第35卷 第3期
2016年5月
岩 石 矿 物 学 杂 志
ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA
Vol. 35, No. 3: 425~442
May, 2016

陈蔡岩群下河图斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其构造意义

王存智,姜 杨,赵希林,邢光福,高天山,靳国栋,杨 东
(中国地质调查局 南京地质调查中心,江苏 南京 210016)

摘 要:浙江诸暨市下河图村的陈蔡岩群中出露一套斜长角闪岩,空间上与块状大理岩相伴产出。地球化学研究表明,下河图斜长角闪岩 SiO_2 含量为43.22%~46.56%,MgO为3.23%~7.87%,TiO_2 为1.90%~2.98%,与碱性洋岛玄武岩特征类似。稀土元素总量为 $114.47\times10^{-6}\sim192.39\times10^{-6}$,$(La/Yb)_N$ 为5.93~12.13,稀土元素球粒陨石标准化配分模式为轻稀土元素富集的右倾型;原始地幔标准化微量元素蛛网图表现出向上隆起的富集形态,微量元素特征表明其可能形成于洋岛构造环境,陆壳物质对其混染的可能性较小,岩石成分主要受熔融源区控制。推测下河图斜长角闪岩原岩很可能形成于靠近消减带的海山环境,来源于洋壳俯冲过程中增生的海山碎片,陈蔡岩群很可能为一套俯冲增生杂岩。LA-ICP-MS锆石U-Pb法获得斜长角闪岩变质年龄为420.6±1.8 Ma,可能代表了扬子和华夏两大地块碰撞拼合的时代。

关键词:洋岛玄武岩;斜长角闪岩;俯冲增生杂岩;陈蔡岩群;加里东期
中图分类号:P588.3;P597^{+}.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-6524(2016)03-0425-18

Geochronological and geochemical characteristics of the Xiahetu amphibolites from Chencai Group and their tectonic implications

WANG Cun-zhi, JIANG Yang, ZHAO Xi-lin, XING Guang-fu, GAO Tian-shan, JIN Guo-dong and YANG Dong
(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: A suite of amphibolites associated with marble from Chencai Group is exposed at Xiahetu Village in Zhuji County of Zhejiang Province. Detailed geological and geochemical studies were carried out on the Xiahetu amphibolites. The SiO_2 content of the amphibolites ranges from 43.22% to 46.56%, MgO content ranges from 3.23% to 7.87% and TiO_2 content ranges from 1.90% to 2.98%. All these geochemical features are similar to the average value of oceanic island basalt (OIB). Moreover, the major elements characteristics of the amphibolite suggest that it belongs to the alkali basalt series. The total REE values of the amphibolite range from 114.47×10^{-6} to 192.39×10^{-6}, and $(La/Yb)_N$ ratios range from 5.93 to 12.13. The chondrite-normalized REE patterns show right-inclined shape, which suggests the enrichment of LREE. The primitive mantle normalized trace element spider diagram shows obvious uplift, which is also similar to the feature of oceanic island basalt. Some tectonic discrimination diagrams suggest that Xiahetu amphibolites were formed in an oceanic island tectonic environment. Petrogenetic research shows that the protolith of the amphibolite had experienced a little

收稿日期:2015-06-16;**接受日期**:2015-11-20
基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120114005801,12120113070800)
作者简介:王存智(1983-),男,助理研究员,主要从事构造地质学研究,E-mail:32107407@qq.com;通讯作者:赵希林(1980-),男,副研究员,从事中生代岩浆作用与成矿作用研究,E-mail:zxl24@126.com。

crust contamination during the magmatic events. So the geochemical features of the amphibolite can be used to infer its original mantle features. It is held that the protolith of the Xiahetu amphibolits possibly formed in a marine volcanic geological setting near the subduction zone and sourced from the seamount fragments accretion during the subduction of the oceanic crust. Thus rocks in Chencai Group are probably a suite of subduction-accretionary complexes. U-Pb dating results of zircons in the amphibolite yield a mean age of 420.6±1.8 Ma which represents the metamorphic time of its protolith. In conjunction with other field evidence, the authors consider that the amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks was completed in Caledonian.

Key words: OIB; amphibolite; subduction-accretionary complex; Chencai Group; Caledonian

Fund support: China Geological Survey Project (12120114005801, 12120113070800)

华南板块由扬子和华夏两个地块组成,两者沿江山-绍兴断裂发生拼合(图1a),已经得到中国大多数地质学家的认可。但关于它们之间最初碰撞拼合的时限却长期存在争议,有学者认为碰撞发生于中元古代末(水涛等,1986)或青白口纪(约0.9~1.0 Ga)(舒良树,2012),也有研究者认为碰撞拼合时间可以迟至820 Ma甚至更晚(Zhou *et al*., 2002; Wang *et al*., 2006; Zheng *et al*., 2007; 李献华等, 2012),还有学者则认为碰撞时间为加里东期(Guo *et al*., 1989; Chen and Rong, 1999; Gu *et al*., 2002)。

作为华夏地块变质基底的窗口,沿江山-绍兴断裂带出露的浙西南陈蔡岩群备受关注。自20世纪70年代以来,国内外地质学者对陈蔡岩群开展了一系列的研究工作,这些研究涵盖了地质学、地球化学、同位素年代学等方面,并取得了一系列的认识(胡雄健等, 1991; 陈迪云等, 1991, 1993, 1994; 李福佩等, 1991; 孔祥生等, 1994, 1995; 叶瑛等, 1994, 1995; 赵国春等, 1994a, 1994b; 兰玉琦等, 1995),特别是同位素测年方面,更是积累了丰硕的成果(表1)。从这些年龄资料来看,陈蔡岩群原岩形成时代跨度较大,从古元古代到古生代均有分布,但其主体形成于新元古代,主要经历了加里东期变质,且为其主变质期。

陈蔡岩群中斜长角闪岩多与其他岩类共生,多呈团块状产出。前人对陈蔡岩群中斜长角闪岩的研究存在不同的认识。如叶瑛等(1994)认为存在正岩系和副岩系两种不同类型的斜长角闪岩,其中副岩系原岩为富铁镁质泥灰岩,正岩系原岩为洋中脊玄武岩;孔祥生等(1995)认为陈蔡岩群斜长角闪岩形成于成熟岛弧环境;陈绍海等(1999)则认为斜长角闪岩原岩形成于岛弧和洋岛两种环境。可见,对于陈蔡岩群中斜长角闪岩的成因和环境还存在较大的争论,这直接制约了陈蔡岩群构造属性的认识,也限制了对华南大地构造格局的研究。

浙江诸暨地区下河图村陈蔡岩群斜长角闪岩与大理岩共生,本文以这些斜长角闪岩为研究对象,从岩石学、岩石地球化学、年代学研究入手,研究其物质组成及其形成的大地构造环境,以期为陈蔡地区洋陆格架的恢复重建及华南大地构造演化提供基本信息。

1 地质背景与样品描述

陈蔡岩群变质岩主体分布于绍兴-江山断裂带与余姚-丽水断裂带之间的浙江省诸暨境内,另外在新昌—嵊州一带也有出露。但是该区由于白垩纪火山岩发育,加之后期断裂的严重破坏,区内的陈蔡岩群多呈小的断块或构造窗的形式分布(图1b),出露较为零星(浙江省地质矿产局,1996)。陈蔡岩群主要岩石类型有石榴黑云斜长片麻岩、变粒岩、浅粒岩、云母片岩、斜长角闪岩及大理岩,整体为一套中压角闪岩相变质岩系,变质温度为550~700℃,压力为400~800 MPa(陈迪云等,1993)。孔祥生等(1995)将陈蔡岩群自下而上划分为捣臼湾组、下河图组、下吴宅组和徐岸组4个组,其中主要出露捣臼湾组斜长角闪岩和石英岩;下河图组以角闪质岩类为主,夹大理岩;下吴宅组岩性包括辉石斜长角闪岩、角闪变粒岩、斜长角闪岩和黑云二长变粒岩、斜长变粒岩等;徐岸组以夕线铁铝榴石黑云斜长变粒岩为主。陈蔡岩群经受了多期变形变质改造,其原始固有的地层特征已经发生明显改变。

本次研究的斜长角闪岩采集于陈蔡镇下河图村,属陈蔡岩群下河图组。露头为一采石坑,剖面呈一半圆形的弧形面,主体为一套斜长角闪岩与大理岩组合,两者间接触面参差不齐,为突变接触关系(图1c)。在斜长角闪岩中还可见花岗岩脉侵入。

