0.34	1.38	0.26	0.26	0.34	0.39	0.35	0.36	0.36	0.32	0.26	0.86
Gd	3.06	2.78	1.43	1.75	4.45	1.54	1.54	1.32	1.29	1.21	1.36	1.36	1.22	1.08	3.37
Tb	0.53	0.59	0.29	0.36	0.72	0.31	0.31	0.24	0.24	0.22	0.24	0.24	0.22	0.20	0.66
Dy	3.17	4.05	2.29	2.46	4.77	2.31	2.31	1.58	1.64	1.46	1.64	1.64	1.45	1.37	4.58
Ho	0.75	1.05	0.48	0.54	0.93	0.49	0.49	0.34	0.37	0.32	0.34	0.34	0.30	0.28	1.03
Er	1.95	3.51	1.51	1.53	2.74	1.44	1.44	1.01	1.16	1.00	1.12	1.12	0.96	0.86	3.01
Tm	0.31	0.52	0.21	0.24	0.40	0.20	0.20	0.17	0.18	0.15	0.17	0.17	0.16	0.13	0.46
Yb	2.13	3.56	1.40	1.52	2.63	1.33	1.33	1.08	1.25	1.05	1.21	1.21	1.09	0.90	2.97
Lu	0.30	0.53	0.21	0.23	0.40	0.19	0.19	0.18	0.19	0.15	0.19	0.19	0.17	0.15	0.47

续表1

分析项目	斜长角闪岩				辉石角闪岩				角闪岩				安山玄武岩	
	上虞章镇 ZZ01*	陈蔡峨山 XS01*	陈蔡高大 GD01*	陈蔡鲁村 FA02	FA01	FA03	YT01	YT02	YT03	YT04	YT05	庆元山丘 SQ01	Mariana FAB*	
ΣREE	38.5	32.3	14.4	77.5	19.4	14.7	19.2	20.2	17.9	19.4	16.7	14.9	34.0	
LREE/HREE	2.16	0.98	0.84	3.55	1.25	0.88	2.24	2.20	2.21	2.09	1.99	2.00	1.06	
(La/Yb) _N	1.27	0.61	0.44	2.67	0.88	0.59	1.69	1.52	1.56	1.47	1.36	1.49	0.49	
δEu	1.19	1.15	1.40	1.00	0.74	0.68	0.89	0.99	0.96	0.89	0.91	0.87	0.97	
δCe	1.05	0.95	0.95	1.05	0.97	0.94	0.87	0.88	0.91	0.84	0.89	0.95	1.00	
V	261	3621	10871	389	409	403	228	232	222	222	196	200	381	
Cr	147	108	36.5	40.0	308	294	1201	1040	1232	873	1048	1207	273	
Ni	78.8	75.6	94.8	67.2	217	254	339	305	346	264	328	430	95.8	
Co	39.3	54.0	78.4	57.3	76.5	83.1	55.1	55.6	57.7	53.9	54.3	46.2	4.93	
Rb	102	32.5	34.8	13.9	1.42	1.45	42.8	55.9	32.8	56.3	61.3	189	11.5	
Ba	851	465	187	128	6.18	5.24	169	170	143	259	182	71.0	0.16	
Th	0.59	0.55	0.18	0.74	0.49	0.24	0.55	0.63	0.57	0.50	0.48	0.51	0.10	
U	0.80	0.20	0.058	3.91	1.46	1.28	0.17	0.19	0.16	0.16	0.14	0.25	1.91	
Nb	2.88	1.46	0.47	2.74	0.57	0.63	0.45	0.45	0.41	0.47	0.43	0.35	71.0	
Sr	99.6	168	155	238	18.3	15.4	220	226	196	251	178	320	51.6	
Zr	58.0	40.2	14.2	48.0	16.0	10.5	15.3	15.1	14.1	14.5	12.9	10.9	1.57	
Hf	1.65	1.27	0.53	1.45	0.59	0.41	0.51	0.50	0.48	0.50	0.42	0.39	27.0	
Y	17.3	25.5	11.0	27.2	14.8	13.1	9.54	10.2	8.94	10.1	8.68	7.64	0.13	
Ta	0.18	0.12	0.046	0.16	0.052	0.035	0.028	0.030	0.021	0.024	0.024	0.023	16.4	
Pb	7.48	29.1	18.0	3.91	1.46	1.28	10.5	11.7	9.16	12.8	8.81	18.3	0.076	
Ti/V	22.9	11.9	7.90	21.0	5.13	5.50	8.66	8.52	8.37	9.46	12.6	8.39	1.31	
Ta/Hf	0.11	0.093	0.086	0.11	0.089	0.085	0.055	0.060	0.043	0.048	0.057	0.058	0.036	
Th/Ta	3.34	4.68	4.00	4.68	9.30	7.01	19.6	20.7	27.9	21.1	20.0	22.8	0.085	
Nb/Zr	0.050	0.036	0.033	0.057	0.036	0.060	0.029	0.030	0.029	0.032	0.033	0.032	1.12	
Th/Nb	0.20	0.38	0.39	0.27	0.85	0.39	1.22	1.38	1.40	1.07	1.11	1.47	0.62	
La/Nb	1.31	2.08	1.82	3.57	3.28	1.73	5.68	5.82	5.58	5.36	4.80	5.34	0.57	
Nb/Yb	1.35	0.41	0.34	1.04	0.38	0.47	0.41	0.36	0.39	0.38	0.39	0.39	0.052	
Th/Yb	0.28	0.16	0.13	0.28	0.32	0.18	0.51	0.50	0.55	0.41	0.44	0.57	0.069	
Nb/Y	0.17	0.057	0.043	0.10	0.039	0.048	0.047	0.044	0.046	0.046	0.049	0.046		

