浙江龙泉地区变质基性岩年代学、地球化学特征及构造意义

刘远栋[1)]，刘风龙[1)]，张建芳[1)]，李翔[1)]，徐磊[1)]，温旭斌[2)]，倪伟伟[1)]

1）浙江省地质调查院，杭州，311203；2）浙江省工业环保设计研究院有限公司，杭州，311203

内容提要：浙西南龙泉地区集中出露一套中深变质岩系，是华夏地块的重要组成部分，对其形成时代和成岩构造属性等问题历来存在争议。本文通过对龙泉变质岩中变质基性岩的地球化学研究，认为这些岩石的原岩成岩环境至少有两类：Ⅰ类岩石稀土配分曲线、微量元素蛛网图特征均显示与IAB的相似性，微量元素比值和图解判别均指示这套岩石形成于与俯冲有关的岛弧构造环境；Ⅱ类岩石稀土配分曲线和微量元素蛛网图均与OIB有相似性，微量元素比值和图解判别也指示这套岩石形成于与俯冲无关的OIB构造环境。多种不同构造属性的岩石共生，佐证了原龙泉岩群变质岩系为一形成于早古生代的俯冲增生杂岩。变质基性岩锆石U-Pb测年获得其峰期变质时间为404～402Ma。龙泉俯冲增生杂岩的厘定对重新认识丽水-余姚断裂带构造属性、区域构造格架的建立以及进一步分析华夏造山系物质组成与结构提供了新资料。

关键词：变质基性岩；地球化学；俯冲增生杂岩；早古生代；龙泉

浙西南龙泉地区集中出露一定范围的中深变质岩，是华夏地块的重要组成部分，前人将其分别归属为八都岩群和龙泉岩群（胡雄健等，1991）。这套岩石自形成以来遭受了新元古代超大陆拼合裂解事件、奥陶纪—志留纪加里东期事件以及晚二叠世—中三叠世印支期事件（Xiang Hua et al.，2008）等多期次不同程度再造，其物质组成与构造演化史极其复杂，对其研究也历来受国内外地质学者的重视，其研究史可追溯到20世纪60年代。

一般认为八都岩群形成于古元古代，而对龙泉岩群变质岩的形成时代、构造属性等问题则历来存在争议，归纳起来主要有两种观点。第一种观点认为形成于陆内，与板块裂解作用有关（水涛等，1988；Hu Xiongjian et al.，1992；Li Xianhua et al.，2008，2012；Jin Song et al.，2008a，2008b）。第二种观点认为龙泉岩群为一套碰撞混杂岩，如郭令智等（1980）根据野外考察和钻孔资料研究认为其中的镁铁—超镁铁质岩石是蛇绿岩套，代表古俯冲带；Wang Xin et al.（1988）认为其是由浙东南地体和闽西北地体在奥陶纪发生碰撞作用形成的碰撞混杂岩；陈先沛等（1993）通过对龙泉岩群含磁铁石英岩的研究后确证其属混杂岩带中的外来岩块。

近年来，浙江地质调查研究院以最新的板块构造理论和技术方法应用于龙泉地区的地质调查工作中，在此基础上，提出了原龙泉岩群实为一俯冲增生杂岩（以下简称龙泉杂岩）的观点（浙江省地质调查院，2015❶，2016❷），认为其主要由原岩为复理石建造的变质沉积岩基质和多种构造属性的岩块所组成。本文以龙泉俯冲增生杂岩内的变质基性岩岩块为研究对象，分析其原岩属性以及成岩构造环境背景，以期为华夏造山系构造划分和构造演化研究提供资料。

1 地质背景

研究区地处华夏地块东端，位于丽水-余姚断裂带（与福建政和-大浦断裂带相接）内（图1）。区域

注：本文为浙江省基础性公益性战略性地质工作项目（编号［省资］2018007、［省资］2018006）、中国地质调查局项目（编号12120114043101）资助成果。
收稿日期：2020-02-20；改回日期：2020-04-27；网络发表日期：2020-08-31；责任编委：张招崇；责任编辑：周健。
作者简介：刘远栋，男，1986年生。工程师，硕士，主要从事区域地质调查工作。Email：lyd661106@163.com。

引用本文：刘远栋，刘风龙，张建芳，李翔，徐磊，温旭斌，倪伟伟. 2021. 浙江龙泉地区变质基性岩年代学、地球化学特征及构造意义. 地质学报，95(2)：413～426，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020256.
Liu Yuandong，Liu Fenglong，Zhang Jianfang，Li Xiang，Xu Lei，Wen Xubin，Ni Weiwei. 2021. Geochronological and geochemical characteristics of the metamorphic basic rocks and their tectonic implications in the Longquan area，Zhejiang Province. Acta Geologica Sinica，95(2)：413～426.

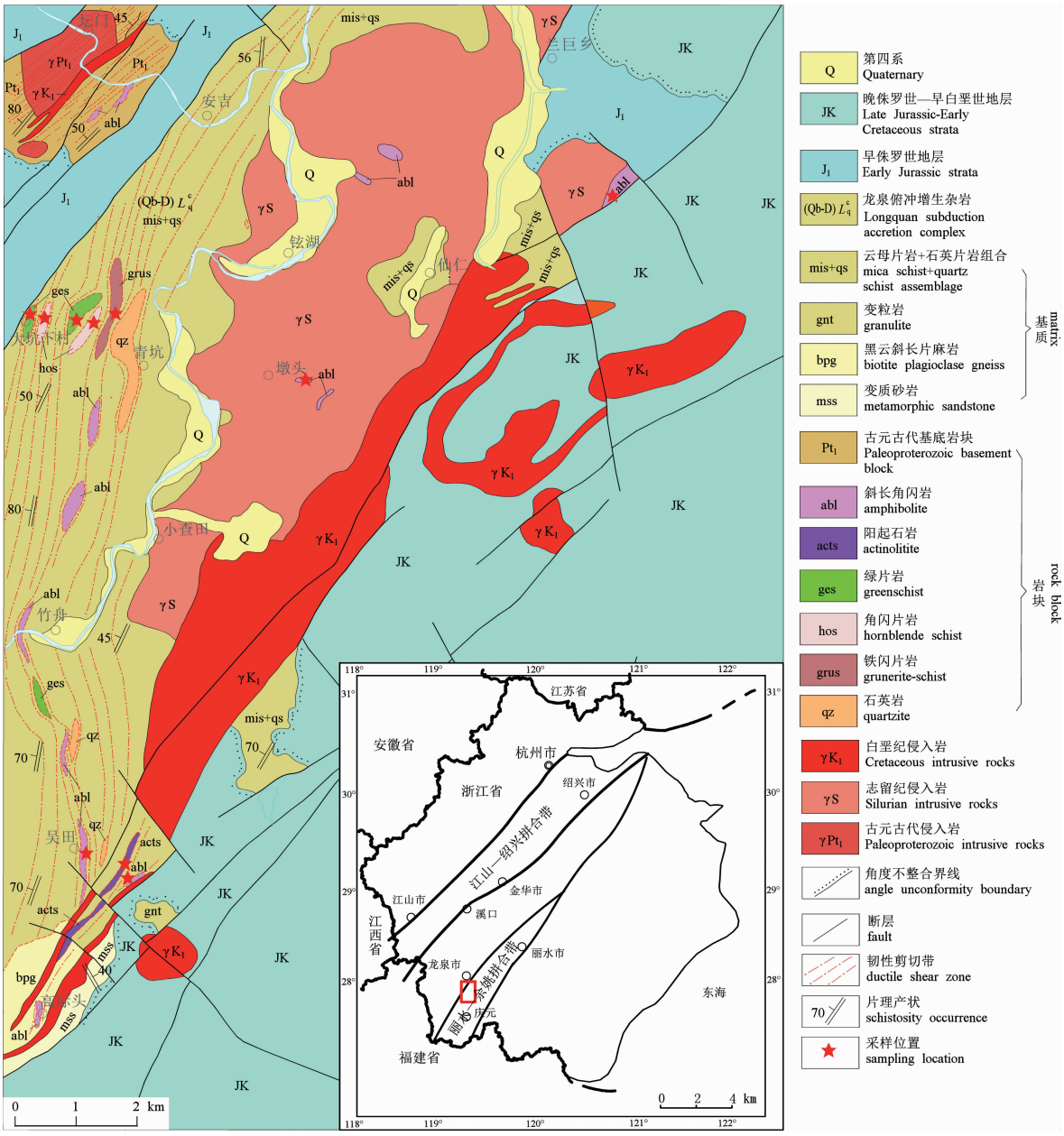

图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketchmap of study area

上龙泉杂岩带主体呈北东条带状展布于庆元隆宫、龙泉查田、松阳高亭和竹源一带，在龙泉安仁一带也有分布，其余在丽水-余姚断裂带中零星出露。在龙泉研究区内主要呈北东向分布于高际头—吴田—竹舟—青坑—安吉一带，其北西侧与下侏罗统枫坪组沉积岩地层成断层接触，南东侧为中生代火山岩叠覆，多呈断裂接触，局部呈不整合接触，或被燕山期岩体侵入破坏，其在墩头一带被志留纪墩头岩体所侵入。

龙泉杂岩由岩块和基质两部分组成。基质主要为一套绿片岩相-角闪岩相副变质岩系，岩性由二云片岩、二云石英片岩、黑云石英片岩、二云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩、二云斜长变粒岩、绿片岩等组成。岩石呈似层状产出，但这些层通常是剪切变形的结果，与原生沉积层存在差异，仅在青坑村附近尚可见由云母石英片岩与石英片岩互层形成的变余原生层理构造(S_0)。岩块主要由斜长角闪岩、斜长角闪片岩、角闪岩、阳起石片岩、铁闪片岩、绿片岩、石英岩等组成。它们在区内多呈不规则团块状、透镜体状或似层状产出，无完整的层序，与围岩之间多为韧性剪切构造接触关系，无冷凝边及围岩的烘烤边，具外来岩块特征。

本文的研究对象主要是上述变质基性岩岩块。根据野外产出特征的不同，这些岩石大致分为两类：Ⅰ类岩石岩性有斜长角闪（片）岩、角闪岩、绿片岩等，野外主要呈团块状、似层状产出；Ⅱ类岩石岩性主要为斜长角闪岩、铁闪片岩和阳起石岩，野外多呈透镜状产出。各种岩性岩石学特征如下（图 2）：