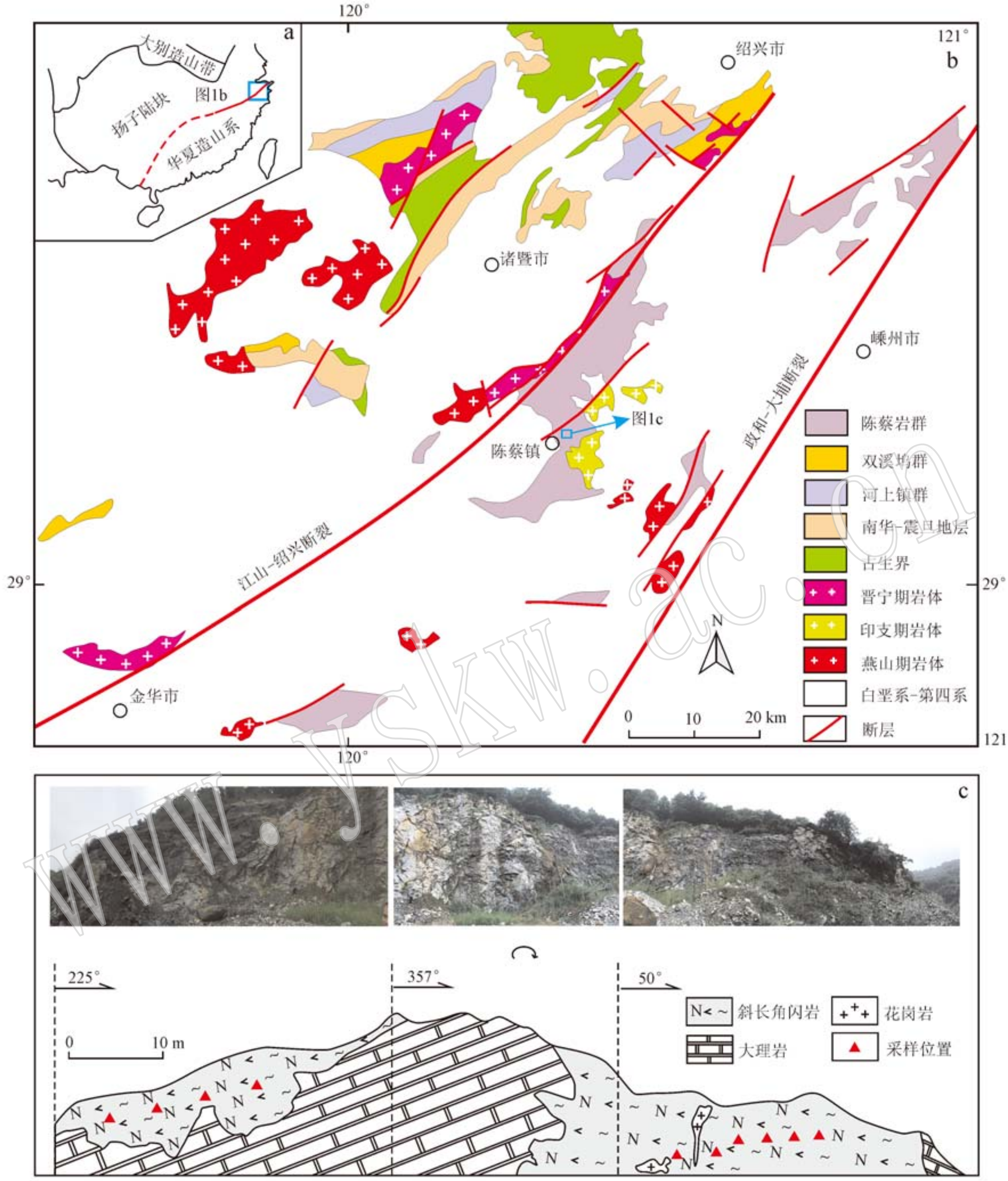

图 1　浙江陈蔡岩群地质简图

Fig. 1　Geological sketch map of the Chencai Group in Zhejiang Province

a—研究区大地构造位置；b—区域地质简图；c—下河图与大理岩伴生的斜长角闪岩剖面图

a—schematic tectonic map of South China showing the location of the study area; b—geological map of the Chencai Group; c—geological section of the amphibolites associated with marble in Xiahetu area

斜长角闪岩手标本呈灰黑色，块状构造，暗色的黑云母条带与浅色长英质相间排列，暗色矿物约占30%～40%。镜下见粒状变晶结构（图 2），主要矿物为角闪石和斜长石，略具定向性。其中角闪石为绿-黄褐色，它形粒状或柱状，粒径 0.1～0.5 mm，在斜长石之间呈半包围状镶嵌，偶见铁质析出，含量 40%～60%；斜长石它形粒状（0.1～0.3 mm），少部分见聚片双晶，含量 40%～50%。副矿物主要为锆石、榍石及磁铁矿等。

表 1　陈蔡岩群同位素年龄数据

Table 1　Geochronological analytical results for the Chencai Group

地点及岩性	测年方法	同位素年龄/Ma	其它	资料来源
诸暨丁家坞剖面陈蔡变质岩	全岩 Rb-Sr	901		赵明德等(1983)
诸暨陈蔡群变质岩	锆石 U-Pb	1 438±122		水涛(1987)
陈蔡群片麻岩	Sm-Nd	1 459		程海(1991)
陈蔡群片麻岩	Sm-Nd	1 330		程海(1991)
诸暨陈蔡变质岩	角闪石$^{40}Ar/^{39}Ar$法	415.1	主变质晚期的冷却年龄	叶瑛等(1994)
义务尚阳陈蔡群变质岩	角闪石$^{40}Ar/^{39}Ar$法	315.3		叶瑛等(1994)
诸暨陈蔡斜长角闪岩	Rb-Sr 等时线	1 129±23		孔祥生(1995)
陈蔡丁家坞花岗闪长岩	单锆石 U-Pb 法	1 754±40		孔祥生(1995)
诸暨陈蔡斜长角闪岩	单锆石蒸发 U-Pb 法	1 946±3		孔祥生(1995)
诸暨丁家坞花岗闪长岩	单锆石蒸发 U-Pb 法	782±4		孔祥生(1995)
陈蔡群角闪岩(原岩为辉长岩)	SHRIMP 锆石 U-Pb	1 781±21	上交点,成岩年龄	Li 等(2010)
陈蔡群角闪岩(原岩为辉长岩)	SHRIMP 锆石 U-Pb	454±29	下交点,变质年龄	Li 等(2010)
陈蔡群角闪岩中的角闪石	SHRIMP 锆石 U-Pb	422.4±5.1	MSWD=6.6	Li 等(2010)
陈蔡群片麻状花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	435±4	MSWD=0.56,岩浆结晶年龄	Li 等(2010)
陈蔡群绿片岩相流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	838±5	MSWD=0.54	Li 等(2010)
陈蔡群石榴片麻岩(原岩为泥岩)	SHRIMP 锆石 U-Pb	950～660	峰值 820 Ma	Li 等(2010)
陈蔡群石榴片麻岩(原岩为泥岩)	SHRIMP 锆石 U-Pb	447±7	Th/U=0～0.02,MSWD=0.8	Li 等(2010)
陈蔡群石榴片麻岩(原岩为泥岩)	SHRIMP 锆石 U-Pb	1 148	Th/U=0.01	Li 等(2010)
陈蔡群混合岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2 700～2 200	4 颗捕虏锆石	Li 等(2010)
陈蔡群混合岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	433±3	变质锆石(MSWD=0.98)	Li 等(2010)
陈蔡下吴宅斜长角闪片麻岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	435±4	变质年龄	胡艳华等(2011)
陈蔡岩群角闪片麻岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	879±10		Yao 等(2013)
陈蔡岩群混合岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	438±3		Yao 等(2013)
陈蔡岩群辉长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	453.2±3.5		Yao 等(2013)
陈蔡岩群片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	848～845	锆石核部	高林志等(2014)
陈蔡岩群片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	431	锆石增生边	高林志等(2014)
陈蔡岩群苏长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	422 ± 2	结晶年龄	Zhao 等(2015)
陈蔡岩群基性麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	437±3,437±4,438±2	麻粒岩相变质年龄	Zhao 等(2015)
陈蔡岩群含石榴石斜长角闪岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	435±3	角闪岩相变质年龄	Zhao 等(2015)
陈蔡岩群斜长角闪岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	445±5, 449±4	基性岩浆年龄及角闪岩相变质年龄	Zhao 等(2015)
陈蔡岩群黑云斜长角闪岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	436±3	角闪岩相变质年龄	Zhao 等(2015)
下河图斜长角闪岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	420.6±1.8	变质年龄	本文

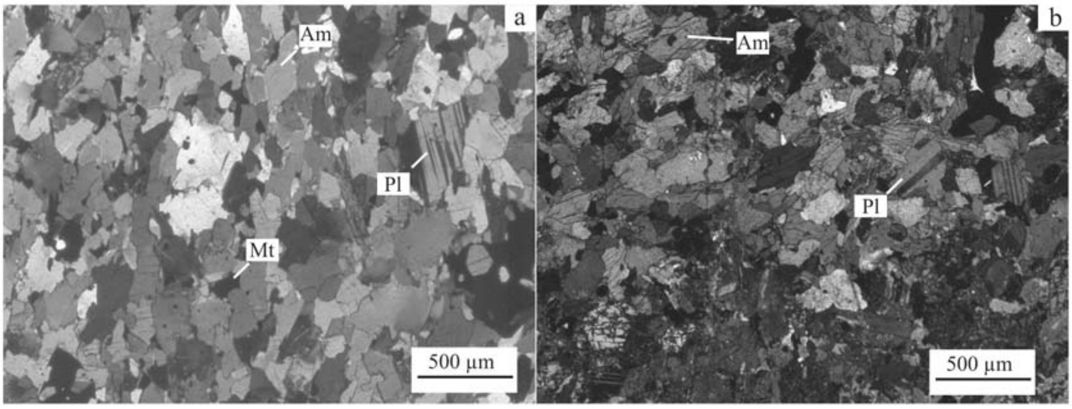

图 2　斜长角闪岩代表性显微照片(正交偏光)

Fig. 2　Photomicrographs of the representative amphibolites in Xiahetu area

Am—角闪石；Pl—斜长石；Mt—磁铁矿

Am—amphibole；Pl—plagioclase；Mt—magnetite

2　分析方法

本次研究共选取 10 个新鲜斜长角闪岩样品进行全岩地球化学分析,包括主量元素、稀土元素和微量元素分析。实验在国家地质实验测试中心完成,其中主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定(仪器型号:PE300D),并采用等离子光谱和化学法测定进行互检。微量元素和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定(型号:PW4400),同时分析 2 个国家标样(GSR3 和 GSR5)和 3 个平行样以保证分析结果的准确度。

锆石分选在廊坊市宇能岩石矿物分选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。选取代表性颗粒在北京锆年领航科技有限公司制靶,并采用阴极发光(CL)照相对锆石内部结构进行研究。

锆石原位 U-Pb 同位素年龄及 Hf 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心(天津地质矿产研究所)完成,分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 193 激光剥蚀系统。锆石 U-Pb 定年激光剥蚀束斑直径为 35 μm,激光剥蚀样品的深度为 20～40 μm,能量密度为 13～14 J/cm^2,频率为 8～10 Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune(MC-ICP-MS)。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标。元素含量采用人工合成硅酸盐玻璃 NIST SR610 作为外标、^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal 4.3 程序(Liu *et al*., 2008, 2010),并采用软件对测试数据进行普通铅校正(Andersen, 2002),年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT(3.0)(Ludwig, 2003)软件完成。详细的分析方法和流程见侯可军等(2009)。

