

doi:10.3799/dqkx.2015.003

西藏班公湖—怒江缝合带中段江错蛇绿岩岩石学、地球化学、年代学及地质意义

黄强太^{1,2,3}, 李建峰⁴, 夏斌^{1,2,3*}, 殷征欣^{1,2,3}, 郑浩^{1,2,3}, 石晓龙^{1,2,3}, 胡西冲^{1,2,3}

1. 中山大学海洋学院, 广东广州 510006

2. 海洋石油勘探开发广东省普通高校重点实验室, 广东广州 510006

3. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广东广州 510006

4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 江错蛇绿岩位于班公湖—怒江缝合带中段, 位于切里湖蛇绿岩亚带的最东端, 南邻蓬湖西蛇绿岩。江错蛇绿岩岩石组合相对较全, 主要由变质橄榄岩、辉长岩和辉绿岩等组成。江错蛇绿岩辉长岩—辉绿岩与 N-MORB 相比具有较高的 Mg[#]、低 Ti、K、Na 和 P 的特征, 富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba 和亏损高场强元素 Th、Hf、Ta、Nb, REE 配分图总体显示为平坦型分布模式。通过地球化学元素分析认为江错蛇绿岩是形成于 SSZ 之上的弧后盆地扩张脊环境。对其进行辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 得出加权平均年龄为 189.8±3.3 Ma (MSWD=0.97), 该结果代表了班公湖怒江缝合带中段江错地区特提斯洋的扩张时代, 与中段东巧地区蛇绿岩年龄一致, 但晚于东段洋盆发育时代且早于西段洋盆发育时代, 表明整个班公湖—怒江洋盆发育时代存在东早西晚的特点。

关键词: 江错蛇绿岩; 地球化学; SHRIMP U-Pb 定年; 构造环境; 西藏。

中图分类号: P545

文章编号: 1000-2383(2015)01-0034-15

收稿日期: 2014-05-25

Petrology, Geochemistry, Chronology and Geological Significance of Jiang Tso Ophiolite in Middle Segment of Bangonghu-Nujiang Suture Zone, Tibet

Huang Qiangtai^{1,2,3}, Li Jianfeng⁴, Xia Bin^{1,2,3*}, Yin Zhengxin^{1,2,3},
Zheng Hao^{1,2,3}, Shi Xiaolong^{1,2,3}, Hu Xichong^{1,2,3}

1. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China

2. Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Development, Guangdong Universities, Guangzhou 510006, China

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou 510006, China

4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Jiang Tso ophiolite, which belongs to the most eastern part of Qieli Lake ophiolite subzone, is located at the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture zone to the south of Pung Lake ophiolite. The rock association of Jiang Tso ophiolite is relatively complete and mainly composed of metamorphic peridotite, gabbro and diabase. Comparing with N-MORB, the major and trace elements of Jiang Tso ophiolite are characterized with high content in Mg and low contents in Ti, K, Na, P and the depletion of elements of Nb, Ta, Hf, and Th. In addition, it displays relative enrichment of Rb, Sr, and Ba. Geochemistry characteristics of the Jiang Tso ophiolite indicate it is of supra-subduction zone type ophiolite and formed in the spreading ridge of back arc basin. The zircon SHRIMP U-Pb weighted average ages of gabbro is 189.8±3.3 Ma (MSWD=0.97), which suggests that the extension time of Tethys oceanic basin in Jiang Tso region was consistent with the formation time of the Dongqiao oceanic basin in the middle part, and also corresponding to that of the oceanic basin in the western part, while later

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41372208); 中国地质调查局青藏专项(No.1212011221088)。

作者简介: 黄强太(1986—), 男, 博士后, 主要从事构造地质学、矿床学研究。E-mail: huangqiangtai@163.com

* **通讯作者:** 夏斌, E-mail: xb698xy@qq.com

引用格式: 黄强太, 李建峰, 夏斌, 等. 2015. 西藏班公湖—怒江缝合带中段江错蛇绿岩岩石学、地球化学、年代学及构造环境研究. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 34-48.

than the development of oceanic basin in the eastern part of the Bangonghu-Nujiang suture zone. From the geochronological data, it can be deduced that the development of the Bangonghu-Nujiang oceanic basin was characterized by being gradually later from east to west.

Key words: Jiang Tso ophiolite; geochemistry; SHRIMP U-Pb dating; tectonic environment; Tibet.