斜长角闪（片）岩分布较广，呈透镜状或似层状产出，多呈灰绿色、墨绿色，块状、条纹状或片状构造，柱粒状镶嵌变晶结构，偶见变余辉长结构，主要矿物为普通角闪石（40%～60%）和斜长石（25%～40%），含少量绿帘石、绿泥石、石英以及石榴子石等矿物，矿物粒度一般为 0.2～2.0mm，有的可达 1.5～3.0mm。该类岩石原岩为基性火成岩类。

角闪岩仅见于曹坑村，呈薄层状、透镜状产出，岩石呈灰绿—暗黑色，柱粒状变晶结构，块状或条带状构造，主要矿物为角闪石（80%～95%），含少量透辉石、绿帘石、绿泥石等矿物，微量石英和斜长石。矿物粒径一般为 0.5～2mm。浅色透辉石、绿帘石与暗色角闪石相间平行排列构成清晰的条带状构造。

绿片岩呈似层状、透镜状产出，岩石呈暗绿色，鳞片柱状变晶结构，片状构造。矿物成分主要为绿帘石（30%～50%）、绿泥石（15%～30%）、黝帘石（10%～20%），含少量长石、石英、黑云母、石榴子石等。矿物粒径一般小于 0.2mm。

铁闪片岩见于青坑村附近，呈透镜体状产于石英片岩中。岩石呈墨绿色，柱粒状鳞片变晶结构，片状构造。岩石主要由角闪石及少量磁铁矿组成，基本无其他矿物。角闪石呈柱状、柱状结合体或粒状，微弱的多色性，横切面可见清晰的角闪石式解理，其种属为铁闪石，矿物粒径以 0.1～1.0mm 为主，个别达 1.5mm。

阳起石（片）岩主要见于吴田一带，根据次要矿物类型分为角闪阳起石岩、含透辉阳起石（片）岩、钠长阳起片岩等。岩石呈暗绿色，显微粒状、柱粒状变晶结构，块状或片状构造，有时为放射状构造和菊花

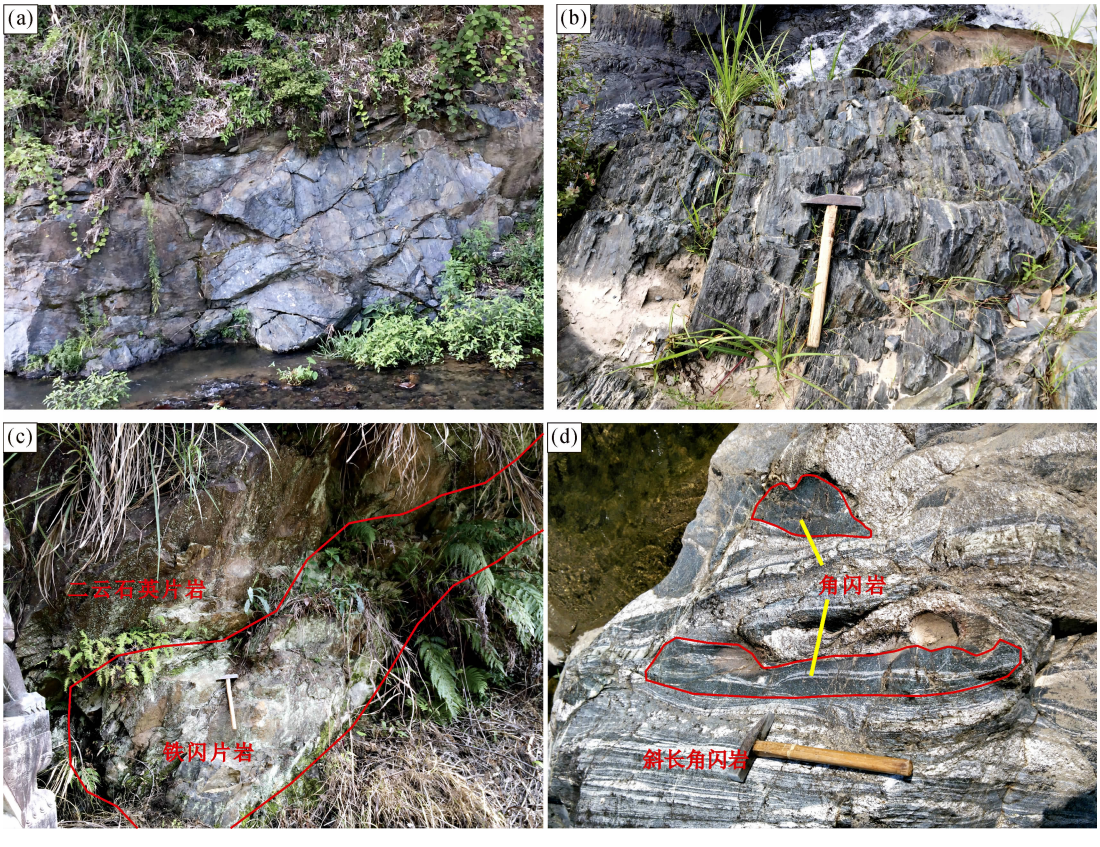

图 2　龙泉变质基性岩野外出露特征

Fig. 2　Outcropping characteristics of the metamorphic basic rocks in Longquan area

(a)—似层状产出的绿片岩；(b)—似层状斜长角闪岩；(c)—二云石英片岩中的铁闪片岩透镜体；(d)—斜长角闪岩中的角闪岩团块

(a)—Layered greenschist; (b)—layered amphibolites; (c)—grunerite-schist occur as lenticular bodies in two-mica quartz schist; (d)—amphibolite occur as lenticular bodies in plagioamphibolite

状构造。矿物成分主要为阳起石,次有钠长石、角闪石、透辉石、绿帘石、绿泥石、黑云母等,偶见石英。阳起石呈细长柱状、针状或纤维状,密集平行定向排列,构成片状构造,有时集合体呈放射状,具有黄绿—绿色多色性。

2 样品及分析

对研究区内主要的变质基性岩进行了系统采样,尽可能采集未风化及未蚀变的新鲜样品,采样位置如图1所示。将所采样品加工破碎成200目的粉末,分成两份分别进行岩石主量元素、微量元素(包括稀土元素)分析,样品加工以及主微量元素分析均在国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成,主量元素采用SX100e X荧光光谱仪(BP00105)分析测试完成,分析精度优于1%,Fe_2O_3 和 FeO 通过 LeMaitre(1976)规定的公式计算获得;稀土微量元素采用ICP-MS方法分析完成,测试仪器为Thermo X Series Ⅱ电感耦合等离子体质谱联用仪(SNO1426C),分析精度优于5%,分析数据见表1、表2、表3。

锆石分选由河北省廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司完成。样品破碎后手工淘洗分离出重砂,经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石,选取代表性颗粒制靶,并采用阴极发光(CL)照相对锆石内部结构进行研究。LA-ICP-MS测年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,ICP-MS型号为Agilent7500型四级杆质谱仪,激光剥蚀系统为NewWave公司产的UP-213固体激光剥蚀系统,剥蚀孔径为30μm,以He气作为载气。质量分馏校正采用锆石标样GJ-1。数据通过分析软件GLITTER计算获得同位素比值、年龄和误差,按照Andersen(2002)的方法进行普通铅校正,利用ISOPLOT软件完成加权平均年龄计算和U-Pb谐和图。同位素比值和年龄误差为1σ,加权平均年龄置信度为95%。

3 原岩类型及地球化学特征

3.1 原岩类型及岩石系列判别

在尼格里判别图解上(图3a),两类岩石样品投点主要落入火山岩区,少量投点位于火山岩区的左上侧,这可能与部分镁质变质岩原岩为超基性岩有关;在Бапащов(1972)稀土元素判别图解上(图3b),Ⅰ类样品投点均落在斜长角闪岩区,Ⅱ类样品落入斜长角闪岩区周边。在 Zr/TiO_2-Nb/Y 图解中(图3c),Ⅰ类样品点主要位于亚碱性玄武岩区和安山质玄武岩区,Ⅱ类样品分布于碱性玄武岩区和碧玄岩区,属于碱性玄武岩系列;将Ⅰ类样品投于AFM岩系判别图解上(图3d),这些样品展示了一个富Fe的趋势,说明它们属于拉斑系列。

3.2 主量元素特征

两类岩石在部分主量元素特征上表现出一定的差异。岩石 SiO_2 含量相似,分别介于39.23%~54.35%和37.99%~57.52%之间,均属于超基性岩和基性岩类;TiO_2 含量分别介于1.28%~3.06%和1.09%~2.48%之间,差异不大。Al_2O_3 含量分别为9.15%~16.10%(平均12.46%)和8.54%~10.22%(平均9.67%),TFeO含量分别为10.81%~23.04%(平均14.88%)和9.95%~13.36%(平均11.48%),全碱(Na_2O+K_2O)含量分别介于2.06%~6.62%(平均3.90%)和0.98%~3.04%之间(平均1.95%),以上主量元素含量均显示出Ⅰ类均高于Ⅱ类样品的特征。MgO含量差异较大,其中Ⅰ类MgO含量介于5.27%~9.92%之间,平均为6.98%,镁值($Mg^{\#}$)介于20.65~45.62之间(平均30.25),Ⅱ类MgO含量介于7.17%~17.44%之间(两个铁闪片岩大于10%),平均为11.61%,镁值($Mg^{\#}$)介于32.06~60.94之间(平均45.95),Ⅱ类部分样品表现出高镁玄武岩特征,岩石的镁质也表明原岩岩浆经过了一定程度的分异作用或同化混染了少量地壳物质。两类岩石的CaO含量分别介于5.89%~12.40%(平均9.87%)和9.17%~16.44%之间(平均12.44%)。所有样品的 Na_2O/K_2O 介于0.25~8.46之间,大部分>1,平均为3.4,总体为富钠质类型。

3.3 稀土元素、微量元素特征

龙泉杂岩的两类变质基性岩岩块在稀土、微量元素特征方面存在较为明显的差异。

Ⅰ类样品稀土含量较低,$\Sigma REE=55.19\times10^{-6}\sim158.79\times10^{-6}$,平均为$86.81\times10^{-6}$;轻重稀土分异较弱,LREE/HREE=2.25~3.34,$(La/Yb)_N=1.50\sim3.39$;没有明显的Eu异常,$\delta Eu=0.78\sim1.37$,其中两个样品具有弱的Eu正异常(δEu分别为1.34和1.37),可能有较多结晶的斜长石,其余样品均为弱负异常,可能与原始岩浆经过轻微斜长石的分离结晶有关。Ⅰ类样品稀土配分曲线斜率小,显的平坦,与IAB配分曲线形式相似(图4a)。