注:表中样号带“*”的由中国地震局地壳动力学重点实验室分析完成,样号带“**”为Mariana 10个安山玄武岩样品平均值,数据参考[21],其余样品由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室分析完成。

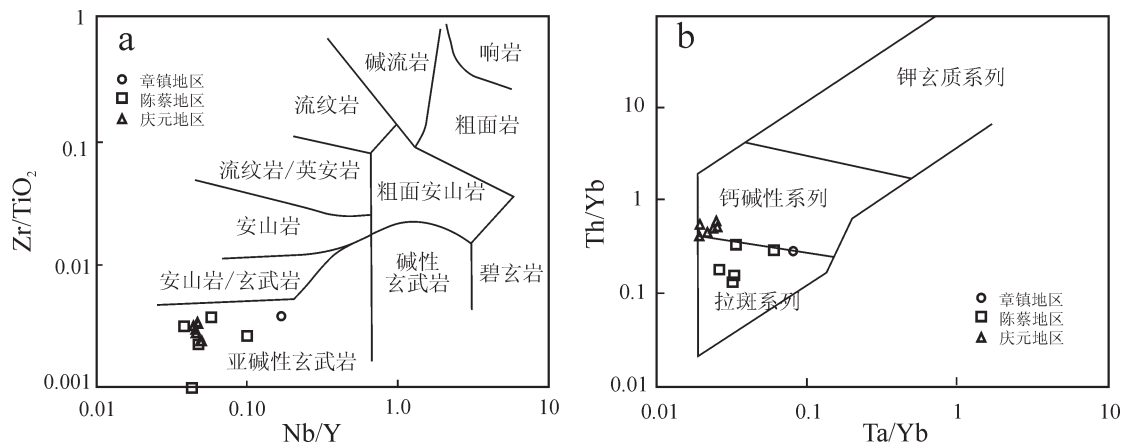


图3 变基性火山岩岩石分类图解(a据[24];b据[25])

Fig.3 Classification of metabasic volcanics(a after reference [24];b after reference [25])

21.12%, 平均为 12.60%; MgO 含量普遍较高, 变化于 6.25% ~ 14.61%, 多数 > 8%, 平均为 11.10%, 相当于高镁玄武岩; $Mg^\#$ 变化于 44.14 ~ 76.17, 平均为 65.61, 其中庆元地区的样品 ($Mg^\#$ 平均为 74.38) 又明显高于陈蔡、章镇两地 ($Mg^\#$ 平均分别为 55.18 和 65.15); 样品 Na_2O+K_2O 含量变化于 0.59% ~ 5.37%, 平均为 2.96%, Na_2O/K_2O 为 0.16 ~ 4.35, 平均为 2.54, 总体以富钠质岩系为主。主量元素特征显示, 庆元地区与陈蔡、章镇两地略有差异, 前者较后者更富镁、贫钛、贫铁。