蛇绿岩作为古大洋岩石圈残片,是古板块构造最重要的分界标志之一,其形成时代对于恢复古大洋的形成演化历史、重建古板块构造格局、分析岩石圈构造动力学及矿产资源分布规律等具有重要意义,近年来一直受到国内外地质学者的关注和重视。班公湖—怒江缝合带是贯穿青藏高原内部,它代表了劳亚—冈瓦纳大陆之间消失的特提斯洋,是一条重要的岩相构造带,主要发育侏罗纪复理石建造、蛇绿混杂岩等(西藏地质矿产局,1993;罗亮等,2014;张硕等,2014),并且存在明显的地球物理异常特征(Haines *et al.*, 2003;潘桂棠等,2004;赵文津等,2004)。带内不同区段蛇绿岩岩石组合不尽相同,形

成的构造环境差异较大,其形成时代也有差异(表 1)。由于班公湖—怒江缝合带中段湖区人烟稀少,自然环境极其恶劣,野外工作条件极其艰苦,因此缺少精确的年龄报道,限制了特提斯构造演化的研究。本文着重选择中段江错蛇绿岩中的辉长岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 锆石法测定该蛇绿岩的形成时代,其结果对于班公湖—怒江缝合带的构造演化具有重要的研究意义。

1 区域地质概况

江错蛇绿岩出露于班公湖—怒江缝合带中段的

表 1 班公湖—怒江缝合带内蛇绿岩典型剖面岩石组合、地球化学特征及构造环境统计

Table 1 The rock assemblage, geochemical characteristics and tectonic environment of typical ophiolite section in Bangonghu-Nujiang suture zone

剖面名称	岩石组合	化学特征	构造背景	文献	
东段	丁青	丁青西:地幔橄榄岩、辉长岩、玄武岩;丁青东:地幔橄榄岩、堆晶岩、铁镁质杂岩	熔岩 MORB; 玻安岩; LAT	弧前环境	张旗和杨瑞英, 1985, 1987; Ishii <i>et al.</i> , 1992; 张旗, 1992; 王建平等, 2002
	嘉黎—凯蒙	地幔橄榄岩、辉橄岩、橄长岩和辉长岩	SSZ 型蛇绿岩	不成熟弧后盆地	和钟铨等, 2006
中段	东巧	地幔橄榄岩、橄长岩、玄武岩及铬铁矿	MORB; E-MORB; SSZ; IAT	大洋盆地扩张环境	Girardeau <i>et al.</i> , 1984; 王希斌等, 1984; 杨瑞英等, 1984; Pearce and Deng, 1988; 叶培盛等, 2004; 夏斌等 2008
	安多	玄武岩、辉长岩	SSZ 型蛇绿岩	弧后盆地环境	王希斌等, 1984; 赖绍聪和刘池阳, 2003; 孙立新等, 2011
	觉翁	变质橄榄岩、辉橄岩、堆晶岩、辉绿岩墙、枕状熔岩、放射虫硅质岩	MORB; SSZ	大洋盆地; 弧后盆地	王希斌等, 1984; 陈玉禄等, 2006
	蓬湖西	纯橄岩、辉长岩、橄长岩	SSZ 型蛇绿岩	弧后盆地环境	王希斌等, 1984; 韦振权, 2009
	纳木错	变质橄榄岩、辉长辉绿岩、玄武岩	IAT	弧后盆地环境	叶培盛等, 2004
	白拉	地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩	玻安岩	弧前盆地	Pearce and Deng, 1988
	拉弄	地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、枕状熔岩	SSZ 型蛇绿岩	弧后盆地环境	徐力峰, 2009
西段	洞错	地幔橄榄岩、堆晶杂岩、基性岩墙杂岩、基性熔岩	OIB; MORB; IAT	洋岛; 小洋盆, 初始洋盆, 弧后盆地	林文弟等, 1990; 夏斌等, 1991; 鲍佩声等, 1996, 2007; 鲍佩声和王军, 2000; 张玉修等, 2007; 樊帅权等, 2010
	拉果错	地幔橄榄岩、堆晶岩、枕状熔岩、斜长花岗岩、放射虫硅质岩	IAT; MORB 和 IAT	弧间盆地	王保弟等, 2007; 张玉修等, 2007
	查尔康错	变质橄榄岩、堆晶岩、辉绿岩、玄武岩	MORB 和 IAT	岛弧环境	张玉修等, 2007
	班公错	地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩墙、枕状熔岩	SSZ 型蛇绿岩	俯冲带环境	史仁灯, 2007; 黄启帅等, 2012a
	狮泉河	地幔橄榄岩、堆晶岩、基性岩墙	IAT; MORB; SSZ	弧后盆地; 洋内岛弧	郭铁鹰等, 1991; 史仁灯, 2005
古昌	变质橄榄岩、基性岩墙群、蚀变玄武岩、斜长花岗岩、放射虫硅质岩	MORB; E-MORB	初始洋盆; 多岛弧环境; 异常洋脊环境	王希斌等, 1987; 张宽忠等, 2007	