3　地球化学特征

下河图斜长角闪岩样品的主量、微量分析数据见表 2。10 件样品总的 SiO_2 含量较低,介于 43.22%～46.56%之间;Na_2O 为 2.47%～4.43%;MgO 为 3.23%～7.87%,平均为 6.29,MgO 含量的变化可能与岩石的不均一有关;K_2O 含量变化较大,为 0.43%～1.68%,可能反映岩石后期蚀变较强,与薄片观察结果一致;TiO_2 为 1.90%～2.98%,平均值为 2.55%,接近于碱性洋岛玄武岩(平均值为 2.90%)。Mg$^{\#}$值在 32～59 之间,低于原生玄武质岩浆范围(Mg$^{\#}$ = 68～75, Wilson, 1989; 路凤香等, 2002),表明岩浆可能经历了一定程度的分离结晶作用。

变基性岩石的 MgO、CaO、FeO 含量对其原岩具有较好的指示意义。在 MgO - CaO - FeO 图解中,陈蔡岩群 10 件斜长角闪岩样品投影点全部落在正斜长角闪岩区域内(图 3)。REE 和高场强元素(HFSE)受后期变质改造作用的影响较小,可以用来作为变质岩原岩恢复的依据。在 TiO_2 - Zr/P_2O_5 图解中,下河图斜长角闪岩落入碱性系列区域(图 4a),在不活动元素岩石分类图解 Zr/TiO_2 - Nb/Y(图 4b)中,样品落在碱性玄武岩区域内,显示下河图斜长角闪岩原岩可能为碱性玄武岩。

表 2 下河图斜长角闪岩主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 2 Major($w_B/\%$), trace and rare earth($w_B/10^{-6}$) elements compositions of the amphibolites in Xiahetu area

样品号	S201-18	S201-19	S201-20	S201-21	S201-22	S201-23	S202-16	S202-17	S202-18	S202-19
SiO_2	45.71	43.22	44.85	45.99	45.58	44.43	44.86	44.25	45.38	46.56
Al_2O_3	14.31	15.89	15.74	15.22	15.25	15.76	15.19	16.41	16.00	15.55
CaO	10.43	9.15	9.45	7.69	9.30	10.20	9.96	5.19	7.64	8.98
Fe_2O_3	7.84	5.37	4.41	5.85	5.69	4.82	4.66	6.04	5.76	3.15
FeO	7.65	9.20	10.09	8.59	8.59	9.09	8.95	9.02	9.12	8.69
K_2O	1.68	0.96	0.94	0.74	0.88	1.06	0.43	1.31	0.25	1.12
MgO	3.23	6.93	6.04	6.12	5.89	6.15	6.77	7.35	6.55	7.87
MnO	0.12	0.20	0.19	0.17	0.19	0.19	0.15	0.16	0.18	0.18
Na_2O	2.47	3.13	3.25	4.11	3.51	2.96	3.78	3.47	4.43	3.31
P_2O_5	0.35	0.34	0.37	0.37	0.33	0.40	0.33	0.35	0.37	0.40
TiO_2	2.98	2.63	2.61	2.52	2.53	2.58	2.53	2.61	2.62	1.90
CO_2	0.51	0.39	0.09	0.32	0.26	0.29	0.21	0.51	0.09	0.21
H_2O^+	2.04	1.96	1.32	1.70	1.46	1.42	1.56	2.86	0.96	1.48
LOI	1.88	1.53	0.66	1.28	1.13	1.06	1.24	2.23	0.41	1.03
Total	101.20	100.90	100.01	100.67	100.59	100.41	100.62	101.76	99.76	100.43
FeO^T	14.71	14.03	14.06	13.86	13.71	13.43	13.14	14.46	14.30	11.53
$Mg^{\#}$	32	51	47	48	47	49	52	52	49	59
Li	7.80	20.80	13.20	18.40	13.10	12.50	8.28	46.8	8.92	18.60
Be	1.41	0.92	1.28	1.35	1.26	1.23	1.51	1.49	1.46	1.54
Cr	9.48	24.20	22.80	22.10	23.60	28.00	23.40	22.20	33.10	375.00
Co	38.4	63.3	69.2	58.4	65	59.5	58.9	59.3	60.7	54.3
Ni	54.6	87.5	85.8	83.0	83.3	83.8	81.6	79.2	79.7	112.0
Ga	22.1	22.7	23.8	21.9	20.7	22.4	21.8	23.0	22.1	21.5
Rb	33.20	28.40	12.80	18.50	20.00	24.20	7.58	37.70	3.44	28.50
Sr	315	318	300	302	343	339	261	187	219	343
Mo	0.18	0.11	0.44	0.56	0.41	0.76	0.41	0.89	0.46	0.42
Cd	0.14	0.17	0.14	0.10	0.13	0.14	0.13	0.11	0.13	0.15
In	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.07
Cs	3.03	1.33	0.75	1.23	1.02	1.45	0.54	3.82	0.28	1.22
Ba	346.0	205.0	159.0	156.0	171.0	204.0	97.3	281.0	47.5	332.0
Tl	0.09	0.09	<0.05	0.07	0.07	0.08	<0.05	0.1	<0.05	0.06
Pb	4.64	4.55	4.67	2.07	3.47	3.89	3.86	3.51	2.42	4.95
Bi	0.09	0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.06	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Th	3.36	1.27	2.69	2.87	1.63	2.65	2.44	2.97	2.26	3.57
U	0.78	0.19	0.41	0.43	0.32	0.43	0.46	0.46	0.49	0.62
Nb	34.3	25.7	27.6	27.8	24.8	25.9	24.3	26.5	26.5	23.3
Ta	2.59	1.83	1.83	1.76	1.81	1.89	1.68	1.80	1.88	1.50
Zr	232	173	204	206	167	194	190	208	200	177
Hf	5.33	4.28	4.61	4.94	4.09	4.61	4.38	5.02	4.70	4.17
Sn	2.71	2.26	2.42	2.27	2.18	2.37	2.27	2.27	2.35	2.22
Sb	0.44	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11	0.21	0.07	0.13
Ti	18 852	16 304	16 441	16 132	16 279	16 007	15 731	16 016	16 350	13 051
V	342	232	230	219	215	214	223	212	229	242
La	32.1	21.1	22.5	21.7	17.6	23.7	22.4	17.9	22.3	32.3
Ce	84.9	47.9	48.6	46.8	41.4	49.7	47.6	41.2	49.2	79.9
Pr	8.71	6.28	6.40	6.13	5.69	6.52	6.26	5.40	6.33	8.26
Nd	32.8	31.4	30.3	29.8	27.4	30.5	29.5	25.1	28.9	30.2
Sm	8.19	6.66	6.55	6.72	6.27	6.60	6.23	5.68	6.16	6.88
Eu	2.68	2.20	2.24	2.06	1.96	2.05	2.14	1.90	2.18	2.15
Gd	7.69	6.83	7.08	6.81	6.40	6.82	6.60	5.91	6.56	6.40
Tb	1.20	1.08	1.07	1.07	0.97	1.06	0.99	0.89	0.98	0.98
Dy	6.48	5.73	5.88	5.62	5.40	5.85	5.56	4.67	5.44	5.09
Ho	1.16	1.03	1.05	1.03	0.97	1.07	0.98	0.85	0.99	0.90
Er	3.22	3.01	2.9	2.94	2.72	2.95	2.82	2.49	2.90	2.53
Tm	0.41	0.37	0.36	0.37	0.33	0.38	0.35	0.30	0.35	0.30
Yb	2.48	2.27	2.32	2.28	2.13	2.29	2.26	1.90	2.23	1.91
Lu	0.37	0.36	0.33	0.33	0.32	0.35	0.32	0.28	0.32	0.29
Sc	18.3	21.9	22.6	21.1	21.3	21.1	21.0	20.6	21.5	22.7
Y	29.7	27.7	28.6	28.0	26.0	27.3	26.2	21.5	26.5	22.9
$\sum$REE	192.39	136.22	137.58	133.66	119.56	139.84	134.01	114.47	134.84	178.09
$(La/Yb)_N$	9.28	6.67	6.96	6.83	5.93	7.42	7.11	6.76	7.17	12.13
δEu	0.95	0.93	1.01	0.98	0.98	0.94	1.01	0.98	1.00	0.97
Nb/La	1.07	1.22	1.23	1.28	1.41	1.09	1.08	1.48	1.19	0.72
Th/Ta	1.30	0.69	1.47	1.63	0.90	1.40	1.45	1.65	1.20	2.38

注：$FeO^T = FeO + Fe_2O_3 * 0.9$；$Mg^{\#} = [Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+})] * 100$。

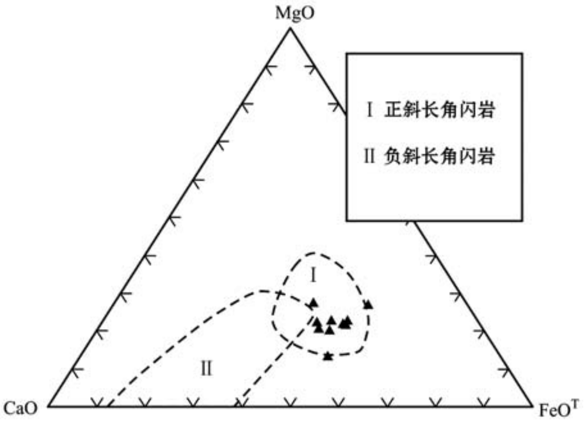

图3 下河图斜长角闪岩 MgO－CaO－FeO^T 图解（Misra，1971）

Fig. 3 MgO－CaO－FeO^T diagram of amphibolites in Xiahetu area (after Misra，1971)