2.3 稀土元素

岩石稀土总量较低, ΣREE 变化于 14.41×10^{-6} ~ 77.45×10^{-6} , 平均为 25.46×10^{-6} , 低于其他环境下的玄武岩, 而与洋中脊拉斑玄武岩更为接近。轻重稀土含

量相差不大, 轻稀土略微富集, LREE/HREE 介于 0.84 ~ 3.55, 平均为 1.87, 球粒陨石标准化^[26] $(La/Yb)_N$ 介于 0.44 ~ 2.67, 平均为 1.30; 铈呈弱负-弱正异常, δEu 介于 0.68 ~ 1.40, 平均为 0.97, 显示该类变基性火山岩在岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用总体不明显。

在球粒陨石标准化配分模式图(图4-a)上, 与 N-MORB 及 T-MORB 表现类似, 其中庆元地区的样品稀土曲线呈特征的 U 型分布, 显示中稀土亏损, 这与典型玻安质岩石相似。

2.4 微量元素

岩石中相容元素 Cr、Ni 含量较高, 平均分别可达 628×10^{-6} 和 233×10^{-6} , 庆元地区尤其高。高场强元素 (HFSE) Zr、Hf、Nb、Ta 含量分别为 10.9×10^{-6} ~

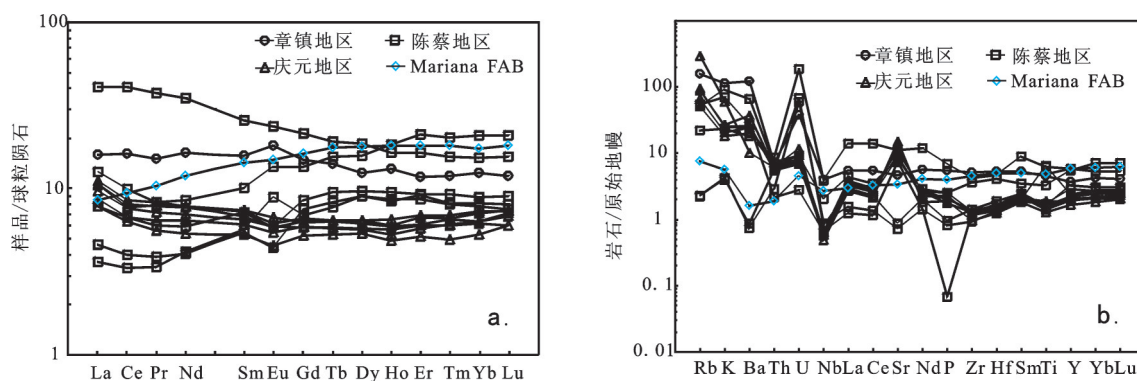


图4 研究区变基性火山岩稀土元素配分模式图和微量元素比值蛛网图

(a 据[26];b 据[28])

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns and MORB-normalized incompatible element spidergrams of the metabasic volcanic rocks in the study area(a after reference [26];b after reference [28])

58.0×10^{-6} (平均为 22.5×10^{-6})、 $0.39 \times 10^{-6} \sim 1.65 \times 10^{-6}$ (平均为 0.72×10^{-6})、 $0.35 \times 10^{-6} \sim 2.88 \times 10^{-6}$ (平均为 0.94×10^{-6})、 $0.021 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ (平均为 0.061×10^{-6})，均低于标准洋脊玄武岩，而接近弧玄武岩，表明其岩浆源区有俯冲板片脱水流体输入。岩石中 Th 含量多数大于 0.3×10^{-6} ，高于 MORB ($0.2 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$)，Th 一般富集于沉积物中，高 Th 含量表明其岩浆源区受到俯冲板片表层沉积物的影响。岩石的 Ti/V 值多数小于 20，平均 10.61，普遍低于 MORB (Ti/V 一般大于 20)。岩石 Ta/Hf (多数 < 0.1)、Th/Ta (> 3)、Nb/Zr ($0.029 \sim 0.060$)、Th/Nb ($0.2 \sim 1.47$)、La/Nb (多数 > 2) 等比值均与板块汇聚边缘弧玄武岩表现一致，而不同于板块发散边缘及板内玄武岩^[27]。这些微量元素含量特征又表明该类变基性火山岩主要形成于板块俯冲的构造环境。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图^[28] (图 4-b) 上，呈现出典型的选择性富集隆凹曲线型式，大离子亲石元素 (LILE) K、Rb、Ba、U 强烈富集，高场强元素 Nb、Zr、P、Ti 亏损。虽然各样品曲线型式不完全一致，但主要微量元素的分布趋势与 Mariana 前弧玄武岩较为相似^[21]。