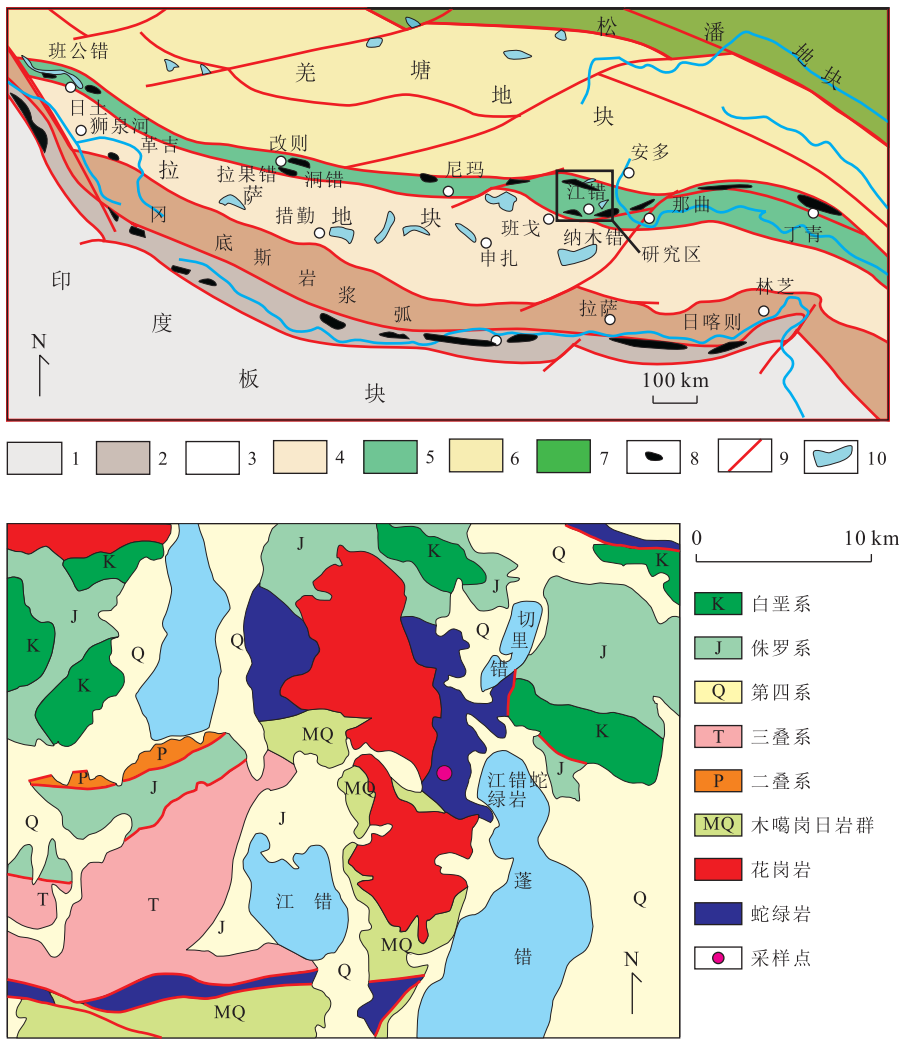


图 1 江错蛇绿岩地质构造简图

Fig.1 Geological sketch map of Jiang Tso ophiolite

1.喜马拉雅被动陆缘(印度板块);2.雅鲁藏布缝合带;3.冈底斯陆缘火山—岩浆弧;4.拉萨地块;5.班公湖—怒江缝合带;6.羌塘地块;7.松潘地块;8.蛇绿岩;9.断层;10.湖泊;据夏斌等,1993;Yin and Harrison,2000 修改

切里湖蛇绿岩亚带,位于蓬错西北.该蛇绿岩亚带南北走向长 13 km,宽 3~7 km,北宽南窄.该蛇绿岩北侧与安山岩、安山质凝灰岩呈断层接触,西侧和南侧大部分花岗岩呈断裂接触,小部分与石灰岩、砂泥质板岩和硅质岩接触.由于本地区的构造运动较为强烈,因此江错蛇绿岩被构造肢解,并没有呈连续出露的状态,但是蛇绿岩的岩石单元较齐全,从底部到顶部,主要由变质橄榄岩、辉长岩和辉绿岩组成,目前尚未发现相关的熔岩类岩石.本文分析的样品为辉长岩,采样位置坐标为:北纬 $31^{\circ}32'6''$,东经 $90^{\circ}27'58''$.

2 岩石学特征

辉长岩规模较小,一般呈灰白—暗绿色,具全晶

质粒状结构,块状构造(图 2a).矿物成分主要由斜长石、辉石组成,矿物形态不规则(图 3a 和 3b).斜长石形态保留较好者为柱粒状,粒径 1~2 mm,为基性斜长石,含量 62%~53%,均受不同程度蚀变,主要蚀变为葡萄石化、绿帘石化.辉石碎粒闪石化为蓝绿色角闪石,再绿泥石化,含量 35%~40%,粒径 1~2 mm,形态不规则,杂乱分布于斜长石粒间,辉石与辉石之间有绿泥石脉.楣石为大小不等粒状,粒径 0.1~0.5 mm,含量约为 2%~3%.