陈蔡岩群10件斜长角闪岩样品的稀土元素总量（∑REE）中等，介于 $114.47\times10^{-6}\sim192.39\times10^{-6}$之间。在球粒陨石标准化REE配分模式图(图5a)上，所有样品均表现出富集轻稀土元素（LREE）的右倾型配分模式，代表轻重稀土元素分馏程度的 $(La/Yb)_N$ 值介于5.93～12.13之间，轻重稀土元素分馏程度较强；而轻、重稀土元素内部之间分馏程度不强，$(La/Sm)_N=1.81\sim3.03$，$(Gd/Lu)_N=2.34\sim2.73$；δEu值范围为0.93～1.01，无明显的Eu异常，暗示着岩浆形成和演化过程中没有发生斜长石的分离结晶作用。

在不相容元素原始地幔标准化蛛网图（图5b）上，陈蔡岩群10件样品都表现出类似于OIB的不相容元素配分型式，高场强元素（Nb、Ta、Zr、Hf和Ti）没有明显的负异常；反映源区特征的Nb/La平均值为1.18，Th/Ta平均值为1.41，与典型OIB的Nb/La、Th/Ta值相一致（Sun and McDonough，1989）。

4 锆石U-Pb年龄

采自下河图斜长角闪岩样品S202-1的锆石U-Pb定年结果见表3。斜长角闪岩中锆石呈半透明到透明状，多为透明状，颜色以浅褐色为主。锆石晶体颗粒不完整，大多数呈混圆状，少数为短柱状，长度一般50～100 μm。锆石阴极发光图像（CL）中，锆石主要呈扇形、面状及斑杂状分带，少数无环带现象，明显不同于岩浆锆石，而具有典型变质锆石的CL图像特征（图6）。本次研究对样品中的24颗锆石进行了LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素测定。测试结果显示，24个锆石测点中除9、16和21号点明显向右偏离谐和线、显示有铅丢失外，其余21个点的Th/U值为0.06～0.51，大部分小于0.4，符合变质锆石的特征（Wu and Zheng，2004），且均具有谐和的 $^{207}Pb/^{236}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄；21个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 420.6 ± 1.8 Ma（MSWD＝0.29，$n=21$）（图7），可以代表斜长角闪岩的变质年龄。

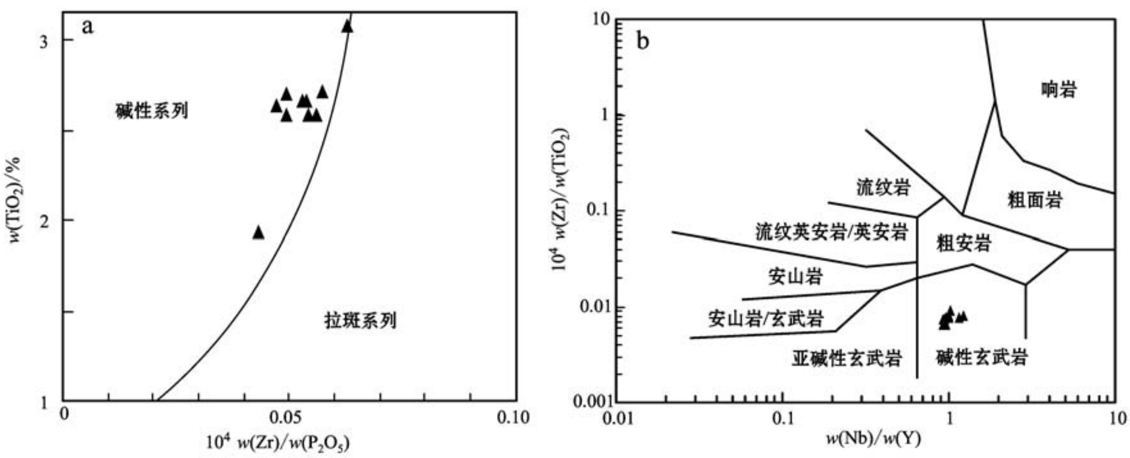

图4 下河图斜长角闪岩 TiO_2-Zr/P_2O_5（a，据 Winchester and Floyd，1976）和 $Zr/TiO_2-Nb/Y$（b，据 Winchester and Floyd，1977）岩石分类图解

Fig. 4 Plots of TiO_2 versus Zr/P_2O_5 (a，after Winchester and Floyd，1976) and Zr/TiO_2 versus Nb/Y (b，after Winchester and Floyd，1977) for the amphibolites in Xiahetu area

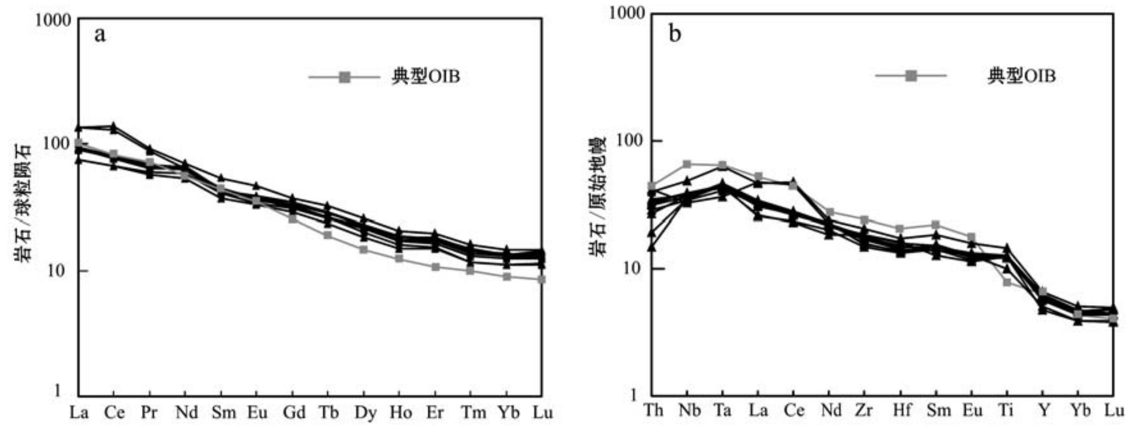

图 5 下河图斜长角闪岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔的值据 McDonough and Sun, 1995; OIB 的值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the amphibolites in Xiahetu area (normalization values after McDonough and Sun, 1995; element concentrations in OIB after Sun and McDonough, 1989)

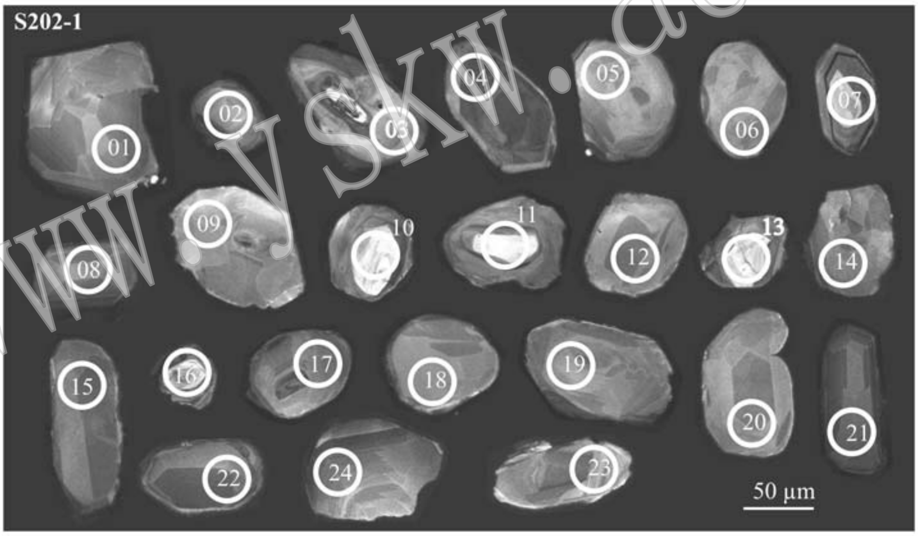

图 6 斜长角闪岩(S202-1)锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 6 CL images of zircons from the amphibolite (sample S202-1)

5 讨论

5.1 源区特征

野外观察表明下河图斜长角闪岩经历过较强的变质变形作用,这与岩相学观察到的岩石发生过强烈的蚀变作用相一致,且地球化学特征上所有样品的大离子亲石元素(Cs、Rb、Ba、K 等)含量变化较大,因此大离子亲石元素已经不能指示岩石原始组成成分。相反,高场强元素含量相对稳定,基本不受后期蚀变作用影响,在蛛网图上表现出一致性,可以反映源区特征及岩石成岩过程。因此主要利用高场强元素来讨论岩石陆壳混染、地幔源区物质组成特征及岩石成因。

Ti 元素在后期地质过程中不易蚀变(Bienvenu *et al.*, 1990),并且 Ti 负异常(相对于 Eu)通常被认为是陆壳特征之一(Rudnick and Gao, 2003);同时,因 Lu 和 Yb 具有相似的地球化学行为,Lu/Yb 值不受分离结晶和部分熔融过程影响,幔源岩浆 Lu/Yb 值为0.14~0.15,而与陆壳相关的岩浆该比值则为

表 3　斜长角闪岩（S202-1）LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 3　LA-ICP-MS zircons U-Th-Pb data of the amphibolite（sample S202-1）