Ⅱ类样品稀土总量较高,$\Sigma REE=180.29\times10^{-6}\sim312.71\times10^{-6}$,平均为$250.84\times10^{-6}$;轻重

表 1　龙泉俯冲增生杂岩变基性岩岩块主量元素(%)分析结果

Table 1　Major element compositions (%) of the metamorphic mafic rocks in the Longquan accretion complex

类型	样号	岩石名称	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	L. O. I	TFe_2O_3	$Mg^{\#}$	Na_2O/K_2O	Na_2O+K_2O
Ⅰ类	D0562-1	斜长角闪岩	49.30	1.39	14.31	4.23	7.83	0.22	6.03	10.76	3.02	0.66	0.14	0.53	12.93	28.97	4.55	3.77
	D0562-3	斜长角闪岩	51.13	1.28	14.54	3.36	7.74	0.19	5.99	9.75	3.18	0.55	0.13	0.80	11.97	30.48	5.82	3.80
	PM002-25	斜长角闪岩	45.26	2.67	16.10	4.70	9.30	0.56	6.45	5.89	2.33	0.63	0.41	4.41	15.04	28.03	3.70	3.14
	PM002-25-2	斜长角闪岩	49.32	1.52	14.63	3.34	7.32	0.19	7.34	9.06	2.86	1.39	0.17	1.60	11.48	36.04	2.06	4.37
	PM004-2-2	绿片岩	48.18	1.49	15.15	6.30	6.97	0.21	6.89	7.65	1.88	0.43	0.14	3.85	14.05	30.61	4.33	2.43
	PM007-60-1	角闪岩	53.03	2.28	12.22	3.42	8.14	0.24	5.53	7.59	4.02	1.25	0.28	0.85	12.46	27.96	3.22	5.38
	D0360-2	斜长角闪岩	39.23	2.97	9.15	6.54	14.84	0.33	6.79	12.32	3.16	1.40	0.27	1.35	23.04	20.65	2.26	4.70
	PM004-2-1	绿片岩	47.68	1.52	13.66	3.62	7.72	0.24	8.34	9.00	2.03	0.24	0.19	4.71	12.20	38.34	8.46	2.41
	PM004-5-1	绿片岩	42.16	1.47	14.17	3.27	6.93	0.25	9.92	12.17	1.61	0.29	0.17	6.60	10.97	45.62	5.57	2.06
	PM004-9-1	绿片岩	41.32	1.99	10.74	5.77	11.79	0.25	7.42	12.40	3.34	0.52	0.20	2.93	18.88	26.03	6.42	4.03
	PM007-21-1	斜长角闪片岩	39.94	3.06	9.59	6.36	14.16	0.30	6.68	11.89	3.35	1.31	0.26	1.52	22.11	21.08	2.56	4.81
	PM007-23-1	角闪岩	54.35	2.29	10.44	4.16	8.10	0.20	5.27	8.90	1.62	1.89	0.27	1.30	13.16	26.04	0.86	3.60
	PM007-31-1	斜长角闪片岩	53.55	1.50	10.19	4.24	5.91	0.28	7.39	10.70	1.99	1.39	0.18	1.69	10.81	37.58	1.43	3.47
	PM007-51-1	斜长角闪片岩	42.49	2.46	9.61	6.51	11.46	0.35	7.73	10.07	4.65	1.80	0.25	1.33	19.26	26.09	2.58	6.62
Ⅱ类	D0450-3	斜长角闪岩	57.52	1.09	8.54	0.82	8.46	0.47	8.02	9.17	0.53	2.11	0.51	1.55	10.22	40.89	0.25	2.72
	PM004-24-4	铁闪片岩	37.99	2.48	10.15	2.21	6.97	0.38	17.44	16.44	0.68	0.35	1.23	2.97	9.95	60.94	1.92	1.07
	PM004-24-5	铁闪片岩	42.93	1.81	10.22	3.11	8.36	0.27	13.81	13.45	0.61	0.33	0.93	2.47	12.40	49.92	1.82	0.98
	PM007-66-1	阳起石岩	51.63	2.09	9.75	3.74	8.66	0.27	7.17	10.70	2.26	0.70	0.51	1.27	13.36	32.06	3.21	3.04

表 2　龙泉俯冲增生杂岩变基性岩岩块微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 2　Trace element ($\times10^{-6}$) contents of metabasic rock blocks in the Longquan accretion complex

类型	样号	岩石名称	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	Cr	Ni	Co	V	Sc	Cs	Cd	Li
Ⅰ类	D0562-1	斜长角闪岩	36.30	117.90	1.20	0.56	0.35	5.64	190	95	6.23	134	53.20	26.60	230	52.00	1.64	0.11	29.60
	D0562-3	斜长角闪岩	22.98	120.38	1.03	0.67	0.34	5.18	179	82	2.35	—	47.88	36.56	—	42.94	1.16	0.20	21.26
	PM002-25	斜长角闪岩	23.70	179.80	2.45	0.57	0.95	15.10	233	248	16.66	155	56.20	28.40	279	46.40	0.40	0.14	63.60
	PM002-25-2	斜长角闪岩	58.74	223.00	0.95	0.32	0.43	7.56	267	88	2.62	—	73.56	39.08	—	36.40	1.22	0.19	13.36
	PM004-2-2	绿片岩	18.00	159.80	1.05	0.17	0.36	5.84	209	102	5.81	253	86.20	41.90	284	49.80	0.50	0.14	41.80
	PM007-60-1	角闪片岩	61.10	172.00	1.81	0.33	0.86	12.20	291	184	8.18	62	30.60	40.70	297	45.10	1.71	0.14	27.00
	D0360-2	斜长角闪岩	44.42	121.54	1.54	0.22	0.82	11.02	180	142	4.04	85	41.56	46.84	385	42.92	0.85	0.29	17.76
	PM004-2-1	绿片岩	7.49	82.64	0.90	0.18	0.52	6.92	203	101	2.92	126	62.00	43.54	311	38.28	0.52	0.23	42.94
	PM004-5-1	绿片岩	11.37	70.12	0.75	0.16	0.46	5.95	356	86	2.41	203	82.22	43.44	299	35.76	0.42	0.25	58.30
	PM004-9-1	绿片岩	7.37	54.52	0.81	0.14	0.44	6.01	152	97	2.71	196	74.72	42.92	335	39.22	0.18	0.23	18.41
	PM007-21-1	斜长角闪片岩	37.34	163.26	1.69	0.27	0.95	12.70	159	153	4.23	81	42.62	46.02	413	45.00	1.37	0.34	19.12
	PM007-23-1	角闪岩	87.80	147.00	1.88	0.40	0.91	13.70	252	162	6.40	57	38.10	47.00	283	41.00	7.65	0.10	30.20
	PM007-31-1	斜长角闪片岩	52.10	202.00	1.00	0.35	0.60	7.57	330	108	4.78	92	52.70	51.90	228	38.10	0.84	0.12	20.10
	PM007-51-1	斜长角闪片岩	76.04	172.46	1.41	0.29	0.69	10.14	156	135	3.69	49	45.88	47.06	357	39.30	1.20	0.28	19.54
Ⅱ类	D0450-3	斜长角闪岩	137.00	331.00	12.80	3.24	2.34	50.40	252	173	4.09	233	190.00	51.20	139	16.60	4.34	0.79	21.50
	PM004-24-4	铁闪片岩	1.75	104.94	12.94	3.00	5.28	105.82	144	208	4.66	500	368.00	60.14	220	19.28	0.21	0.54	14.14
	PM004-24-5	铁闪片岩	2.58	64.96	11.80	3.14	3.46	88.58	342	168	3.75	—	311.80	53.42	—	18.82	0.22	0.44	16.14
	PM007-66-1	阳起石岩	23.00	87.30	3.54	0.97	2.06	39.80	234	166	5.62	128	105.00	51.30	233	29.90	1.18	0.14	20.10

表 3 龙泉俯冲增生杂岩变基性岩岩块稀土元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 3 Rare earth element ($\times10^{-6}$) contents of metabasic rock blocks in Longquan accretion complex