辉绿岩为暗绿色,岩石具似斑状结构,块状构造,岩石遭受不同程度的蚀变(图 2b).辉石被角闪石化,或呈“环带状”——辉石在核心,外围角闪石(图 4a);角闪石沿辉石解理交代辉石而又未彻底交代,辉石与角闪石或呈文象状、蠕虫状,或呈格状、薄

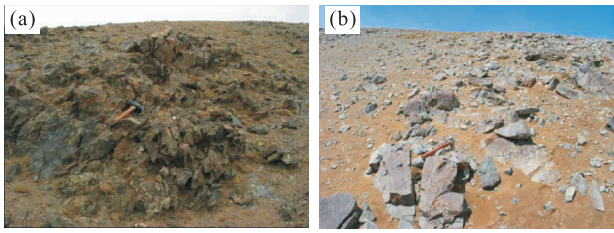


图 2 江错蛇绿岩辉长岩和辉绿岩野外照片

Fig.2 Filed photos of gabbro and diabase from Jiang Tso
a.辉长岩;b.辉绿岩

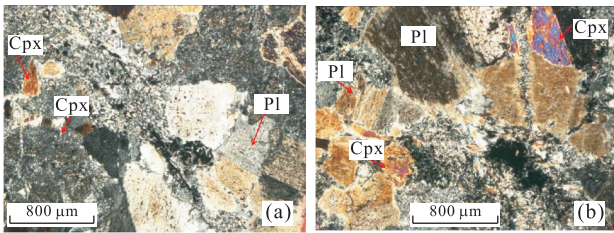


图 3 江错蛇绿岩辉长岩显微镜下照片(正交偏光)

Fig.3 Microscope photos of Jiang Tso ophiolite gabbro
(orthogonal polarization)
Pl.斜长石;CPX.斜方辉石

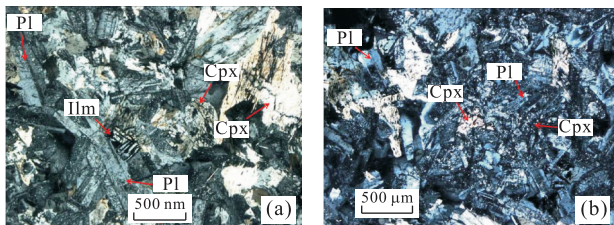


图 4 江错蛇绿岩辉绿岩显微镜下照片(偏光)

Fig.4 Microscope photos of Jiang Tso ophiolite diabase
Pl.斜长石;CPX.斜方辉石;Ilm.钛铁矿

片状。斜长石一般葡萄石化、角闪石化,斜长石有环带和钠长石亮边,其余为角闪石,镶嵌含长结构(图 4b)。出溶钛铁矿页片间有榍石、帘石和绿泥石集合体。钛铁矿蚀变的绿泥石呈粉红色,绿帘石呈黄绿色。

3 样品处理方法

岩石样品的薄片观察,是在中山大学显微镜实验室观察完成的。江错蛇绿岩样品的主量、微量元素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。

样品的主元素分析采用碱熔法制成玻璃饼,用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定样品的主量元素,分

析精度优于 1%(徐力峰,2009)。

样品的微量元素分析则在 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。ICP-MS 分析的相关仪器工作条件和方法见相关文献(刘颖等,1996;李献华等,2002)。微量元素中含量 $> 10 \times 10^{-6}$ 的样品分析精度优于 5% (2σ), $< 10 \times 10^{-6}$ 的样品的分析精度优于 10% (2σ),所有稀土元素的分析精度优于 5% (2σ)。

蛇绿岩的岩石组合多为基性—超基性岩,锆石量少、颗粒小和分选困难,因此为了挑选到足量、大小合适、晶型良好的锆石颗粒,将 4 kg 左右的辉长岩样品放在碎样机中粉碎到 1 cm^3 ,然后放入直径 20 cm 的不锈钢研磨钵中,置于震动磨样机中 5 min,最后放在铝质淘沙盘中淘洗富集锆石,在双目镜下人工挑选锆石。整个分选流程使用装置彻底清洗,避免样品混染。