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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
1	11	160	0.450 9	0.055 8	0.001 3	0.518 9	0.012 8	0.067 4	0.000 7	445	52	424	10	421	4
2	12	172	0.480 3	0.055 9	0.001 2	0.522 9	0.011 7	0.067 8	0.000 7	450	48	427	10	423	4
3	8	124	0.268 3	0.055 8	0.002 0	0.511 6	0.019 3	0.066 5	0.000 7	443	81	419	16	415	4
4	24	381	0.056 6	0.056 0	0.000 8	0.518 1	0.008 5	0.067 1	0.000 7	452	33	424	7	419	4
5	6	95	0.340 5	0.055 5	0.002 7	0.513 5	0.024 4	0.067 1	0.000 7	431	108	421	20	419	4
6	6	87	0.380 0	0.056 0	0.002 4	0.518 9	0.021 9	0.067 2	0.000 7	451	94	424	18	419	4
7	14	214	0.103 7	0.055 5	0.001 0	0.520 5	0.010 0	0.068 0	0.000 7	434	40	426	8	424	4
8	11	163	0.484 6	0.055 2	0.001 2	0.513 3	0.011 6	0.067 4	0.000 7	422	48	421	9	420	4
9	6	95	0.182 0	0.055 9	0.006 5	0.523 6	0.060 3	0.068 0	0.000 8	447	258	428	49	424	5
10	14	222	0.097 2	0.056 0	0.001 1	0.523 0	0.011 1	0.067 7	0.000 7	454	45	427	9	422	4
11	8	127	0.104 9	0.056 1	0.001 7	0.521 5	0.016 3	0.067 4	0.000 7	456	68	426	13	421	5
12	11	170	0.365 9	0.056 0	0.001 2	0.521 8	0.011 5	0.067 6	0.000 7	451	47	426	9	422	4
13	8	130	0.077 0	0.055 8	0.002 2	0.516 8	0.020 0	0.067 2	0.000 7	444	86	423	16	419	5
14	12	168	0.397 1	0.055 9	0.001 3	0.519 5	0.012 5	0.067 4	0.000 7	450	52	425	10	420	4
15	11	152	0.441 0	0.055 6	0.001 8	0.517 5	0.017 2	0.067 5	0.000 7	438	72	423	14	421	4
16	15	96	0.196 1	0.284 7	0.005 2	3.831 8	0.082 9	0.097 6	0.001 2	3 389	29	1 599	35	600	7
17	13	204	0.316 9	0.055 8	0.000 9	0.511 6	0.009 0	0.066 5	0.000 7	443	35	419	7	415	4
18	10	144	0.294 4	0.055 7	0.001 5	0.516 9	0.014 2	0.067 3	0.000 7	441	59	423	12	420	4
19	10	143	0.327 4	0.055 6	0.001 6	0.520 2	0.015 2	0.067 8	0.000 7	438	63	425	12	423	4
20	11	173	0.062 8	0.055 8	0.001 3	0.521 6	0.012 9	0.067 7	0.000 7	446	53	426	11	423	4
21	11	143	0.106 1	0.058 7	0.001 1	0.692 8	0.014 7	0.085 5	0.000 9	558	42	534	11	529	6
22	21	292	0.509 2	0.055 7	0.000 9	0.518 4	0.009 0	0.067 5	0.000 7	439	36	424	7	421	4
23	10	143	0.432 0	0.055 4	0.001 5	0.518 3	0.014 2	0.067 8	0.000 7	430	60	424	12	423	4
24	10	151	0.348 5	0.055 3	0.001 6	0.516 0	0.014 9	0.067 6	0.000 7	426	63	422	12	422	4

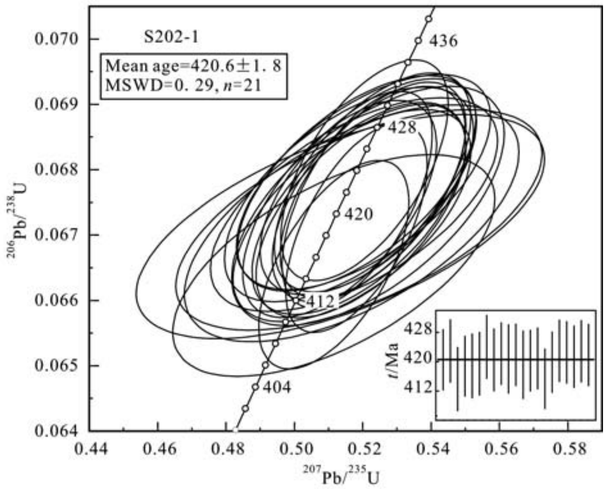

图 7　下河图斜长角闪岩(S202-1)锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 7　Concordia curves of zircons U-Pb data for the amphibolite (sample S202-1)

0.16～0.18(Rudnick and Gao，2003)。在不相容元素蛛网图上，下河图斜长角闪岩 10 件样品 Ti 元素没有表现出明显的负异常(图 5b)；10 件样品的 Lu/Yb值介于 0.14～0.15(除 1 个样品外)，表明其起源于地幔源区而没有遭受明显的陆壳物质混染。

Ta/Yb - Nb/Yb(Pearce，2008)和 Nb/Yb - La/Yb(Green，2006)图解常用来区别地幔源区和岩浆上升过程中流体或熔体对微量元素的贡献，未受后期过程影响的岩石应投影在地幔序列里(Pearce and Peate，1995)。下河图斜长角闪岩样品无一例外地落入地幔序列(图 8)。此外，样品点靠近 OIB 区域(图 8)。结合样品稀土元素配分图解和微量元素蛛网图解具有与 OIB 相似的地球化学特征(图 5)，认为下河图斜长角闪岩原岩岩浆起源于具 OIB 特征的地幔源区。

5.2　构造环境

下河图斜长角闪岩样品稀土元素配分曲线具轻稀土元素富集的右倾配分模式(图 5a)，$(La/Yb)_N$ = 5.93～12.13，其配分曲线明显不同于 E-MORB 型玄武岩和轻稀土元素亏损的 N-MORB 型玄武岩，而与洋岛玄武岩稀土元素配分模式相类似。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上，表现为向上隆起的特征，明显不同于轻稀土元素亏损、曲线左倾的 N-MORB型，亦有别于 E-MORB 型玄武岩，而同样类似于洋岛玄武岩的曲线形态。

不相容元素判别图解常用来区分玄武岩的构造环境。在 Ti - Zr - Y、Nb - Zr - Y、V - Ti 和 La/Nb - La 图解中，下河图斜长角闪岩样品全部落在板内玄武岩和洋岛玄武岩区域(图 9)，表明斜长角闪岩的原岩可能形成于与洋岛海山有关的环境。海山是大洋内高地的总称，也是增生型造山带中增生楔(杂岩)的重要组成单元。海山通常由大洋拉斑玄武岩和碱性玄武岩组成，规模较大者还伴有火山碎屑岩及其上覆的硅质岩、泥岩、浅水沉积碳酸盐岩、生物礁共同组成(Juteau and Maury，1997)。下河图斜长角闪岩与碳酸盐岩变质后形成的大理岩组合与古海山结

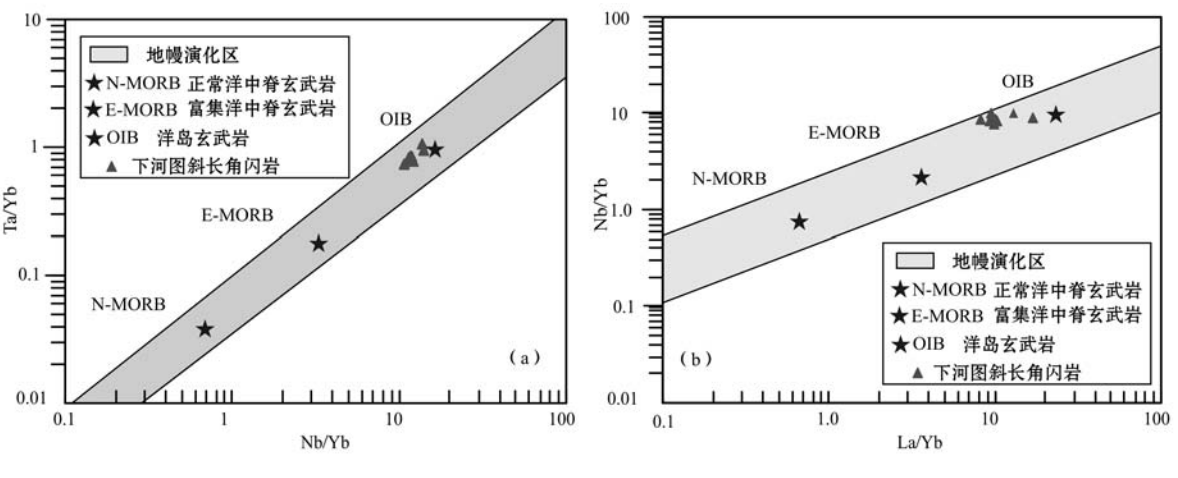

图 8　下河图斜长角闪岩 Ta/Yb - Nb/Yb(a，地幔演化区范围据 Pearce，2008)和 Nb/Yb - La/Yb(b，地幔演化区范围据 Green，2006)图解(不同类型大洋玄武岩标准值据 Sun and McDonough，1989)
Fig. 8　Plots of Ta/Yb versus Nb/Yb (a，mantle array after Pearce，2008) and Nb/Yb versus La/Yb (b，mantle array after Green，2006) for the amphibolites in Xiahetu area (normalizing values of the oceanic basalts after Sun and McDonough，1989)