类型	样号	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE ($\times10^{-6}$)	LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe
Ⅰ类	D0562-1	斜长角闪岩	13.20	25.30	3.49	16.20	4.11	2.06	5.11	0.90	5.47	1.08	3.04	0.46	2.79	0.41	29.60	83.62	3.34	3.39	1.37	0.89
	D0562-3	斜长角闪岩	10.47	21.46	3.14	14.85	4.20	2.03	5.11	0.87	5.67	1.13	3.35	0.39	3.02	0.39	29.88	76.09	2.82	2.48	1.34	0.91
	PM002-25	斜长角闪岩	22.50	46.30	7.17	33.20	8.27	2.32	10.10	1.70	10.70	2.20	6.39	0.99	6.08	0.87	61.10	158.79	3.07	2.65	0.78	0.89
	PM002-25-2	斜长角闪岩	7.94	18.66	2.99	14.85	4.50	1.55	5.34	0.96	6.41	1.29	3.86	0.47	3.62	0.45	33.52	72.90	2.25	1.57	0.96	0.94
	PM004-2-2	绿片岩	11.40	19.10	3.43	16.10	4.13	1.42	5.14	0.90	5.62	1.18	3.36	0.52	3.07	0.41	32.40	75.78	2.75	2.66	0.94	0.74
	PM007-60-1	角闪片岩	15.30	32.30	4.87	25.00	6.96	2.10	7.22	1.26	8.05	1.63	4.84	0.70	4.12	0.56	44.90	114.91	3.05	2.66	0.90	0.91
	D0360-2	斜长角闪岩	12.28	26.22	4.04	20.38	5.60	1.82	6.69	1.10	7.64	1.48	4.64	0.62	4.34	0.62	38.52	97.46	2.59	2.03	0.91	0.91
	PM004-2-1	绿片岩	8.16	18.69	2.78	14.33	3.92	1.37	4.78	0.78	5.55	1.07	3.36	0.45	3.16	0.44	27.32	68.86	2.51	1.85	0.97	0.96
	PM004-5-1	绿片岩	6.13	15.16	2.16	11.33	3.28	1.14	3.87	0.63	4.48	0.87	2.78	0.37	2.63	0.36	22.70	55.19	2.45	1.67	0.98	1.02
	PM004-9-1	绿片岩	6.44	16.22	2.34	12.41	3.65	1.27	4.48	0.74	5.32	1.04	3.30	0.44	3.08	0.43	27.18	61.16	2.25	1.50	0.96	1.02
	PM007-21-1	斜长角闪片岩	12.94	29.04	4.13	20.88	5.69	1.85	6.77	1.08	7.67	1.47	4.73	0.64	4.40	0.61	39.10	101.90	2.72	2.11	0.91	0.97
	PM007-23-1	角闪岩	14.20	30.50	4.26	21.60	5.69	1.95	5.92	1.06	6.54	1.36	3.98	0.60	3.63	0.51	35.30	101.80	3.31	2.81	1.02	0.95
	PM007-31-1	斜长角闪片岩	8.33	18.20	2.59	13.60	3.74	1.19	3.91	0.63	4.26	0.88	2.61	0.39	2.31	0.33	23.40	62.97	3.11	2.59	0.94	0.95
	PM007-51-1	斜长角闪片岩	10.58	25.14	3.43	17.36	4.75	1.58	5.57	0.85	5.91	1.11	3.50	0.46	3.25	0.44	28.98	83.94	2.98	2.33	0.94	1.02
Ⅱ类	D0450-3	斜长角闪岩	47.50	90.20	10.00	42.90	8.18	2.08	6.69	0.99	5.40	1.00	2.81	0.42	2.37	0.35	26.60	220.89	10.03	14.38	0.83	0.96
	PM004-24-4	铁闪片岩	64.50	133.46	14.22	61.02	11.61	3.01	11.32	1.24	6.40	0.99	2.62	0.28	1.81	0.23	24.50	312.72	11.56	25.56	0.79	1.03
	PM004-24-5	铁闪片岩	59.16	123.24	14.04	55.58	10.84	2.78	10.79	1.26	6.04	0.97	2.57	0.24	1.77	0.20	24.36	289.49	11.14	23.95	0.78	1.01
	PM007-66-1	阳起石岩	42.10	54.60	9.26	40.50	8.16	2.32	7.22	1.11	6.36	1.23	3.53	0.52	2.95	0.43	33.20	180.29	6.72	10.24	0.90	0.65

稀土分异明显，LREE/HREE 比值和 $(La/Yb)_N$ 值较大(LREE/HREE＝6.72～11.56，$(La/Yb)_N$＝10.24～25.56)；具有弱的 Eu 负异常，δEu＝0.78～0.90。该类样品球粒陨石标准化稀土分布曲线具有明显的右倾，与 OIB 具有相似性(图 4b)。

两类样品微量元素含量也存在较大差异，特别是一些高场强元素，如Ⅰ类样品的 Th、U、Ta、Nb 含量(平均分别为 1.32×10^{-6}、0.30×10^{-6}、0.60×10^{-6}、8.97×10^{-6})远小于Ⅱ类样品的含量(平均分别为 10.3×10^{-6}、2.60×10^{-6}、3.30×10^{-6}、71.15×10^{-6})。在洋脊玄武岩标准化微量元素分布蛛网图中，Ⅰ类样品蛛网图呈现“先隆后凹”式特征，其中蛛网图左部呈现隆起，右部高场强元素及稀土元素基本与洋中脊玄武岩平均值相当，表现为 Sr、K、Rb、Ba、Th、Hf 等元素选择性富集，其分布曲线与 IAB 相似；Ⅱ类样品除了 Y、Yb 外，其他元素均显示不同程度的富集，具有一定的 Nb 正异常和 Zr、Hf 负异常，其分布曲线与 OIB 相似。

4 锆石 U-Pb 年龄

两件变质基性岩样品的锆石 U-Pb 定年结果见表 4。

样品 D1003 岩性为斜长角闪岩(Ⅰ类)。锆石呈短柱状，少数粒状，粒度一般为 40～80μm，长宽比为 1∶1～2∶1，锆石呈浅灰色，内部多云雾状，具有斑状或扇状分带，个别晶面呈浑圆状或次浑圆状(图 5)；个别锆石具有亮色的增生边，如 10 号锆石，但是增生边极窄，无法进行年龄测定。本次选取 12 颗锆石共 12 个分析点进行定年，各分析点 Th/U 比值较低，介于 0.13～0.25 之间，符合变质锆石特征。12 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄较为集中，介于 375～404Ma 之间，其中有 11 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄介于 398～404Ma 之间，经计算获得 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 402±3Ma，可以代表岩石变质年龄。

样品 PM004-24-4 岩性为铁闪片岩(Ⅱ类)。锆石呈粒状或短柱状，长宽比为 1∶1～2∶1，粒度 50μm 左右，晶型较差，晶面呈浑圆状或次浑圆状，内部发育较宽的环带结构或条带状结构；部分锆石具有增生边，但大都较窄(图 5)，难以准确测得年龄；选取 22 颗锆石共 24 个分析点进行定年，24 个分析点的年龄值主要分为 7 个群落，分别为 399～412Ma(11 个点)、521Ma(1 个点)、592～605Ma(3 个点)、735～748Ma(2 个点)、949～1168Ma(3 个

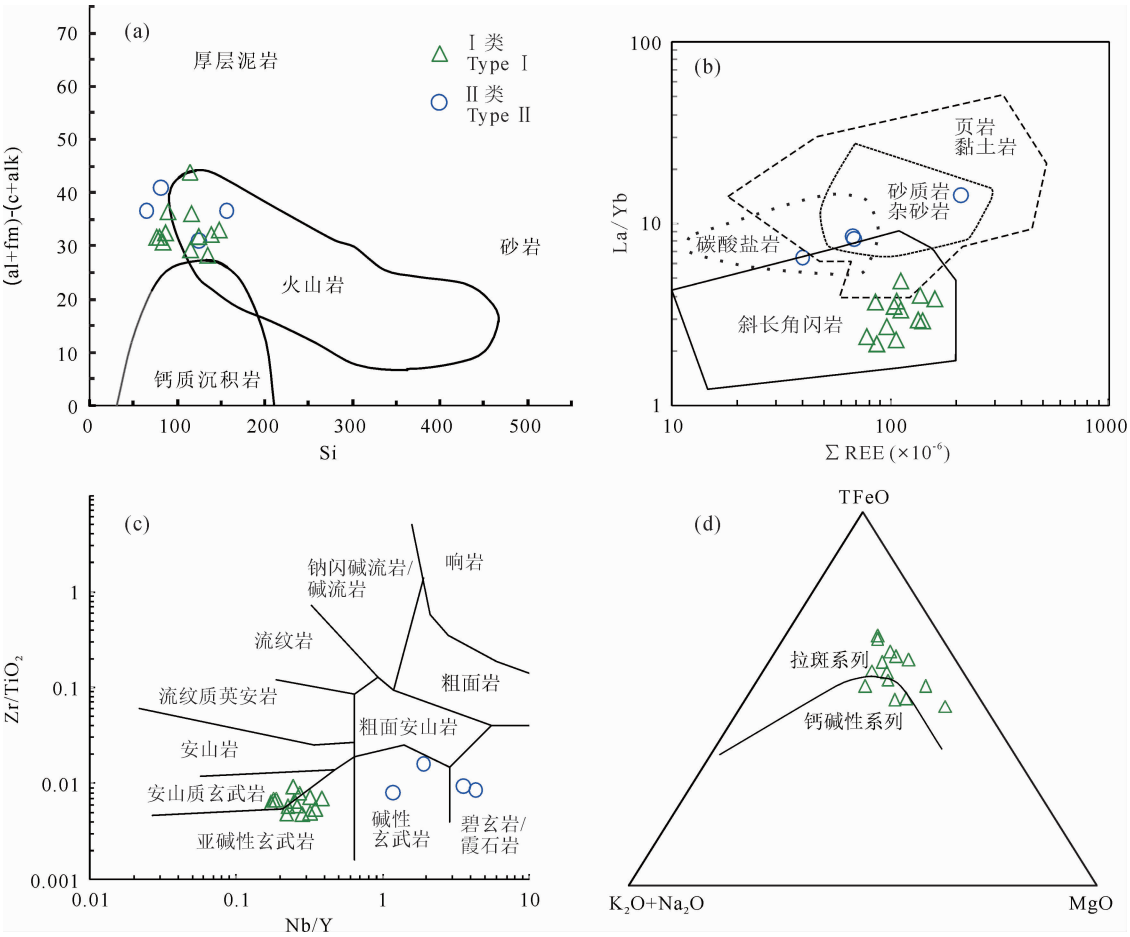

图 3　龙泉俯冲增生杂岩中变基性岩原岩和岩石系列判别

Fig. 3　Identification of protolith types of metabasic rocks in Longquan subduction accretion complex

(a)—[(al+fm)-(c+alk)]-Si 图解(据 Simonen,1953);(b)—La/Yb-∑REE 图解(据 Балашов et al.,1972);(c)—Nb/Y-Zr/TiO_2 图解(据 Winchester and Floyd,1977);(d)—AFM 图解(据 Miyashiro, 1974)

(a)—[(al+fm)-(c+alk)]-Si diagrams (after Simonen, 1953); (b)—La/Yb-∑REE diagrams (after Балашов et al., 1972); (c)—Nb/Y-Zr/TiO_2 diagram (after Winchester and Floyd, 1977); (d)—AFM diagram (after Miyashiro, 1974)

点)、2438～2668Ma(3 个点)、3353Ma(1 个点)。其中最年轻的 11 个分析点给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 404±3Ma,与 10 号锆石变质增生边年龄(403±7Ma)相近,同时这 11 个分析点的 Th/U 比值极低,均<0.1,表明为变质锆石,该组年龄代表了岩石主峰期的变质年龄。7 号和 11 号锆石中获得边部年龄为 605±12Ma 和 735±13Ma,这两颗锆石增生边较窄,年龄可能为核边混合年龄。其他较老的年龄均测自一些锆石的核部,代表了继承锆石年龄特征。