将待测锆石以环氧树脂固定,抛光至暴露出锆石中心面,用反光、透光及阴极发光(CL)照相,在中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP II 型离子探针仪上完成 U-Pb 测年。应用标准锆石 TEM (417 Ma) 进行元素间的分馏校正,并用标准锆石 SL13 (572 Ma, $U=238 \mu\text{g/g}$) 标定样品的 $U(\mu\text{g/g})$ 、 $Th(\mu\text{g/g})$ 及 $Pb(\mu\text{g/g})$ 含量 (Compton *et al.*, 1984; 宋彪等, 2002)。详细实验流程和原理参考文献(简平等 2003),SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果数据处理使用 Ludwig 提供的 Isoplot 软件,数据处理过程见文献(简平等, 2003)。因蛇绿岩辉长岩中锆石的 $U(\mu\text{g/g})$ 、 $Th(\mu\text{g/g})$ 和 $Pb(\mu\text{g/g})$ 含量较低, Th 和 U 的含量相当,故以实测 ^{207}Pb 校正普通铅,单个数据点的分析误差均为 1σ ,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。

4 蛇绿岩岩石化学特征

江错蛇绿岩辉长岩—辉绿岩主量元素分析结果如表 2 所示。江错蛇绿岩辉长岩—辉绿岩的 SiO_2 含量变化不大,在 46.10%~50.25% 之间,平均为 48.38%,略低于 MORB 中 SiO_2 的含量(48.77%),也低于 Upper Troodos 枕状熔岩(53.27%) (Pearce, 1975; Cameron, 1985; Thy and Moores, 1988) 和 Semail 玄武岩中 SiO_2 的含量(53.21%) (Alabaster *et al.*, 1982)。

江错蛇绿岩辉长岩—辉绿岩的 MgO 含量为 9.89%~13.88%,平均为 11.25%,高于大西洋中脊

表 2 江错蛇绿岩辉长岩、辉绿岩主量元素质量百分含量分析结果(%)

Table 2 Contents of major elements of gabbro and diabase from Jiang Tso

样品	7XJC1	7XJC2	7XJC3	7XJC7	7XJC4	7XJC5	7XJC6
岩性	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩
SiO ₂	49.47	50.25	50.07	46.50	47.81	48.45	46.10
TiO ₂	0.60	0.53	0.18	0.20	0.17	0.45	0.11
Al ₂ O ₃	15.05	13.54	15.85	14.96	16.89	16.54	17.80
Fe ₂ O ₃	8.09	10.10	4.73	7.84	5.94	5.64	3.74
MnO	0.08	0.11	0.08	0.12	0.08	0.09	0.07
MgO	11.09	9.89	11.25	13.88	12.05	9.86	10.74
CaO	10.53	11.39	10.86	12.35	10.58	15.55	19.37
Na ₂ O	2.30	2.31	1.63	2.08	1.89	1.34	0.32
K ₂ O	0.96	0.53	2.21	0.40	0.85	0.38	0.20
P ₂ O ₅	0.04	0.06	0.02	0.06	0.01	0.04	0.01
LOI	1.49	0.99	2.86	1.24	3.54	1.34	1.28
Total	99.72	99.70	99.73	99.61	99.81	99.68	99.75
FeOt	7.28	9.09	4.26	7.05	5.34	5.07	3.37
Mg [#]	73.27	66.20	82.63	77.98	80.23	77.76	85.17

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ (摩尔比); $FeOt = FeO + 0.9 \times Fe_2O_3$.

(MAR)玄武岩平均成分的相应质量百分含量(9.04%),也高于 Troodos 枕状熔岩(7.79%)和 Se-mail 玄武岩中 MgO(3.18%)的含量,显示明显富 MgO 的特点.江错辉绿岩的 $Mg^{\#}$ 为 77.76~85.17,平均为 80.21,高于原生岩浆范围($Mg^{\#} = 68 \sim 75$)(Wilson, 1989);辉长岩的 $Mg^{\#}$ 为 66.2~82.63,平均为 75.02,与原生岩浆范围($Mg^{\#} = 68 \sim 75$)(Wilson, 1989)相接近,具有初始岩浆的特点,也可能与地幔岩发生过混合作用.

江错蛇绿岩辉长岩—辉绿岩中的 TiO₂ 平均质量百分含量分别为 0.37%和 0.11%,也都比大洋中脊玄武岩(1.0%~1.5%)的低,表明该蛇绿岩不太可能产于典型的大洋中脊(MOR)环境.江错蛇绿岩

中辉长岩—辉绿岩的 Na₂O 平均质量百分含量分别为 2.08%和 1.18%,低于洋脊玄武岩的平均值(2.75%),也低于碱性玄武岩的平均值(3.20%);而 K₂O 的平均质量百分含量分别为 1.02%和 0.47%,辉绿岩的 K₂O 质量百分含量与 MORB 的平均含量(0.14%)相当,而辉长岩则比 MORB 的平均质量百分含量(0.14%)高很多.辉长岩和辉绿岩的 CaO/Al₂O₃ 比值分别为 0.76 和 0.88,是 MORB 和 OIB 相应值(均为 0.7)的 1.26 和 1.09 倍,表明两类岩石均是相对高钙贫铝.江错辉长岩样品的 P₂O₅ 质量百分含量分别为 0.02%~0.06%,平均值为 0.04%;辉绿岩样品的 P₂O₅ 质量百分含量为 0.01%~0.04%,平均值为 0.02%,均低于 N-MORB 的 P₂O₅ 含量(0.09%)(Hofmann, 1988).总的来说,江错蛇绿岩基性岩与 N-MORB 接近,但比 N-MORB 具有较高的 Mg[#]、低 Ti、K、Na、P 的特征.表明其形成环境为不典型的 N-MORB 型.