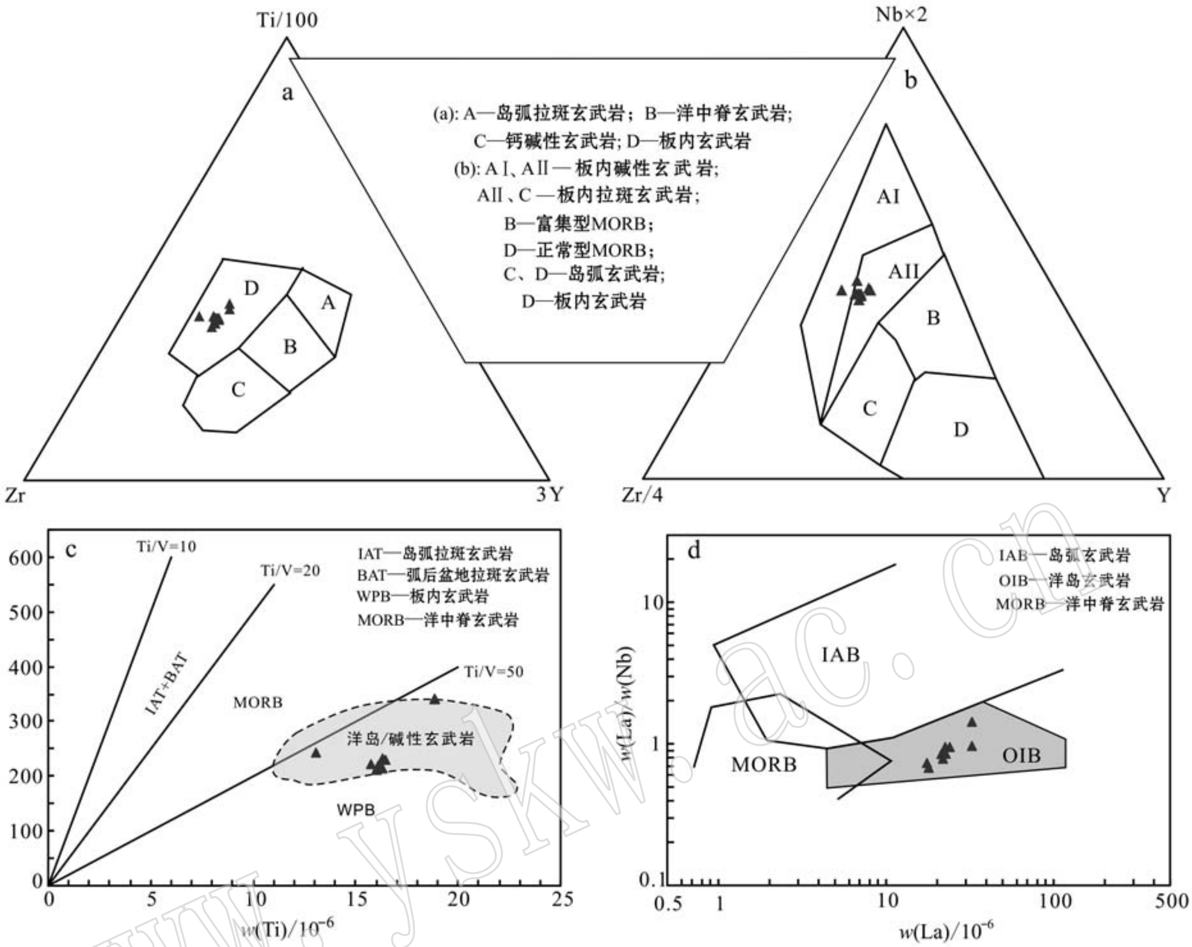

图 9　下河图斜长角闪岩构造环境判别图

Fig. 9　Tectonic setting plots for the amphibolites in Xiahetu area

a—Ti - Zr - Y 图解(据 Pearce 和 Cann，1973)；b—Nb - Zr - Y 图解(据 Meschede 等，1986)；c—V - Ti 图解(据 Shervais，1982)；d—La/Nb - La 图解(据 Regelous 等，2003)

a—Ti - Zr - Y diagram (after Pearce and Cann，1973)；b—Nb - Zr - Y diagram (after Meschede *et al*.，1986)；c—V - Ti diagram (after Shervais，1982)；d—La/Nb - La diagram (after Regelous *et al*.，2003)

构相似，并且大理岩的碳氧同位素组成反映其为海相(徐步台，1986)，亦支持其形成于海山构造环境。

海山的形成常常与地幔柱(如夏威夷海山链)或地幔的局部扰动有关。与地幔柱活动有关的海山其火山岩的组成多具有典型的 OIB 特征，而对于因局部热扰动引起的地幔部分熔融形成的海山，其火山岩的组成往往受到其构造背景的影响。远离消减带的海山常呈现 EMORB 或 OIB 的特征(Clague and Dalrymple，1987)，而靠近消减带的海山(如马里亚纳弧附近或弧后盆地内部的海山)的火山岩则往往具有不同程度的消减带特征(Kamenetsky *et al*.，1997)。随着大洋的消减，海山往往以各种方式增生到活动大陆边缘(Volkova and Budanov，1999；Gao and Klemd，2003)。但由于在增生过程中构造作用的影响，这些海山往往被肢解而很难保存原来完整的结构。下河图斜长角闪岩经历了较为强烈的变质作用和构造变形，岩石规模相对较小，其完整的海山各组成部分显然已被肢解，仅以碎块的形成出露。

此外，陈蔡岩群岩性复杂多样，地质体时代较为分散，跨越了古元古代到早古生代(表 1)，原岩物质形成于深海相、浅海相或大洋岛弧等不同的大地构造环境(徐步台，1986；孔祥生等，1995；兰玉琦等，1995)，且存在洋岛海山岩石组合，不同地质单元之间普遍呈构造接触，并且变质变形主要发生在 454～420 Ma(表 1)，据此推测陈蔡岩群为一套加里东期俯冲增生杂岩。

5.3 大地构造意义

扬子和华夏地块沿着江山-绍兴断裂带拼合形成统一的华南板块(水涛等,1986; 周新民等,1992; Li *et al*., 2010; Zhao and Cawood, 2012),关于两者之间碰撞拼合的时限和方式存在着较大的争论,但多数学者均认为两大块体于晋宁期完成碰撞拼合(Li *et al*., 1997, 2003; Wang X L *et al*., 2007, 2014; Wang Y J *et al*., 2012a; Zheng *et al*., 2008, 2013; Zhao and Cawood, 2012)。华南形成统一陆块后,在加里东期发生的构造热事件属于陆内造山作用(舒良树等, 2008; 舒良树, 2012; Li *et al*., 2010; Charvet *et al*., 2010; Wang *et al*., 2011, 2013)。

但是晋宁期碰撞拼合的观点却无法解释为何在华夏一侧既不存在统一的晋宁期角度不整合面(姜杨等,2014),也不发育与扬子同时期同类型的南华纪冰水沉积。Wong 等(2011)通过对江山-绍兴断裂带两侧中生代酸性岩的研究认为这两个块体在新元古代时期可能并未完全拼合。并且最近的研究表明,直到~790 Ma扬子陆块东南缘仍受到强烈的洋壳俯冲,尚未与华夏陆块发生碰撞拼贴(姜杨等, 2014)。因此,华夏-扬子陆块碰撞拼合的时间应该更晚。

近年来大量的年代学研究表明,华夏地区基底的变质变形主要发生在加里东期,经历了强烈的再造和深熔作用(Wan *et al*., 2007; 曾雯等,2008),局部发生了角闪岩相-麻粒岩相变质作用(于津海等, 2005; Wan *et al*., 2007; Li *et al*., 2010)和混合岩化(黄标等, 1994; 刘锐等, 2008);泥盆纪/奥陶纪角度不整合面之下前寒武基底-早古生代地层发生韧性剪切(Wang Y J *et al*., 2012a)和褶皱冲断变形(马文璞等,1995; Charvet *et al*., 2010)及广泛的岩浆活动(舒良树等,2008; 张芳荣等,2009),均呈现出碰撞造山带的特征。因此,部分学者持华南加里东期属碰撞造山作用的观点(Guo *et al*., 1989; 曾勇等, 1999; 马瑞士, 2006)。

同时,江绍断裂带内出露的龙游群和陈蔡群变质岩系呈现顺时针的 *pTt* 轨迹(Li *et al*., 2010; Xiang *et al*, 2008),指示了碰撞造山带的作用过程。此外,武夷山和南岭地区加里东期(约 440 Ma)的麻粒岩相变质作用峰期温度为 750~900℃,压力达到 1.1 GPa 左右(于津海等, 2003, 2005, 2014),也明显高于陆内造山作用下绿片岩相-角闪岩相的变质作用温压条件。江绍断裂带龙游群榴辉岩退变质形成的榴闪岩变质锆石的年龄为约 450 Ma(邢光福等, 2013; 汪建国等,2014),也指示扬子和华夏在加里东期(450~455 Ma)可能发生了碰撞造山事件及高压变质作用。

此外,在华夏地块发现了志留纪辉长岩(Wang *et al*., 2013),表明加里东期存在可能的岛弧和幔源岩浆活动,明显区别于板内造山作用的岩浆活动性质。最近还在钦杭结合带西南段重新厘定出了 415 Ma 海相火山岩,提出华夏-扬子在加里东期为俯冲增生造山带而不是陆内造山带(覃小锋等, 2015)。Zhao 等(2015)通过对陈蔡岩群不同类型岩石的系统研究,认为扬子和华夏在古生代仍然存在大洋,陈蔡岩群为大洋洋壳的残迹。

可见,虽然大多数学者认为华南洋在约 820 Ma 前关闭,加里东运动属于陆内造山,但越来越多的地质证据表明,扬子与华夏之间可能在加里东期才真正发生碰撞拼贴。而陈蔡岩群则可能是碰撞过程中形成的俯冲增生杂岩,其内有洋岛海山组合、洋岛玄武岩、岛弧岩浆岩、远洋沉积物等不同岩性、不同时代、不同构造属性的地质体(孔祥生等,1995),伴随两大陆块的碰撞拼合,而发生区域角闪岩相变质作用。

一般来说,中国东南部加里东期构造热事件的时代被定为奥陶纪—泥盆纪,并存在区域性不整合面;相应地,华南广泛发育 480~390 Ma 的强过铝质 S 型花岗岩,侵入活动的峰期为 450~400 Ma(Wang Y J *et al*., 2007)。Li 等(2011)、Wang Y J 等(2012b)通过对华夏地块斜长角闪岩的锆石年代学研究,进一步限定了该期构造热事件的峰期在 423~446 Ma。本文获得的陈蔡岩群下河图斜长角闪岩变质年龄为 420.6±1.8 Ma,与 Zhao 等(2015)研究结果一致,指示了扬子和华夏两个地块碰撞拼合时间为 420~450 Ma。

6 结论

(1) 陈蔡岩群下河图斜长角闪岩空间上与块状大理岩相伴产出,具有如下地球化学特征:SiO_2 含量较低,介于 43.22%~46.56%之间;Na_2O 为 2.47%~4.43%;MgO 为 3.23%~7.87%,平均为 6.29;K_2O 含量变化较大,为 0.43%~1.68%;在 $Zr/P_2O_5-TiO_2$ 图解中,下河图斜长角闪岩落入碱性系列区

域，在不活动元素岩石分类图解 Zr/TiO_2 - Nb/Y 中，样品落在碱性玄武岩区域内，显示下河图斜长角闪岩的原岩可能为碱性玄武岩。

（2）下河图斜长角闪岩与大理岩组合与古海山结构相似，可能形成于海山构造环境；其微量元素特征指示原岩很可能形成于靠近消减带的海山环境，来源于洋壳俯冲过程中增生的海山碎片，不同岩性之间呈构造接触，表明陈蔡岩群可能为一套俯冲增生杂岩。

（3）下河图斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 420.6±1.8 Ma，代表其变质年龄，指示了华夏-扬子在加里东期碰撞拼合而发生的区域变质作用的时代。

References

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

Bienvenu P, Bougault H, Joron J L, *et al*. 1990. MORB alteration: Rare earth element/non-rare-earth hygromagmaphile element fractionation[J]. Chemical Geology, 82: 1～14.