3 讨论与结论

上述一套高镁、镉、镍、低钛、稀土总量的变基性火山岩在地球化学特征上与玻安质岩石十分类似。由于这些岩石的 SiO_2 含量均处于基性岩范围，所以张旗先生又称之为“玻玄武岩”^[29]。玻安质岩石因最先发现于 Bonin 群岛而得名，目前研究认为，玻安质岩石

是由高度亏损的大洋岩石圈地幔橄榄岩在有互不相容元素的流体参与时低压高温条件下高程度部分熔融形成^[30-32]，它一般形成于板块汇聚边缘的 SSZ 带的弧前环境，并与洋内消减作用有关^[33-34]。

在 Pearce^[35] 最近用来区分不同类型蛇绿岩的构造环境判别图解 Th/Yb-Nb/Yb 上 (图 5-a)，投点均位于大洋岛弧区及其附近。在 V-Ti 图解 (图 5-b) 上，投点也大多数落入玻安质岩区，部分分散在 IAT 和 MORB 区。

近年来随着深海钻探和地球物理研究进展，对西太平洋，特别是 Izu-Bonin-Mariana 洋内弧资料的积累，建立了俯冲带的岩浆演化过程^[36]：初期俯冲作用形成的前弧玄武岩之后，产生了玻安岩和拉斑质到钙-碱质熔岩 (图 6)。在这套岩浆序列中，前弧玄武岩的地球化学特征与本文中的斜长角闪岩-角闪岩十分相似，结合区内其他地区新元古代岩浆弧的岩石类型^[37-38]，大致可建立前弧玄武岩、高镁安山岩-富铌玄武岩、拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩的岩石组合，反映出从大洋型初始弧到“大陆弧”的演化过程^[39]，所以笔者推测变质基性火山岩的原岩属于洋内弧早期形成的玄武岩，其主要特征是大部分微量元素与 MORB 一致，但 Nb、Ta 不同程度亏损，有些文献中称为类洋中脊玄武岩 (MORB-Like)。

洋内弧玄武岩本是形成于大洋地壳之中，但是由于大洋的俯冲消减作用，大洋地壳物质绝大部分会被运移到俯冲带深部进入地幔之中，而有少量由于俯冲带上覆板片的刮削作用会逐渐拼贴到俯冲带前缘的增生杂岩带中。所以该洋内弧洋壳残片

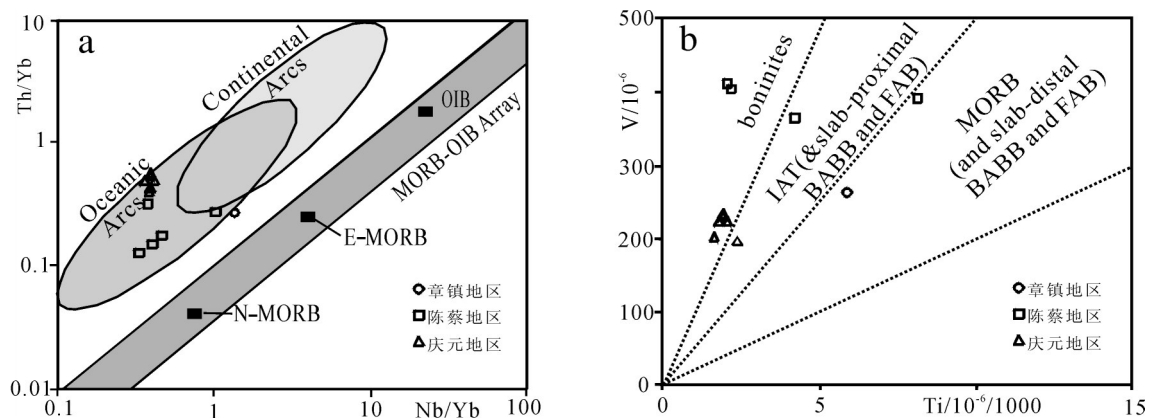


图5 变基性火山岩构造环境判别图解 (据[33])