在 TAS 图(图 5)上江错蛇绿岩基性岩均落入到辉长岩中.高场强元素 Nb、Ce、Zr、Y、Se、Cr、Ni 和 REE 在交代过程中相对具有不活动的特性,因此被认为能保存未经变质之前的丰度(Rollinson, 1993; Janney and Castillo, 1996),在辉长岩—辉绿岩—玄武岩中也能基本保持一致.因此选用 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图进行岩石类型划分(图 5),江错蛇绿岩基性岩样品均落在玄武岩区域内,与 TAS 投图结果相一致.

主量元素对 MgO 的 Harker 图解(图 6)呈现较好的变异趋势,随着 MgO 质量百分含量的增高, SiO₂ 质量百分含量逐渐降低,具有较好的一致性; Al₂O₃ 质量百分含量几乎保持恒定,由于有较小程度的结晶分异作用,主要是因为单斜辉石晶出现的

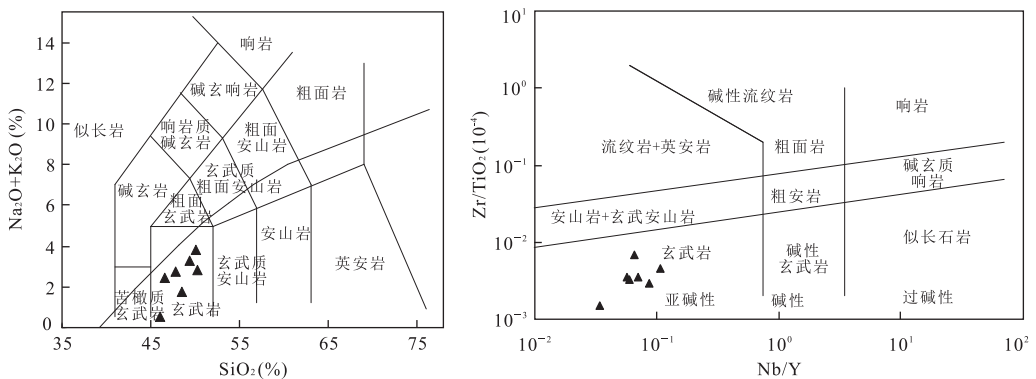


图 5 江错蛇绿岩 SiO₂-Na₂O+K₂O 和 Nb/Y vs. Zr/TiO₂ 岩石分类

Fig.5 SiO₂ vs. Na₂O+K₂O and Nb/Y vs. Zr/TiO₂ diagrams of Jiang Tso ophiolite

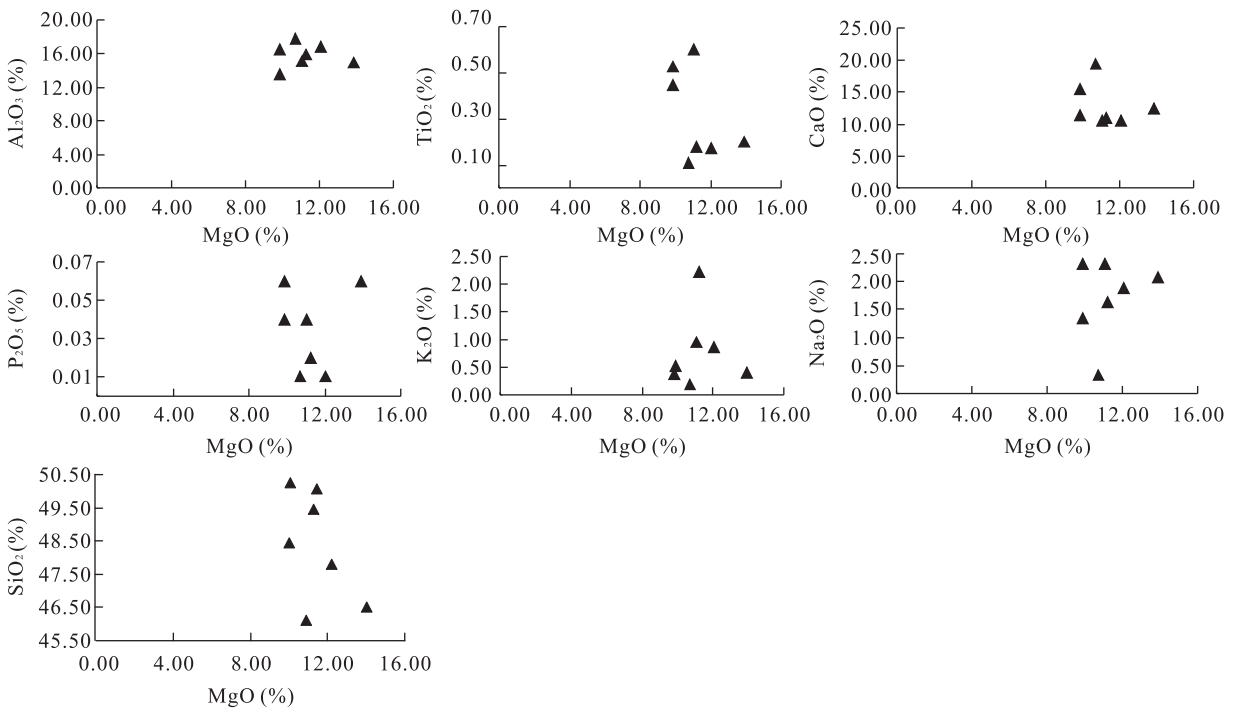


图 6 主要元素(SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、CaO、P₂O₅、K₂O、Na₂O)对 MgO 的 Harker 图解

Fig.6 Harker diagrams of major elements(SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, CaO, P₂O₅, K₂O, Na₂O) vs. MgO

结果,江错蛇绿岩 TiO₂ 出现降低的趋势;而 Na₂O 和 K₂O 的质量百分含量波动性较大,这可能与薄片观察到的斜长石钠化(钠长石净边)有关,表明江错蛇绿岩在后期成岩过程中有海水交代作用,造成 Na 的增高和 K 的相对降低。

5 蛇绿岩地球化学元素特征

5.1 蛇绿岩微量元素特征