Charvet J, Shu L S, Faure M, *et al*. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. Journal Asian Earth Sciences, 39: 309～330.

Chen Diyun and Ling Hongfei. 1994. The geochemical characteristics and Genesis of Chencai Group amphibolite[J]. Geology of Zhejiang, 10(1): 30～37(in Chinese with English abstract).

Chen Diyun and Xu Weichang. 1991. REE geochemistry features of the metamorphic rocks of Chencai Group in Zhejiang[J]. Journal of East China College of Geology, (2): 134～140(in Chinese with English abstract).

Chen Diyun and Xu Weichang. 1993. The geochemical study of metamorpuic conditions and tectonic settings for metamorphic rocks of Chencai Group Zhejiang, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 13(2): 29～36 (in Chinese with English abstract).

Chen X and Rong J Y. 1999. From biostratigraphy to tectonics—with Ordovician and Silurian of South China as an example[J]. Geoscience, 13: 385～389.

Chen Shaohai, Zhou Xinhua, Li Jiliang, *et al*. 1999. Geochemistry of the amphibolites from Chencai Group, Zhejiang Province: Implicantions for the tectionic setting[J]. Chinese Journal of Geology, 34 (2): 154～165(in Chinese with English abstract).

Cheng Hai. 1991. The late proterrozoic collision orogen in Northwestern Zhejiang Province[J]. Geological Review, 37(3): 203～213(in Chinese with English abstract).

Clague D A and Dalrymple G B. 1987. The Hawaiian-Emperor volcanic chain, geological evolution[A]. Decker R W, Wright T and Stauffer P H. Volcanism in Hawaii[C]. US Geological Survey Professional Paper, 1 350: 5～54.

Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, *et al*. 2014. SHRIMP zircon U-Pb dating of Neoproterozoic Chencai Group in Jiangshan-Shaoxing fault zone and its implication[J]. Geological Bullentin of China, 33(5): 641～648 (in Chinese with English abstract).

Gao J and Klemd R. 2003. Formmion of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints[J]. Lithos, 66(1～2): 1～22.

Green N L. 2006. Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints on from the Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system [J]. Lithos, 87: 23～49.

Gu X X, Liu J M, Zheng M H, *et al*. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence[J]. Journal of Sedimentary Research, 72: 393～407.

Guo L Z, Shi Y S, Lu H F, *et al*. 1989. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 3: 87～93.

Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 28(4): 481～492 (in Chinese with English abstract).

Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Zhaoxu, *et al*. 1991. The precambrian geology of Southwest Zhejiang Province[A]. Precambrian Geology, No. 5[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1～277(in Chinese).

Hu Yanhua, Gu Mingguang, Xu Yan, *et al*. 2011. The confirmation of the age of Caledonian Chencai Group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(11): 1 661～1 670(in Chinese with English abstract).

Huang Biao, Sun Mingzhi, Wu Shaoxing, *et al*. 1994. Studies on genesis and characters of Caledonian migmatites in middle Wuyi Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 10(4): 427～439(in Chinese with English abstract).

Jiang Yang, Zhao Xilin, Lin Shoufa *et al*. 2014. Identification and tectonic implication of Neoproterozoic continental margin Arc TTG assemblage in Southeastern margin of the Yangtze Carton[J]. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1 461～1 474(in Chinese with English abstract).

Juteau T and Maury R. 1997. The Oceanic Crust, from Accretion to Mantle Recycling[M]. Springer, 390.

Kamenetsky V S, Crawford A J, Eggins S, *et al*. 1997. Phenocryst and melt inclusion chemistry of near axis seamounts, Valu Fa Ridge, Lau Basin: Insight into mantle wedge melting and the addition of subduction components[J]. Earth and Planetary Science Letters, 151: 205～233.

Kong Xiangsheng, Bao Chaomin and Gu Mingguang. 1994. Discussion for main geological features and tectonic evolution of Chencai group in Zhuji district, Zhejiang Province[J]. Geology of Zhejiang, 10(1): 15～29(in Chinese with English abstract).

Kong Xiangsheng, Li Zhifei and Feng Changgen. 1995. The Precambrian Geology of Chencai Area in Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1～119(in Chinese).

Lan Yuqi, Ye Ying, Lan Xiang, *et al*. 1995. Metamorphic geology of khondalite series from Chencai Group in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 29(3): 303～309(in Chinese with English abstract).

Li Fupei, Dong Chuanwan, Shen Zhongyue, *et al*. 1991. Research of the dutile shear zone of Chencai area in North Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang University(Natural Science), 25(6): 644～650(in Chinese with English abstract).

Li L M, Sun M, Wang Y J, *et al*. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from migmatised amphibolites in the Cathaysia Block: Implications for the early Paleozoic peak tectonothermal event in Southeastern China[J]. Gondwana Research, 19: 191～201.

Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, *et al*. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Precambrian Research, 81: 129～144.

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

Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al*. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 122: 85～109.

Li Z X, Li X H, Wartho J A, *et al*. 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern South China: new age constraints and *P-T* conditions[J]. GSA Bulletin, 122(5～6): 772～793.

Liu Rui, Zhang Li, Zhou Hanwen, *et al*. 2008. Petrogenesis of the Caledonian migmatites and related granites in northwestern Fujian Province, south China[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1 205～1 222(in Chinese with English abstract).

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al*. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537～571.

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al*. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34～43.

Lu Fengxiang and Sang Longkang. 2002. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 23(in Chinese).

Ludwig K R. 2003. Isoplot/EX Version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication[C], 1a: 1～56.

Ma Ruishi. 2006. New thought about the tectonic evolution of the South China, with discussion on several problems of the Cathaysian Old Land[J]. Geological Journal of China Universites, 12: 448～456(in Chinese with English abstract).

Ma Wenpu, Qiu Yuanxi and He Fengsheng. 1995. Lower Paleozoic omission zone in Jiangnan Uplift——A sign of Caledonian foreland fold thrust belt[J]. Geoscience(Journal of Graduate School, China University of Geosciences), 9(3): 320～324(in Chinese with English abstract).

McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 120: 223～253.

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 56: 207～218.

Misra S N. 1971. Chemical distinction of high-grade ortho-and para-metabasite[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 51: 311～316.

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

Pearce J A and Peate D W. 1995. Tetonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 23: 1 073～1 109.

Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 100: 14～48.

Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al*. 2015. The reconfirmation of age and tectonic setting of the volcanic rocks of Yingyangguan Group in the eastern Guangxi: Constraints on the structural pattern of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt [J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(3): 83～292(in Chinese with English abstract).

Regelous M, Hofmann A W, Abouchami W, *et al*. 2003. Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma[J]. Journal of Petrology, 44: 113～140.

Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 3: 1～64.

Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitc lavas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 59: 101～108.

Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1 035～1 053(in Chinese with English abstract).

Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, *et al*. 2008. Early Palenzoic orogenic belt in the eastern segment of South China[J]. Geological Bulletin of China, 27(10): 1 581～1 593(in Chinese with English abstract).

Shui Tao. 1987. Tectonic framework of basement in Southeast China continental area[J]. Science in China (Series B), (4): 414～422 (in Chinese).

Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua, *et al*. 1986. The Shaoxing-Jiangshan Joint Belt[J]. Chinese Science Bulletin, 6: 444～448(in Chinese).

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [A]. Sanders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313～345.

Volkova N I and Budanov V I. 1999. Geochemical discrimination of metbasalt rocks of the Fan Karategin transitional blueschist/greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan: Seamount volcanism and accretionary tectonics[J]. Lithos, 47: 201～216.

Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, *et al*. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units [J]. Gondwana Research, 12: 166～183.

Wang Jianguo, Yu Shengqiang, Hu Yanhua, *et al*. 2014. The discovery, petrology and geochronology of the retrograde eclogite in Jiangshan-Shaoxing suture zone[J]. Geology in China, 41(4): 1 356～1 363(in Chinese with English abstract).

Wang X L, Shu L S, Xing G F, *et al*. 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800-760 Ma volcanic rocks[J]. Precambrian Research, 222～223: 404～423.

Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, *et al*. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. Precambrian Research, 159: 117～131.

Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, *et al*. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocksof the Jiangnan orogen, China[J]. Precambrian Research, 242: 154～171.

Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, *et al*. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 145: 111～130.

Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, *et al*. 2012a. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. Gondwana Research. 23(4), 1 273～1 305.

Wang Y J, Wu C M, Zhang A M, *et al*. 2012b. Kwangsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites[J]. Lithos, 150: 227～242.

Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, *et al*. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block[J]. Gondwana Research, 12: 404~416.

Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, *et al*. 2011. Kwangsian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains[J]. Lithos, 127: 239~260.

Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, *et al*. 2013. Origin of paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence[J]. Lithos, 160~161: 37~54.