Fig.5 Tectonic discriminant diagrams for metabasic-volcanics (after reference [33])



图6 Izu-Bonin-Mariana 前弧岩石圈剖面(据[36]修改)
Fig. 6 Schematic stratigraphic section of the Izu-Bonin-Mariana (IBM) forearc lithosphere(modified after reference [36])

的发现说明原定陈蔡群极可能为一套俯冲增生杂岩,而非前人认为的属于大陆裂谷或者某一单一构造背景下的产物。籍于此本文建议将陈蔡群更名为“陈蔡俯冲增生杂岩”,简称“陈蔡增生杂岩”,以利于今后进一步研究、讨论。

至于这套变基性火山岩的原岩成岩时代,目前尚缺乏精确、可靠的同位素年龄约束。Shu et al.^[8]曾在诸暨陈蔡镇北侧测得与大理岩呈互层状的“洋岛型”变玄武岩的锆石 SHRIMP 年龄为(857±7) Ma。高林志等^[9]在诸暨孝四及下吴宅两地获得含榴黑云斜长片麻岩与含榴矽线黑云斜长片麻岩的 SHRIMP 锆石年龄分别为(845±9) Ma 和(848±10) Ma。Zhao et al.^[10]在陈蔡下吴宅一带获得一套铁镁

质岩石的岩浆年龄及变质年龄的范围在 422~449 Ma。胡艳华等^[40]认为诸暨陈蔡群主变质期年龄为 435 Ma。由此可见,本文研究的具有“洋内弧”特征的变基性火山岩的原岩形成年龄应不晚于 420 Ma,可能为新元古代中期至早古生代古大洋板块岩浆活动的产物。

综上所述,在浙江中部地区原定为陈蔡群的变质岩中存在一类特殊的变质基性火山岩,其岩性主要由斜长角闪岩、角闪岩组成,两者常交替共生产出,但在露头上一般规模不大,延伸有限,呈大小不等的岩块赋存于黑云母斜长石石英粒岩和黑云斜长片麻岩中,接触处常见韧性变形。该类变质基性火山岩在岩石化学分类上属拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩,但具有较为特殊的地球化学特征,如低 Ti 高 Mg,低的 Σ REE、N-MORB 及 T-MORB 的稀土配分模式,显示出与一般的构造环境下产出的玄武岩明显不同,而近似玻安质岩石的地球化学特征,并且该岩石富集大离子亲石元素(LILE)、亏损高场强元素(HFSE),与一般岛弧玄武岩相似,在微量元素构造环境判别图解中,投点结果指向大洋岛弧区。上述特殊的地球化学特征与 Izu-Bonin-Mariana 洋内弧早期形成的玄武岩十分相似。洋内弧变基性火山岩的发现表明原定的陈蔡群极可能为一套俯冲增生杂岩,因此陈蔡群应更名为“陈蔡增生杂岩”。结合区内其他岩石的高精度年龄判断,该套洋内弧变基性火山岩极可能为新元古代中期至早古生代岩浆活动的产物。

致谢:在野外工作过程中得到了成都地质矿产研究所潘桂棠研究员、南京地质矿产研究所邢光福研究员的悉心指导,天津地质矿产研究所陆松年研究员不仅在野外给予指导,并在论文撰写过程中提出诸多宝贵意见,作者在此对以上诸位老师的关心和帮助深表感谢!

参考文献(References):

- [1] 张克信,潘桂棠,何卫红,等. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(2): 206-233.
Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, et al. New division of tectonic-Strata superregion in China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(2): 206-233(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.

- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1–28(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘训, 游国庆. 中国的板块构造区划[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 1–17.
- Liu Xun, You Guoqing. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 1–17(in Chinese with English abstract).
- [4] 董申保, 沈其韩, 孙大中, 等. 《中国变质地质图(1:400万)》说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1–36.
- Dong Shenbao, Shen Qihan, Sun Dazhong, et al. Instructions for China Metamorphic Geological Map of 1:4000000[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 1–36(in Chinese with English abstract).
- [5] 浙江省地质矿产局. 浙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1–236.
- Zhejiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Stratigraphy (Lithostratic) of Zhejiang Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 1–236(in Chinese with English abstract).
- [6] 胡雄健, 徐金坤, 童朝旭, 等. 浙西南前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1–278.
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Chaoxu, et al. The Precambrian Geology of Southwestern Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1–278(in Chinese with English abstract).
- [7] 孔祥生, 李志飞, 冯长根, 等. 浙江陈蔡地区前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1–119.
- Kong Xiangshen, Li Zhifei, Fengchanggen, et al. The Precambrian Geology of Chencai Region in Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1–119(in Chinese with English abstract).
- [8] Shu L S, F M, Yu J H, et al. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block: New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2011, (187): 263–276.
- [9] 高林志, 丁孝忠, 刘燕学, 等. 江山—绍兴断裂带陈蔡岩群片麻岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(5): 641–648.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating of Neoproterozoic Chencai Complex in Jiangshan–Shaoxing fault zone and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(5): 641–648(in Chinese with English abstract).
- [10] Zhao L, Zhai M G, Zhou X W, et al. Geochronology and geochemistry of a suite of mafic rocks in Chencai area, South China: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 2015, 236–237: 226–244.
- [11] 水涛. 中国东南边缘大陆古基底构造演化[J]. *科技通报*, 1987, 3(5): 32–34.
- Shui Tao. Tectonic evolution of the continental basement of Southeast China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1987, 3(5): 32–34(in Chinese with English abstract).
- [12] 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: 1–85.
- Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua, et al. *Geology for the Metamorphic Basement of Zhejiang and Fujian Province in China*[M]. Beijing: Science Press, 1988: 1–85(in Chinese with English abstract).
- [13] Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance [J]. *Precambrian Research*, 2005, (136): 51–66.
- [14] 靳松, 张利, 钟增球, 等. 浙闽地区新元古代变火山岩系岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 97–105.
- Jin Song, Zhang Li, Zhong Zengqiu, et al. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic metavolcanic rocks in Zhejiang and Fujian Provinces and its geological significance[J]. *Mineral. Petrol.*, 2008, 28(1): 97–105(in Chinese with English abstract).
- [15] 叶瑛, 兰玉琦, 沈忠悦. 浙江陈蔡群两类斜长角闪岩的地球化学及原岩构造环境[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1995, (1): 7–12.
- Ye Ying, Lan Yuqi, Shen Zhongyue. Two amphibolite Protolith geochemistry and tectonic environment in Chencai Group of Zhejiang Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1995, (1): 7–12(in Chinese with English abstract).
- [16] 陈绍海, 周新华, 李继亮, 等. 浙江陈蔡群斜长角闪岩的地球化学特征及其大地构造背景探讨[J]. *地质科学*, 1999, 34(2): 154–165.
- Chen Shaohai, Zhou Xinhua, Li Jiliang, et al. Geochemistry of the amphibolites from Chencai Group, Zhejiang Province: implications for the tectonic settings[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(2): 154–165(in Chinese with English abstract).
- [17] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化[C]//国际交流地质文集(1). 北京: 地质出版社, 1980: 109–116.
- Guo Linzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. The geotectonic framework and crustal evolution of South China[C]//Scientific Papers on Geology for International Exchange(1). Beijing: Geological Publishing house, 1980: 109–116(in Chinese with English abstract).
- [18] 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*, 1988, 24(3): 367–378.
- Wang Xin, Yang Shufeng, Shi Jianning, et al. Discovery of collision mélange in Longquan, Zhejiang Province and its significance for the collision orogenic belt in Southeastern China[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences edition)*, 1988, 24(3): 367–378(in Chinese with English abstract).
- [19] 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): 203–213.
- Chen Hai. The late Proterozoic collision orogen in Northwestern Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 1991, 37(3): 203–213