江错蛇绿岩辉长岩及辉绿岩微量元素分析结果见表 3。江错蛇绿岩辉长岩的 Zr/Nb = 22.288 ~ 107.893、Th/Yb = 0.015 ~ 0.135、Zr/Y = 0.523 ~ 1.832 和 Ti/Y = 164.958 ~ 245.541,与 N-MORB 的对应值(分别为 Zr/Nb = 31.800、Th/Yb = 0.040、Zr/Y = 1.435、Ti/Y = 254.00)比较接近,而明显有别于 OIB 和 E-MORB 的对应值(分别为 Zr/Nb = 5.800、Th/Yb = 1.900、Zr/Y = 9.700、Ti/Y = 594.000 和 Zr/Nb = 38.800、Th/Yb = 0.250、Zr/Y = 3.320、Ti/Y = 273.000);辉绿岩的 Th/Yb 和 Zr/Y 比值分别为 0.051 ~ 0.116 和 1.124 ~ 1.507,平均值分别为 0.061 和 0.976,都与 N-MORB 的对应值比较接近,而明显有别于 OIB 和 E-MORB 的对应值。但辉长岩的 La/Nb 和 Y/Nb 比值的范围分别

是 1.088 ~ 2.327 和 14.110 ~ 28.584,平均分别为 1.940 和 18.796;辉绿岩的 La/Nb 比值变化范围是 1.439 ~ 2.527,平均为 1.373,都比 N-MORB 的相应值大(分别为 1.07 和 11.20);而辉绿岩的 Y/Nb 比值的范围是 9.309 ~ 16.763,平均 9.341,则比 N-MORB 的相应值小(为 11.2);但与 OIB 和 E-MORB 对应值(分别为 0.800、0.800 和 0.760、3.500)相比,相差更大,这表明本区蛇绿岩辉长岩和辉绿岩显示出 N-MORB 的性质,但又不同于典型的 N-MORB,与 OIB 和 E-MORB 则完全不同。

从微量元素蛛网图(图 7a)上看,江错辉长岩和辉绿岩的配分曲线非常相似,总体都显示为平坦型分布模式,反映了亏损地幔源区玄武岩的地球化学特性。但大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba 富集和高场强元素 Th、Hf、Ta、Nb 亏损。微量元素特征江错蛇绿岩形成过程中可能遭受了陆源物质的混染,反映了消减作用的影响,根据稀土元素元素的球粒陨石标准化配分型式(图 7b),基性岩产生 LREE 略富集特征,这也正好印证了这一点。

5.2 蛇绿岩稀土元素特征

江错辉长岩和辉绿岩稀土元素总量较低,在 7.65 ~ 18.69 μg/g 之间,平均为 13.65 μg/g,分别是球粒陨石和 OIB 稀土总量(分别为 3.29 μg/g 和 79.65 μg/g)的 4.15 和 0.17 倍,但与 N-MORB 的稀