5　讨论

5.1　构造环境

本次两类样品的 Nb 含量虽然存在明显区别,但是其含量均较高,Ⅰ类样品 Nb 含量为 5.18×10^{-6}～15.1×10^{-6}(平均为 8.97×10^{-6}),Ⅱ类样品 Nb 含量为 39.80×10^{-6}～105.82×10^{-6}(平均达 71.15×10^{-6}),明显高于一般岛弧玄武岩($<4\times10^{-6}$),两类岩石的 TiO_2 含量分别为 1.28%～3.06%和 1.09%～2.09%,与富 Nb 玄武岩相似(Lan Chaoli et al.,2002)。岩浆系列分类图解显示,Ⅰ类样品主要是拉斑玄武岩系列岩石,岩石构造环境判别图解(图 6)指示,这些样品显示出岛弧玄武岩(IAB)和 MORB 的特征。研究表明 IAB 总体上接近 E-MORB 的特征,其区别主要体现在 Nb-Ta 亏损的特征上,是否受到俯冲流体的影响是 IAB 和 MORB 以及 OIB 区分的最重要标志(Wilson,1989;Zhao Jianxin et al.,1995;Zhang Qi et al.,1999;Yang Jing et al.,2016)。龙泉杂岩中Ⅰ类变质基性岩微量元素特征显示富集大离子亲石元素而相对亏

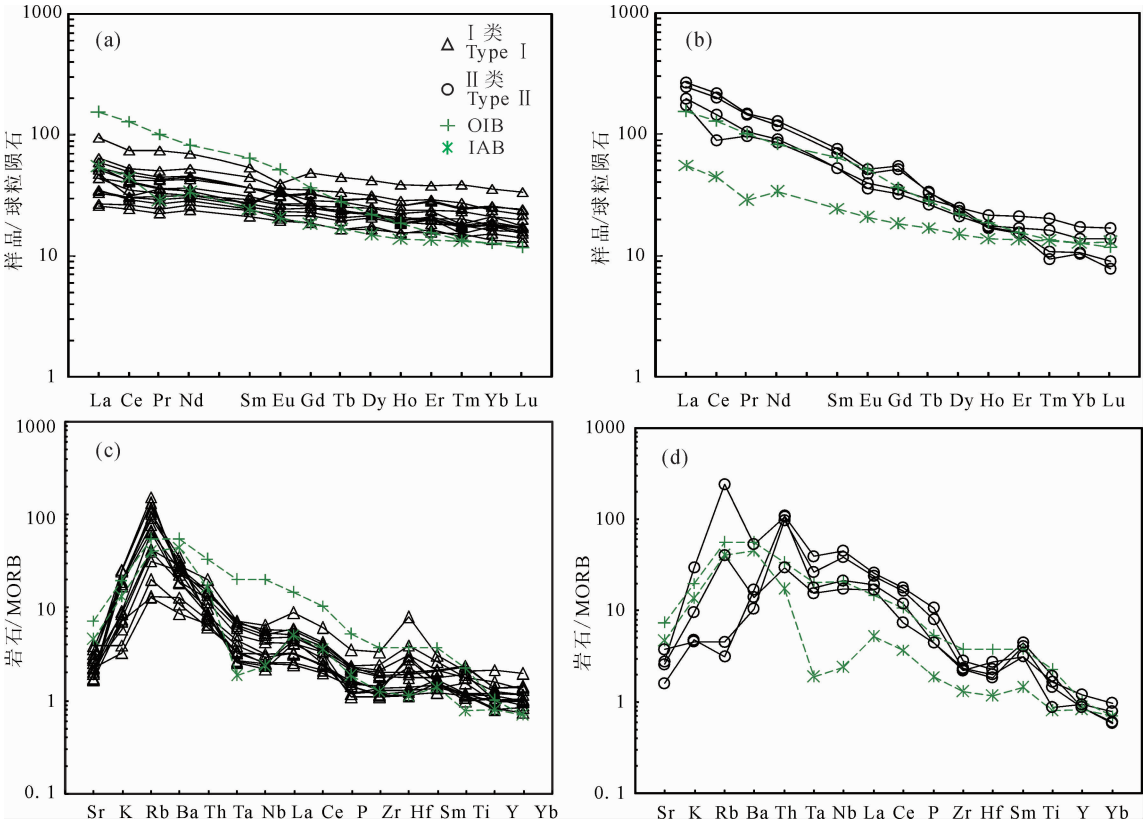

图 4 龙泉俯冲增生杂岩变质基性岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a、b)与微量元素 N-MORB 标准化蛛网图(c、d)(标准化值据 Sun et al.,1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, b) and N-MORB normalized trace element spider diagrams (c, d) of the metamorphic basic rocks in Longquan accretion complex (the normalization values after Sun et al., 1989)

损高场强元素,具有 Nb-Ta 负异常,表明有来自消减带物质的加入,源区在一定程度上受到了地壳物质的混染,指示了这些样品原岩形成于岛弧的构造环境。

Ⅱ类样品除了 Nb 含量明显区别于一般岛弧玄武岩外,Ta 含量($2.06\times10^{-6}\sim5.28\times10^{-6}$)、Nb/Ta 比值(14.70～25.60)、Nb/La 比值(0.95～1.64)、Nb/U 比值(15.56～41.03)、$(Nb/Yb)_N$比值(13.49～48.46)等也均明显区别于岛弧环境下形成的玄武岩(Ta、Nb、Ti 亏损),岩石的稀土配分形式和微量元素标准化图解均显示与 OIB 相似。在 Ti-Zr-Y、Hf-Th-Nb 和 Nb-Zr-Y 构造环境判别图解中(图 6b、c、d),这类岩石均落在板内玄武岩的分布区,在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中(图 6a)样品投点均位于 OIB 区域。Ⅱ类样品具有中等的 Nb/Y 比值,相对高的 Th 和 HFSE(如 Nb、Ta、Zr、Hf 等),表明其原岩可能来自一个相对富集的源区。其中 La/Nb 比值为指示岩浆受陆壳混染的有效指数,本次研究样品的 La/Nb 值为 0.01～2.72,除了 D0450-3 为 2.72 外,其余均小于 1.0,远小于大陆地壳的比值(1.5～2.2),而与 OIB 比值(0.78)相对较为接近(Dungan et al.,1986; Wang Tao et al.,2011),说明其源区未受到陆壳的混染。样品的 Zr/Nb 比值为 1.9～4.2,远远小于原始地幔值(14.8)和大陆地壳值(16.2),与 OIB 的值相近(Weaver,1991; Wang Tao et al.,2011),也表明这些岩石来自于同一岩浆,由过渡型地幔或者富集型地幔部分熔融产生。地球化学特征及构造环境判别图解表明,Ⅱ类样品应是由洋岛碱性玄武岩变质形成,形成于大洋板内的构造背景之下。

Chen Linshen et al.(2017)通过对龙泉杂岩中的副变质岩和斜长角闪岩的研究认为,副变质岩原岩具有大陆岛弧以及活动大陆边缘的构造背景,而斜长角闪岩原岩则形成于与俯冲带有关的大陆边缘火山弧构造环境中。另外与原龙泉岩群相当的福建马面山群变基性岩中,除了产出 OIB 特征的岩石外,在地球化学特征上也还有其他类型。如 Zhou Liya et al.(2001)在马面山群变基性岩中获得了两

表 4　龙泉俯冲增生杂岩变基性岩锆石 U-Pb 分析结果

Table 4　Zircon U-Pb dating results of the metamorphic basic rocks in Longquan accretion complex

Spot	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	U-Pb 同位素比值						年龄(Ma)					
				$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
PM004-24-4-1	425	542	0.78	0.0507	0.0024	0.1544	0.0072	0.0224	0.0003	233	118	146	6	143	2
PM004-24-4-2	6	632	0.01	0.0550	0.0015	0.4850	0.0129	0.0642	0.0006	413	63	401	9	401	4
PM004-24-4-3	35	588	0.06	0.0559	0.0015	0.4963	0.0141	0.0645	0.0007	450	61	409	10	403	4
PM004-24-4-4	4	685	0.01	0.0567	0.0026	0.5003	0.0213	0.0642	0.0008	480	108	412	14	401	5
PM004-24-4-5	572	750	0.76	0.0578	0.0039	0.6709	0.0447	0.0842	0.0018	524	148	521	27	521	11
PM004-24-4-6	4	580	0.01	0.0549	0.0017	0.4920	0.0161	0.0649	0.0007	409	69	406	11	406	4
PM004-24-4-7.1	85	708	0.12	0.0630	0.0019	0.8564	0.0323	0.0983	0.0020	709	65	628	18	605	12
PM004-24-4-7.2	423	451	0.94	0.1605	0.0030	9.5224	0.2058	0.4307	0.0067	2461	32	2390	20	2309	30
PM004-24-4-8	7	645	0.01	0.0550	0.0024	0.4947	0.0225	0.0653	0.0011	413	94	408	15	408	7
PM004-24-4-9	4	653	0.01	0.0554	0.0019	0.5012	0.0174	0.0660	0.0010	428	76	412	12	412	6
PM004-24-4-10.1	1	255	0.00	0.0577	0.0036	0.5113	0.0326	0.0645	0.0012	517	139	419	22	403	7
PM004-24-4-10.2	183	1076	0.17	0.0629	0.0016	0.8701	0.0439	0.0972	0.0032	706	54	636	24	598	19
PM004-24-4-11.1	362	1900	0.19	0.0702	0.0022	1.1689	0.0383	0.1208	0.0022	1000	60	786	18	735	13
PM004-24-4-11.2	103	839	0.12	0.0801	0.0014	2.1406	0.0638	0.1916	0.0039	1198	34	1162	21	1130	21
PM004-24-4-12	24	27	0.87	0.0730	0.0086	1.1772	0.1328	0.1229	0.0051	1013	241	790	62	748	29
PM004-24-4-13	7	283	0.02	0.0557	0.0031	0.4884	0.0262	0.0643	0.0010	439	119	404	18	402	6
PM004-24-4-14	18	892	0.02	0.0562	0.0012	0.5031	0.0118	0.0648	0.0006	461	48	414	8	405	4
PM004-24-4-15	120	197	0.61	0.1584	0.0028	9.3715	0.1748	0.4294	0.0041	2438	34	2375	17	2303	18
PM004-24-4-16	133	769	0.17	0.0580	0.0022	0.5179	0.0201	0.0649	0.0011	528	77	424	13	405	7
PM004-24-4-17	183	387	0.47	0.0718	0.0017	1.5709	0.0383	0.1585	0.0016	983	47	959	15	949	9
PM004-24-4-18	4	771	0.01	0.0559	0.0019	0.4908	0.0169	0.0639	0.0007	456	78	405	12	399	4
PM004-24-4-19	88	458	0.19	0.0823	0.0017	2.2520	0.0478	0.1986	0.0019	1252	40	1197	15	1168	10
PM004-24-4-20	69	627	0.11	0.0611	0.0017	0.8140	0.0257	0.0962	0.0014	643	59	605	14	592	8
PM004-24-4-21	19	50	0.38	0.2783	0.0062	23.9978	0.5074	0.6282	0.0080	3353	35	3268	21	3142	32
PM004-24-4-22	95	56	1.71	0.1817	0.0043	12.1910	0.2947	0.4897	0.0074	2668	40	2619	23	2570	32
D1003-01	245	1190	0.21	0.0560	0.0009	0.4953	0.0082	0.0642	0.0008	450	35	408	6	401	5
D1003-02	236	1347	0.18	0.0549	0.0008	0.4890	0.0077	0.0647	0.0008	407	33	404	5	404	5
D1003-03	205	1163	0.18	0.0552	0.0009	0.4893	0.0081	0.0643	0.0008	421	36	404	6	402	5
D1003-04	172	695	0.25	0.0544	0.0009	0.4837	0.0085	0.0645	0.0008	388	38	401	6	403	5
D1003-05	124	822	0.15	0.0548	0.0009	0.4812	0.0086	0.0637	0.0008	405	39	399	6	398	5
D1003-06	192	793	0.24	0.0557	0.0009	0.4957	0.0085	0.0646	0.0008	439	37	409	6	403	5
D1003-07	240	1417	0.17	0.0555	0.0008	0.4937	0.0076	0.0645	0.0008	432	32	407	5	403	5
D1003-08	200	822	0.24	0.0559	0.0009	0.4932	0.0084	0.0640	0.0008	449	37	407	6	400	5
D1003-09	261	1352	0.19	0.0556	0.0009	0.4907	0.0084	0.0640	0.0008	436	37	405	6	400	5
D1003-10	191	1467	0.13	0.0545	0.0008	0.4497	0.0070	0.0598	0.0008	392	33	377	5	375	5
D1003-11	126	870	0.14	0.0543	0.0009	0.4829	0.0084	0.0645	0.0008	385	38	400	6	403	5
D1003-12	195	1127	0.17	0.0550	0.0009	0.4886	0.0081	0.0645	0.0008	411	36	404	6	403	5