- (in Chinese with English abstract).
- [20] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA- ICP- MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [21] Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, et al. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu- Bonin- Mariana system[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010, 11(3): 1-17.
- [22] Gillis K M, Thompson G. Metabasalts from the Mid- Atlantic Ridge: New insight into hydrothermal systems in slow- spreading crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 113: 502-523.
- [23] Nicollet C, Andriambololona D R. Distribution of transition elements in crustal metabasic igneous rocks[J]. *Chemical Geology*, 1980, 28: 79-90.
- [24] Winchester J, Floyd P. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [25] Pearce J A. Trace element characteristics of lava from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S (ed.). *Andesites. Orogenic Andesites and Related Rocks*. New York. John Wiley and Sons, 1982: 525-548.
- [26] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- [27] 李永军, 李甘雨, 佟丽莉, 等. 玄武岩类形成的大地构造环境 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值对比判别[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(3): 14-21.
- Li Yongjun, Li Ganyu, Tong Lili, et al. Discrimination of ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for tectonic settings in basalts[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(3): 14-21 (in Chinese with English abstract).
- [28] Boyton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [29] 张旗. 玻安岩和玻玄岩地球化学特征和成因的探讨[J]. *地球化学*, 1990, (3): 207-215.
- Zhang Qi. A preliminary study on the geochemistry and origin of boninites and boni- basalts[J]. *Geochemica*, 1990, (3): 207-215 (in Chinese with English abstract).
- [30] Falloon T J, Crawford A J. The petrogenesis of high- calcium boninite lavas dredged from the northern Tonga ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102: 375-394.
- [31] Meijer A. Primitive arc volcanism and a boninite series: Examples from western Pacific island arcs[C]//Hayes D F. *Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asia Seas and Islands*. Am. Geophys. Union Mongogr, 1980, (23): 269-282.
- [32] Sobolev A V, Danyushevsky L V. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of Tonga trench: Constraints on the generation conditions of primary high- Ca boninite magmas[J]. *Petrol.*, 1994, 35: 1183-1208.
- [33] Crawford A J, Falloon T J, Green D H. Classification, progress and tectonics setting of Boninites[C]//Crawford A J, (ed.). *Boninites and Related Rocks*[C]. London: Unwyn Hyman, 1989: 1-49.
- [34] Piercey S J, Murphy D C, Mortensen J K. Boninitic magmatism in a continental margin setting, Yukon- Tanana terrane, south eastern Yukon[J]. *Canada Geology*, 2001, 29(8): 731-734.
- [35] Pearce J A. Immobile element fingerprinting of ophiolites[J]. *Elements*, 2014, 10: 101-108.
- [36] Ishizuka O, Tani K, Reagan M K. Izu- Bonin- Mariana forearc crust as a modern ophiolite analogue[J]. *Elements*, 2014, 10: 115-120.
- [37] 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 等. 江山-绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(7): 994-1008.
- Chen Zhihong, Guo Kunyi, Dong Yongguan, et al. Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan- Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA- ICP- MS U- Pb geochronology and geochemistry[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2009, 52(7): 925-939(in Chinese with English abstract).
- [38] 姜杨, 赵希林, 邢光福, 等. 扬子陆块东南缘浙江金华地区青白口纪晚期岛弧岩浆活动[J]. *地质通报*, 2015, 34(8): 1550-1561.
- Jiang Yang, Zhao Xiling, Xing Guangfu, et al. Arc magmatic activity of Qingbaikou Period along the southeastern margin of Yangtze Block: Implications from the zircon U- Pb age and geochemical characteristics of Nb- enriched gabbro and high- Mg diorite in the Jinhua plutonic complex[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(8): 1550-1561(in Chinese with English abstract).
- [39] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. *地质论评*, 2015, 61(3): 473-484.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, et al. Magmatic arc and ocean- continent transition: Discussion[J]. *Geological Review*, 2015, 61(3): 473-484(in Chinese with English abstract).
- [40] 胡艳华, 顾明光, 徐岩, 等. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(11): 1661-1670.
- Hu Yanhua, Gu Mingguang, Xu Yan, et al. The confirmation of the age of Caledonian Chencai Group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(11): 1661- 1670(in Chinese with English abstract).