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis[M]. London: Chapman & Hall, 1~466.

Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks [J]. Earth and Planetary Science Letters, 28: 459~469.

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

Wong J, Sun M, Xing G F, *et al*. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: Geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. Gondwana Research, 19(1): 244~259.

Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constranints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49: 1 554~1 569.

Xiang Hua, Zhang Li, Zhou Hanwen, *et al*. 2008. U-Pb zircon geochronology and Hf isotope study of metamorphosed basic-ultrabasic rocks from meta-morphic basement in southwestern Zhejiang: The re-sponse of the Cathaysia Block to Indosinian orogenic event [J]. Science China(Earth Sciences), 51 (6): 788~800.

Xing Guangfu, Jiang Yang, Chen Zhihong, *et al*. 2013. Discovery of the Caledonian eclogite in Qinzhou-Hangzhou suture zone[J]. Resources Survry and Environment, inside front cover(in Chinese).

Xu Butai. 1986. C and O isotopic compositions of marbles from the Chencai Group, Zhejiang Province and their geological applications [J]. Geology of Zhejiang, 2(2): 49~54 (in Chinese with English abstract).

Yao J L, Shu L S, Santosh M, *et al*. 2013. Palaeozoic metamorphism of the Neoproterozoic basement in NE Cathaysia: Zircon U-Pb ages, Hf isotope and whole rock geochemistry from the Chencai Group[J]. Journal of the Geological Society, http://dx.doi.org/10.1144/jgs2013-036.

Ye Ying, Lan Yuqi, Chen Yanshao, *et al*. 1994. ^{40}Ar-^{39}Ar chronology and metamorphic age of Chencai Group, Zhejiang Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 10(2): 193~201(in Chinese with English abstract).

Ye Ying, Lan Yuqi and Shen Zhongyue. 1995. Geocheistry and tectonic environment of the two typical amphibolites from Chencai Group, Zhejiang Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, (1): 7~12(in Chinese).

Yu Jinhai, Lou Fasheng, Wang Lijuan, *et al*. 2014. Discovery and implications of early Paleozoic granulite in Yiyang, northeast Jiangxi Province[J]. Chinese Science Bulletin, 59(35): 3 508~3 516(in Chinese).

Yu Jinhai, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, *et al*. 2005. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains[J]. Chinese Science Bulletin, 50 (18): 2 080 ~2 089.

Yu Jinhai, Zhou Xinmin, Zhao Lei, *et al*. 2003. Discovery and implications of granulite facies metamorphic rocks in the eastern Nanling, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19: 461~467(in Chinese with English abstract).

Zeng Wen, Zhang Li, Zhou Hanwen, *et al*. 2008. Caledonian reworking of Paleoproterozoic basement in the Cathaysia Block: Constraints from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements[J]. Chinese Science Bulletin, 53(6): 895~504.

Zeng Yong and Yang Minggui. 1999. Central Jiangxi Collision mélange zone[J]. Regional Geology of China, 18(1): 17~22(in Chinese with English abstract).

Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, *et al*. 2009. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China[J]. Earth Science Frontiers, 16(1): 248~260(in Chinese with English abstract).

Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. Precambrian Research, 222~223: 13~54.

Zhao Guochun and Sun Deyou. 1994a. The study on metamorphic stages and metamorphic *PTD* path of Chencai Group, Southwestern Zhejiang Province[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 24(3): 246～253(in Chinese with English abstract).

Zhao Guochun, Sun Deyou and He Tongxing. 1994b. Discussion on characteristics of structural deformations and the ages of deformations about Chencai Group[J]. Geology of Zhejiang, 10(1): 38～46(in Chinese with English abstract).

Zhao Lei, Zhai M G, Zhou X W, *et al*. 2015. Geochronology and geochemistry of a suite of mafic rocks in Chencai area, South China: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. Lithos, 236～237: 226～244.

Zhao Mingde and Zhang Peiyao. 1983. Plate tectonics of Zhejiang Province[J]. Acta Geologica Sinica, 4: 369～378 (in Chinese with English abstract).

Zhejiang Geology and Mineral Exporation Bureau. 1996. Stratgraphylithostratic of Zhejiang Province[M]. Wuhan, China university of Geosciences Press, 14～17 (in Chinese).

Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, *et al*. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China[J]. Precambrian Research, 163: 351～383.

Zheng Y F, Xiao W J and Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China[J]. Gondwana Research, 23: 1 189～1 206.

Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, *et al*. 2007. 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, 96: 127～150.

Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al*. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 196: 51～67.

Zhou Xinmin and Zhu Yunhe. 1992. The magmatic mixing of the Jiangshao fault and the Precambrian geology[J]. Science China (Earth Sciences), 3: 296～304(in Chinese).

附中文参考文献

陈迪云，凌洪飞. 1994. 陈蔡群斜长角闪岩的地球化学特征及成因分析[J]. 浙江地质，10(1)：30～37.

陈迪云，徐伟昌. 1991. 浙江陈蔡群变质岩稀土元素地球化学特征[J]. 华东地质学院学报，(2)：134～140.

陈迪云，徐伟昌. 1993. 浙江陈蔡群变质岩变质条件及构造环境的地球化学探讨[J]. 矿物岩石，13(2)：29～36.

陈绍海，周新华，李继亮，等. 1999. 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，34(2)：154～165.

程　海. 1991. 浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究[J]. 地质论评，37(3)：203～213.

高林志，丁孝忠，刘燕学，等. 2014. 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，33(5)：641～648.

侯可军，李延河，田有荣. 2009. LA-MC-ICPMS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质，28：481～492.

胡雄健，许金坤，童朝旭，等. 1991. 浙西南前寒武纪地质[A]. 前寒武纪地质(第 5 号)[C]. 北京：地质出版社，1～277.

胡艳华，顾明光，徐岩，等. 2011. 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，30(11)：1 661～1 670.

黄　标，孙明志，武少兴，等. 1994. 武夷山中段加里东期混合岩的特征及成因讨论[J]. 岩石学报，10(4)：427～439.

姜　杨，赵希林，林寿发，等. 2014. 扬子克拉通东南缘新元古代陆缘弧型 TTG 的厘定及其构造意义[J]. 地质学报，88(8)：1 461～1 474.

孔祥生，包超民，顾明光. 1994. 浙江诸暨地区陈蔡群主要地质特征及其构造演化探讨[J]. 浙江地质，10(1)：15～29.

孔祥生，李志飞，冯长根. 浙江陈蔡地区前寒武纪地质[M]. 1995. 北京：地质出版社，1～119.

兰玉琦，叶　瑛，兰　翔，等. 1995. 浙江陈蔡群孔兹岩系的变质地质学研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版)，29(3)：303～309.

李福佩，董传万，沈忠悦，等. 1991. 浙北诸暨陈蔡地区韧性剪切带的研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版)，25(6)：644～650.

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

刘　锐，张　利，周汉文，等. 2008. 闽西北加里东期混合岩及花岗岩的成因：同变形地壳深熔作用[J]. 岩石学报，24(6)：1 205～1 222.

路凤香，桑隆康. 2002. 岩石学[M]. 北京：地质出版社，23.

马瑞士. 2006. 华南构造演化新思考——兼论"华夏古陆"说中的几个问题[J]. 高校地质学报，12：448～456.

马文璞，邱元禧，何丰盛. 1995. 江南隆起上的下古生界缺失带——

华南加里东前陆褶冲带的标志[J]. 现代地质，9(3)：320～324.
覃小锋，王宗起，王 涛，等. 2015. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构造环境的重新厘定：对钦杭结合带西南段构造格局的制约[J]. 地球学报，36(3)：83～292.
舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报，31(7)：1 035～1 053.
舒良树，于津海，贾 东，等. 2008. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报，27(10)：1 581～1 593.
水 涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(B辑)，4：414～422.
水 涛，徐步台，梁如华，等. 1986. 绍兴—江山古陆对接带[J]. 科学通报，6：444～448.
汪建国，余盛强，胡艳华，等. 2014. 江山-绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征[J]. 中国地质，41(4)：1 356～1 363.
邢光福，姜 杨，陈志洪，等. 2013. 钦杭结合带首次发现加里东期榴闪岩[J]. 资源调查与环境，34(4)：封面内页.
徐步台. 1986. 陈蔡群大理岩的碳氧同位素组成及其地质应用[J]. 浙江地质，2(2)：49～54.
叶 瑛，兰玉琦，陈彦绍，等. 1994. 浙江省陈蔡群的^{40}Ar-^{39}Ar年龄与变质年代[J]. 岩石学报，10(2)：193～201.
叶 瑛，兰玉琦，沈忠悦. 1995. 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，(1)：7～12.
于津海，楼法生，王丽娟，等. 2014. 赣东北弋阳早古生代麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报，59(35)：3 508～3 516.
于津海，周新民，O'Reilly S Y，等. 2005. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质——锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究[J]. 科学通报，50：1 758～1 767.
于津海，周新民，赵 蕾，等. 2003. 南岭东段麻粒岩相变质岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报，19：461～467.
曾 雯，张 利，周汉文，等. 2008. 华夏地块古元古代基底的加里东期再造：锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素制约[J]. 科学通报，53：335～344.
曾 勇，杨明桂，1999. 赣中碰撞混杂岩带. 中国区域地质，18(1)：17～22.
张芳荣，舒良树，王德滋，等. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. 地学前缘，16(1)：248～260.
赵国春，孙德有. 1994a. 浙西南陈蔡群变质阶段划分及变质作用 p-T-D 轨迹研究[J]. 长春地质学院学报，24(3)：246～253.
赵国春，孙德有，贺同兴. 1994b. 陈蔡群构造变形特征及变形时代讨论[J]. 浙江地质，10(1)：38～46.
赵明德，张培垚. 1983. 浙江板块构造初探[J]. 地质学报，4：369～378.
浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层[M]. 武汉：中国地质大学出版社，14～17.
周新民，朱云鹤. 1992. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质[J]. 中国科学 D辑:地球科学，3：296～304.