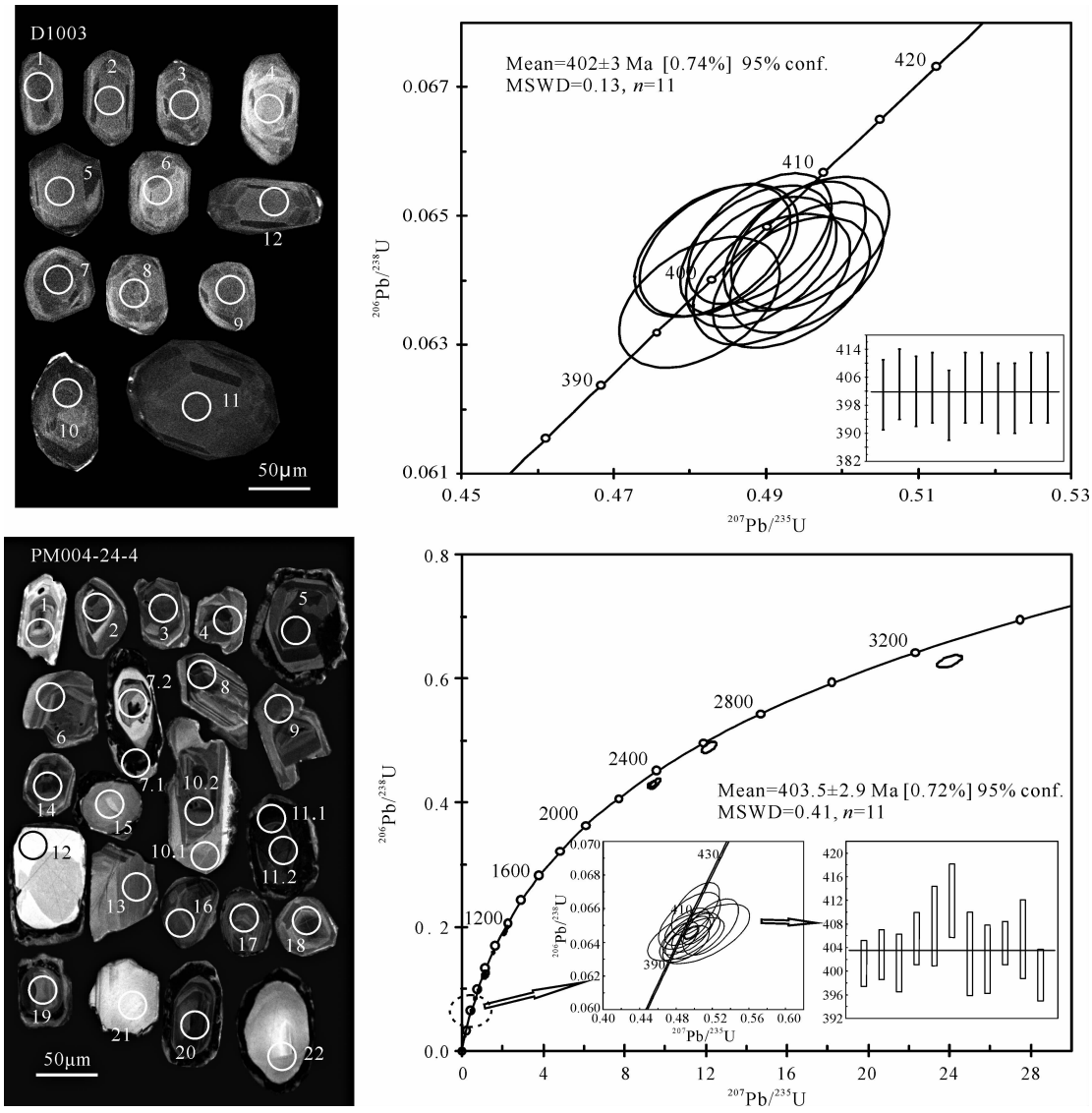

图 5 龙泉俯冲增生杂岩变质基性岩变锆石 CL 图像及锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon CL images and U-Pb concordia diagrams of the metamorphic basic rocks in Longquan subduction accretion complex

类地球化学特征迥异的岩石，其一为具有 OIB 特征的绿片岩，其二为具有岛弧钙碱性火山岩特征的斜长角闪岩，该类样品具有明显的 Nb、Ta 亏损特征；Nie Ganbo et al.（1992）对闽北政和和建瓯一带的马面山群变质岩开展了岩石学和地球化学研究，认为这套岩石为形成于前泥盆纪大洋中脊背景的蛇绿岩；Wang Miao et al.（2007）也对福建政和及建瓯一带的变玄武岩、变安山岩进行了地球化学研究，认为它们可以分为洋岛玄武岩和岛弧玄武岩两种类型。

综上分析表明，龙泉杂岩变基性岩岩块原岩构造背景至少有两种类型，与俯冲消减作用有关的岛弧环境（Ⅰ类），与俯冲无关的 OIB 构造环境（Ⅱ类）。不同构造环境的物质产在一起，且都呈透镜状、布丁状不规则分布，与围岩呈构造接触，佐证了原龙泉岩群实为一俯冲增生杂岩，正是由于发生了俯冲消减作用，才使得不同构造环境下形成的岩石在龙泉一带汇聚在一起，这与江山-绍兴结合带中的陈蔡俯冲增生杂岩的形成过程类似（Dong Xuefa et al.，2016）。

5.2 形成时代

消减俯冲作用在福建政和—浙江龙泉一带形成了俯冲增生杂岩，然而对于这套杂岩的原岩形成时代，未见有报道。本次对两类变质基性岩进行了年代学研究，很遗憾也未能获得原岩形成时代信息，但是获得了两组相近的变质年龄，分别为 402±3Ma 和 404±3Ma，两组年龄在误差范围内几近相同，这

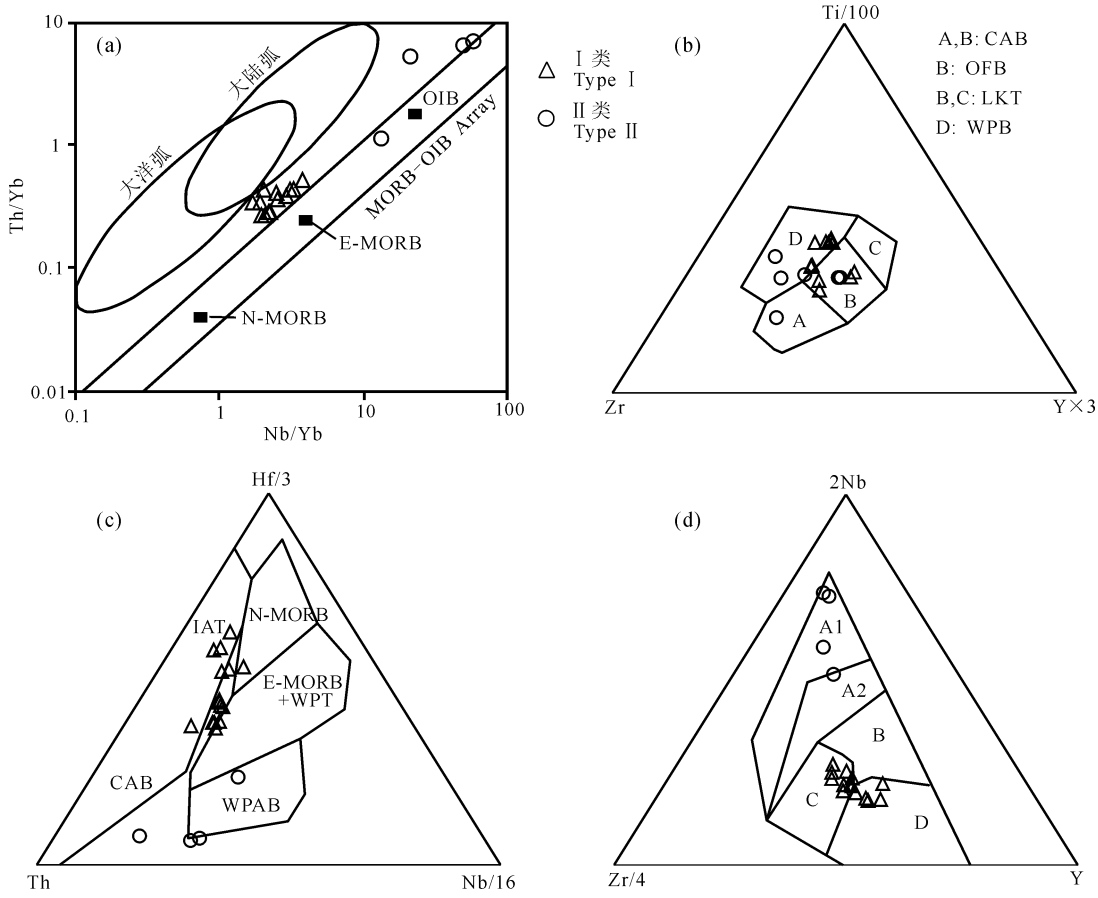

图 6　龙泉杂岩变质基性岩构造环境判别图解

Fig. 6　Tectonic setting discrimination of the metamorphic basic rocks in Longquan complex

(a)—Nb/Yb-Th/Yb 图解(底图据 Pearce,2014);(b)—Ti/100-Zr-Y×3 图解(底图据 Pearce et al.,1973);(c)—Hf/3-Th-Nb/16 三角图解(底图据 Wood,1980);(d)—2Nb-Zr/4-Y 三角图解(底图据 Pearce, 2014);OIB—洋岛玄武岩;N-MORB—N 型洋中脊玄武岩;CAB—岛弧钙碱性玄武岩;OFB—洋底玄武岩;LKT—岛弧低钾拉斑玄武岩;WPB—板内玄武岩;IAT—岛弧拉斑玄武岩;CAB—岛弧钙碱性玄武岩;WPAB—板内碱性玄武岩;WPT—板内拉斑玄武岩;A1+A2—板内碱性玄武岩;A2+C—板内拉斑玄武岩;B—P 型 MORB;D—N 型 MORB;C+D—火山弧玄武岩

(a)—Ta/Yb-Th/Yb diagrams (after Pearce, 1982); (b)—Ti/100-Zr-Y×3 diagrams (after Pearce et al., 1973); (c)—Hf/3-Th-Nb/16 triangular diagrams (after Wood, 1980); (d)—2Nb-Zr/4-Y triangular diagrams (after Pearce, 2014); OIB—oceanic island basalt; N-MORB—N-type mid ocean ridge basalt; CAB—island arc calc-alkaline basalt; OFB—oceanic floor basalt; LKT—island arc low-potassium tholeiite; WPB—intraplate basalt; IAT—island arc tholeiite; WPAB—intraplate alkaline basalt, WPT—intraplate tholeiite; A1 + A2—intraplate alkaline basalt; A2+C—intraplate tholeiite; B—P MORB; D—N MORB; C+D—volcanic arc basalt

组年龄代表了龙泉岩群的峰期变质年龄，表明至少在 404Ma 左右，龙泉地区已经进入板块碰撞造山作用阶段。近年来研究者们在福建马面山群中获得了一批高精度同位素年龄。李武显等(2004)在建瓯叶坑变质流纹岩中获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 818±9Ma；Zhang Xiangxin(2006)分别在建瓯马面山岩群的龙北溪岩组、东岩岩组和大岭岩组的变质火山岩中获得 825.5±9.8Ma、796.5±9.3 和 756.2±7.2Ma 的岩浆锆石年龄；Shu Liangshu et al.(2006,2008)在建瓯、政和等地马面山(岩)群变基性岩块中获得 853±4Ma、797±7Ma 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄。这些年龄信息表明，新元古代可能为龙泉杂岩形成的一个重要时期。笔者也对龙泉杂岩内主要的基质岩石进行了高精度同位素测年(未发表)，其年龄信息较为复杂，碎屑锆石年龄从 530～3580Ma 之间均有分布，但具有明显的两组峰值年龄，分别为 750～1000Ma 的新元古代和 530～700Ma 的新元古代晚期，可能代表了龙泉杂岩基质形成的两个重要时期，而其中最年轻的碎屑锆石年龄 530±6Ma，可以限定龙泉杂岩形成时间晚于该年龄，Chen Linshen(2017)在 3 个龙泉杂岩基质样品中分别获得了 541Ma、523Ma 和 537Ma 三组最年

轻的碎屑锆石年龄，与该年龄特征基本一致。

侵入于龙泉杂岩中的墩头岩体是已知侵入到杂岩中最古老岩体，该岩体地球化学特征显示与 TTG 岩类的相似性，其侵入时代为 443～418Ma(作者未刊资料)，表明龙泉地区在加里东期仍然存在大陆地壳增生，这也进一步证明了晚至加里东期，在龙泉地区还存在大洋板块的持续俯冲，岩体的侵入年龄也限定了龙泉杂岩的形成年龄上限大致为 443Ma。其实华南广泛发育有加里东期的岩浆侵入活动，其峰期为 450～425Ma(Xu Xianbing et al.，2009；Zhu Qingbo et al.，2015)。Xi Wanwan et al.(2019)通过对闽北林屯石英闪长岩体和富美花岗岩体的研究，得出林屯岩体属板块边缘Ⅰ型花岗岩，获得岩体侵入年龄为 433Ma，指出加里东期武夷山地区具有板块构造体制下的俯冲-碰撞造山作用，而富美岩体具有板内 S 型花岗岩特征，可能形成于板块碰撞造山后，得到其侵入年龄为 369Ma，并指出闽北地区加里东期板块碰撞起始年龄分别为 450Ma 和 369Ma。另外在丽水南弄、松阳、安仁一带的龙泉杂岩中也发现了一系列 380～342Ma 的变质年龄信息(Dong Xuefa，2016)，与闽北富美岩体侵入时间相似。这些信息指示龙泉—闽北一带的板块碰撞结束时间应为晚古生代。结合本次获得的 404～402Ma 的龙泉杂岩峰期变质年龄，我们可以进一步限定龙泉杂岩的形成时间应该不晚于 443Ma，而龙泉一带的洋陆俯冲作用结束时限大致为 418～404Ma。

6 结论

(1)龙泉地区的变质基性岩岩块的原岩主要为基性—超基性火成岩，根据岩石野外产出特征以及地球化学特征，至少可以分成两种类型，Ⅰ类主要为拉斑玄武岩系列，少量碱性系列玄武岩，Ⅱ类为碱性玄武岩系列。

(2)岩石稀土元素、微量元素特征表明，Ⅰ类岩石主要形成于与俯冲有关的岛弧构造环境，Ⅱ类岩石形成于与俯冲无关的 OIB 构造环境，不同构造属性的岩块共生的特征佐证了原龙泉岩群变质岩系确属俯冲增生杂岩。

(3)年代学信息表明，龙泉杂岩的形成时代应为早古生代，其中的变质基性岩峰期变质年龄为 404～402Ma。

(4)龙泉俯冲增生杂岩的厘定，对重新认识丽水-余姚断裂带构造属性、区域构造格架的建立以及进一步分析华夏造山系物质组成与结构提供了新资料。

致谢：浙江省地质调查院董学发高工在论文撰写过程中提出诸多宝贵意见，同时感谢匿名审稿专家提出的诸多宝贵审稿意见。

注 释

❶ 浙江省地质调查院. 2015. 江山-绍兴拼合带地质构造研究.
❷ 浙江省地质调查院. 2016. 浙江铉湖、瑞洋区域地质矿产调查.

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1-2): 59～79.

Chen Linshen. 2017. The age and tectonic attribute of the Longquan Group: constraints on the evolution of the Cathvsia Block. Master's thesis of Zhejiang University (in Chinese with English abstract).

Dong Xuefa. 2016. Determination of Chencai subduction accretion complex—Implications for the study of the tectonics of Southern China. PhD thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

Dong Xuefa, Yu Shengqiang, Tang Zengcai, Xiao Qinghui, Yuan Qiang, Chen Zhongda, Zhou Zongyao, Wu Xiaoyong. 2016. Geochemical characteristics of the intra-oceanic arc type metabasic-volcanics in Chencai accretion complex of Zhejiang Province and their geological significance. Geology in China, 43(3):817～828 (in Chinese with English abstract).

Dungan M A, Lindstrom M M, Mcmiland N J. 1986. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico: 1. the petrology and geochemistry of the Servilleta basalt. Journal ofGeophysical Research-Atmospheres, 91: 5999～6028.

Hu Xiongjian, Hu Jinkun, Tong Chaoxu, Chen Chenghua, Ye Guogui. 1992. Geologcal features and tectonic evolution of the Middle Proterozoic LongquanGroup in southern Zhejiang. Regional Geology of China, (1): 22～30 (in Chinese with English abstract).

Jin Song, Zhang Li, Zhong Zengqiu, Zhou Hanwen, Xiang Hua, Zeng Wen, Liu Rui. 2008a. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic metavolcanic rocks in Zhejiang and Fujian Provinces and its geological significance. J. Mineral. Petrol., 28(1):97～105 (in Chinese with English abstract).

Jin Song, Zhang Li, Zhong Zengqiu, Zhou Hanwen, Xiang Hua, Zeng Wen, Liu Rui, Lü Xinqian, Li Chunzhong. 2008b. Geochemical characteristics and geological implications for the Neoproterozoic meta-sedimentary rocks of the Cathaysia block in Zhejiang and Fujian Provinces. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 33(6):764～774 (in Chinese with English abstract).

Lan Chaoli, Li Jiliang, He Shunli, Wei Junzhi. 2002. Nb-Enriched basalts found inMuztag ophiolitic melange, eastern Kunlun Mountain, Xinjiang. Geology and Exploration, (3):55～59 (in Chinese with English abstract).

Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting. Geochimica, 4(37): 382～398 (in Chinese with English abstract).

Li Xianhua, Li Wuxian, He Bin. 2012. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 6(31): 543～559 (in Chinese with English abstract).

Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. American journal of science, 274: 321～355.

Nie Ganbo, Wang Yong. 1992. Geological features of Precambrian

ophiolite in Fujian Province. Geology of Fujian, 11(1):48～59 (in Chinese with English abstract).

Pearce J A. 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites. Elements, 10(2): 101～108.

Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 19(2): 290～300.

Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian Period folded orogenic belt. Geological Journal of China Universities, 12(4):418～431 (in Chinese with English abstract).

Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, Wan Bo, Shen Weizhou, Zhang Yueqiao. 2008. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China. Geological Bulletin of China, 27(10): 1581～1593 (in Chinese with English abstract).

Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archaean supracrustal rocks insouthwestern Finland. Bull. Comm. Geol. Finl., 160: 1～64.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geology Society, London, Special Publication, 42: 313～345.

Wang Miao, Shu Liangshu. 2007. Rock geochemical characteristics of the Neoproterozoic Wuyishan ophiolite mélange. Geology in China, 34(4): 572～583 (in Chinese with English abstract).

Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Quanren, Qin Xiaofeng, Zhang Yingli, Xiang Zhonjin. 2011. The formation age and geochemical characteristics of the metavolcanic rock blocks of the Baishuijiang Group in south Qinling. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 645～656 (in Chinese with English abstract).

Wang Xin, Yang Shufeng, Shi Jianning, Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huafu, Dong Huogen, Xu Jingkong, Kong Hainan, Hu Xiongjian. 1988. Discovery of collisiommelange in Longquan, Zhejiang Province and its significance for siuding collision orogenic belt in southeastern China. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 24(3): 367～378 (in Chinese with English abstract).

Weaver B L. 1991. Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts. Geology, 19: 123～126.

Wilson B M. 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. London: Unwin Hyman, 1～466.

Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325～343.

Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Nb diagram to problems of tectomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of the British Tertiary volcanic provinic. Earth and Planetary Science Letters, (50):11～30.

Xi Wanwan, Chen Shizhong. 2019. Identification of Caledonian granite in the Zhenghe area, FujianProvince and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 93(4): 804～815 (in Chinese with English abstract).

Xiang Hua, Zhang Li, Zhou Hanwen. 2008. Study onzircon U-Pb age and Hf isotope of the basic-ultrabasic metamorphic rocks of the metamorphic basement in Southwest Zhejiang: The metamorphic basement of Cathaysia block response to the orogenesis of South China in Indo-Chinese Epoch. Science in China (Series D), 38(4): 401～413 (in Chinese with English abstract).

Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liangshu, Jia Dong, Wang Ruirui, Xu Huaizhi. 2009. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in Southwest Fujian and the Changpu migmatite in South Jiangxi: Constrains to the timing of Caledonian Movement in Wuyi Mountains. Geological Review, 55(2): 277～285 (in Chinese with English abstract).

Yang Jing, Wang Jinrong, Zhang Qi, Chen Wanfeng, Pan Zhenjie, Du Xueliang, Jiao Shaotao, Wang Shuhua. 2016. Global IAB data excavation: The performance in basalt discrimination diagrams and preliminary interpretation. Geological Bulletin of China, 35(12): 1937～1949 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan, Jia Xiuqin, Han Song. 1999. Geochemistry ofophiolites. Geological Review, 45(sup.): 101～107 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiangxin. 2006. Study of formation of the Neoproterzoic Mamianshan Group and its evolution of deformation in central Fujian Province, SE China. PhD thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

Zhao Jianxin, Li Xianhua, McCulloch M T, Zhou Guoqing, Xing Fengming. 1995. Petrogenesis ofophiolites from South Anhui and Northeast Jiangxi, and their tectonic implications: Chemical and Sm-Nd isotopic constraints. Geochimica, 24(4):311～326 (in Chinese with English abstract).

Zhou Liya, Wang Henian, Sun Chengyuan. 2001. Trace element geochemistry and tectonic setting for Proterozoic metavolcanics of the Mamianshan Group in the central part of Fujian Province. Geological Journal of China Universities, 7(2): 164～174 (in Chinese with English abstract).

Zhu Qingbo, Huang Wencheng, Meng Qingxiu, Zhang Chuanlin. 2015. Caledonian tectonic event of Cathaysia block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope for two kinds of granite. Geology in China, 42(6): 1715～1739 (in Chinese with English abstract).

Бапащов Ю А, Кременепкий А А, Цгвеп ВМ. 1972. Геохимические Критсрйи Природи Докмбрийских Амфиболмтов. Геохимкн, 11: 1358～1371.

参　考　文　献

陈林燊. 2017. 龙泉群形成时代与构造属性及对华夏地块演化的限定. 浙江大学硕士学位论文.

陈先沛，陈多福，董维全. 1993. 浙江龙泉含磁铁石英岩的成因、铅等时线及构造环境. 见：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.

董学发. 2016. 浙江陈蔡俯冲增生杂岩的厘定—对华南大地构造研究的启示. 中国地质大学(北京)博士学位论文.

董学发，余盛强，唐增才，肖庆辉，袁强，陈忠大，周宗尧，吴小勇. 2016. 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. 中国地质，43(3):817～828.

郭令智，施央申，马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质学术论文集(一). 北京：地质出版社.

胡雄健，徐金坤，童朝旭，等. 1991. 浙西南前寒武纪地质. 北京：地质出版社.

胡雄健，徐金坤，童朝旭，陈程华，叶国贵. 1992. 浙南中元古界龙泉群的地质特征及构造演化. 中国区域地质，(1):22～30.

靳松，张利，钟增球，周汉文，向华，曾雯，刘锐. 2008a. 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. 矿物岩石，28(1):97～105.

靳松，张利，钟增球，周汉文，向华，曾雯，刘锐，吕新前，李春总. 2008b. 浙闽地区华夏地块新元古代变沉积岩地球化学特征及其地质意义. 地球科学-中国地质大学学报，33(6):764～774.

兰朝利，李继亮，何顺利，魏俊之. 2002. 新疆东昆仑木孜塔格蛇绿混杂岩中发现富 Nb 玄武岩. 地质与勘探，(3):55～59.

李武显，李献华，李正祥. 2004. 华夏地块新元古代板内裂谷型双峰式火山岩：锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义. 2004 年全国岩石学与地球动力学研讨会，105～106.

李献华，王选策，李武显，李正祥. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义：从造山运动到陆内裂谷. 地球化学，4(37): 382～398.

李献华，李武显，何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报，6(31):543～559.

聂淦波，王勇. 1992. 福建前泥盆纪蛇绿岩物质成分的研究. 福建地质，11(1):48～59.

水涛，徐步台，梁冠华，等. 1988. 中国浙闽变质基底. 北京：科学

出版社.
舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4):418～431.
舒良树, 于津海, 贾东, 王博, 沈渭洲, 张岳桥. 2008. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 27(10): 1581～1593.
王淼, 舒良树. 2007. 武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征. 中国地质, 34(4):572～583.
王涛, 王宗起, 闫全人, 闫臻, 覃小锋, 张英利, 向忠金. 2011. 南秦岭白水江群变基性火山岩块体的形成时代及其地球化学特征. 岩石学报, 27(3):645～656.
汪新, 杨树峰, 施建宁. 1988. 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. 南京大学学报(自然科学版), 24(3):367～378.
隰弯弯, 陈世忠. 2019. 福建政和地区加里东期花岗岩的厘定及其大地构造意义. 地质学报, 93(4):804～815.
向华, 张利, 周汉文. 2008. 浙西南变质基底基性—超基性变质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究:华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应. 中国科学 D 辑:地球科学, 38(4):401～413.
徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 贾东, 王瑞瑞, 徐怀智. 2009. 闽西南玮埔岩体和赣南菖蒲混合岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学:对武夷山加里东运动时代的制约. 地质论评, 55(2):277～285.
杨婧, 王金荣, 张旗, 陈万峰, 潘振杰, 杜雪亮, 焦守涛, 王淑华. 2016. 全球岛弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图上的表现及初步解释. 地质通报, 35(12):1937～1949.
张旗, 钱青, 王焰, 贾秀琴, 韩松. 1999. 蛇绿岩的地球化学研究. 地质论评, 45(增刊):101～107.
张祥信. 2006. 闽中地区新元古代马面山群的形成及构造变形演化研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
赵建新, 李献华, McCulloch M T, 周国庆, 邢凤鸣. 1995. 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. 地球化学, 24(4):311～326.
周丽娅, 王鹤年, 孙承辕. 2001. 闽中马面山群变质火山岩微量元素地球化学特征及其构造意义. 高校地质学报, 7(2):164～174.
朱清波, 黄文成, 孟庆秀, 张传林. 2015. 华夏地块加里东期构造事件:两类花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素制约. 中国地质, 42(6):1715～1739.

Geochronological and geochemical characteristics of the metamorphic basic rocks and their tectonic implications in the Longquan area, Zhejiang Province

LIU Yuandong*[1)], LIU Fenglong[1)], ZHANG Jianfang[1)], LI Xiang[1)], XU Lei[1)], WEN Xubin[2)], NI Weiwei[1)]

1) *Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou*, 311203;

2) *Zhejiang Province Industrial EP Design & Research Institute Co. Ltd, Hangzhou*, 311203

* *Corresponding author*: *lyd*661106@163.*com*

Abstract

The formation age, diagenetic, and tectonic attributes of a set of medium-deep metamorphic rock series exposed in the Longquan area, southwestern Zhejiang Province, an important component of the Cathaysian massif, remains controversial. Based on petrogeochemical studies of the metabasites from the Longqun metamorphic rocks, the diagenetic tectonic environments of these rocks can be divided into at least two types. Type Ⅰ rocks have the same REE distribution curves and spider diagram of trace element with IAB. The trace element ratio and discrimination diagrams indicate that these rocks were formed in an island arc setting which was related to subduction. Type Ⅱ rocks have the same REE distribution curves and spider diagram of trace element with OIB. The trace element ratio and discrimination diagrams indicate that these rocks were formed in a within-plate tectonic environment which were not relevant to the subduction. The rocks symbiosis of different tectonic attributes proves that the original Longquan Group is a subduction accretion complex. The zircon U-Pb dating of metabasites yielded the peak metamorphic ages between 404～402 Ma. This provides new data for reevaluatingthe tectonic attributes of the Lishui-Yuyao fault zone, the establishment of the regional tectonic framework, and the further analysis of the material composition and structure of the Cathaysian orogenic system.

Key words: metabasites; geochemistry; subduction-accretion complex; Early Paleozoic; Longquan