表 3 江错蛇绿岩岩石微量(稀土)元素含量(10^{-6})及不相容元素比值

Table 3 Contents of trace (REE) elements of Jiang Tso ophiolite

样品号	7XJC1	7XJC2	7XJC3	7XJC7	7XJC4	7XJC5	7XJC6
Sc	43.11	39.91	45.84	43.38	33.93	32.67	25.56
Ti	3 270.60	2 922.50	1 110.00	1 208.90	975.90	2 487.40	663.90
V	227.00	276.00	134.50	140.90	114.30	153.80	75.63
Cr	513.90	438.30	498.40	1 406.70	296.00	1 004.00	1 570.10
Mn	625.60	909.20	659.60	989.20	590.80	671.00	576.80
Co	39.68	46.95	30.80	48.07	26.21	28.75	31.72
Ni	125.40	131.40	147.50	217.90	143.30	177.20	272.10
Cu	12.62	6.80	13.56	85.91	14.45	43.46	65.22
Zn	18.62	19.86	18.46	40.66	26.19	41.98	66.69
Ga	11.52	11.09	8.43	8.94	8.91	9.14	7.73
Ge	1.22	1.27	1.40	1.15	1.26	1.25	1.07
Rb	47.78	19.52	130.00	14.68	38.23	17.98	11.29
Sr	145.20	142.90	151.40	203.40	220.60	143.00	83.23
Y	13.32	13.09	6.73	5.77	6.94	8.59	2.83
Zr	21.04	18.89	12.33	3.02	7.79	12.95	3.61
Nb	0.94	0.75	0.45	0.20	0.75	0.76	0.17
Ba	23.50	20.03	101.50	61.25	38.67	36.39	34.87
La	1.24	1.54	0.93	0.47	1.14	1.10	0.43
Ce	3.19	3.72	2.37	1.16	3.27	2.80	0.97
Pr	0.54	0.62	0.40	0.21	0.56	0.48	0.15
Nd	2.99	3.21	2.06	1.30	2.82	2.56	0.84
Sm	1.10	1.13	0.67	0.48	0.82	0.83	0.28
Eu	0.43	0.49	0.28	0.31	0.40	0.40	0.16
Gd	1.57	1.58	0.94	0.76	1.09	1.17	0.39
Tb	0.32	0.33	0.18	0.16	0.19	0.22	0.07
Dy	2.19	2.21	1.15	1.09	1.32	1.50	0.53
Ho	0.49	0.50	0.26	0.25	0.28	0.33	0.11
Er	1.43	1.41	0.75	0.66	0.76	0.94	0.31
Tm	0.21	0.22	0.11	0.09	0.11	0.13	0.04
Yb	1.44	1.48	0.68	0.62	0.73	0.90	0.29
Lu	0.23	0.25	0.11	0.10	0.11	0.14	0.05
Hf	0.66	0.63	0.38	0.16	0.26	0.43	0.12
Ta	0.07	0.06	0.03	0.01	0.04	0.05	0.01
Pb	1.07	0.53	3.66	1.87	9.59	3.54	4.29
Th	0.03	0.04	0.09	0.01	0.08	0.05	0.02
U	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	0.07	0.08
LREE/HREE	1.20	1.34	1.61	1.05	1.96	1.53	1.58
Ce/Zr	0.15	0.20	0.19	0.38	0.42	0.22	0.27
Zr/Nb	22.38	25.19	27.40	15.10	10.39	17.04	21.24
Th/Yb	0.02	0.03	0.13	0.02	0.11	0.06	0.07
Zr/Y	1.58	1.44	1.83	0.52	1.12	1.51	1.28
Ti/Y	245.54	223.26	164.93	209.51	140.62	289.57	234.59
La/Nb	1.32	2.05	2.07	2.35	1.52	1.45	2.53
Y/Nb	14.17	17.45	14.96	28.85	9.25	11.30	16.65
Th/Ta	0.43	0.67	3.00	1.00	2.00	1.00	2.00
La/Ta	17.71	25.67	31.00	47.00	28.50	22.00	43.00
δ Eu	1.00	1.12	1.08	1.57	1.29	1.24	1.48

土总量($39.10 \mu\text{g/g}$)较接近,轻重稀土分异不明显, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 $1.06\sim 1.61$, 平均为 1.30 。岩石的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 0.63\sim 0.89$, 平均为 0.78 , 比 N-MORB 的相应值(0.61)略大; 而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.88\sim$

1.15 , 平均为 0.98 , 说明岩石重稀土元素之间分异不明显; 辉长岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.62\sim 0.99$, 平均为 0.72 ; $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.53\sim 0.97$, 平均为 0.70 , 与 N-MORB 的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值(分别为 0.59

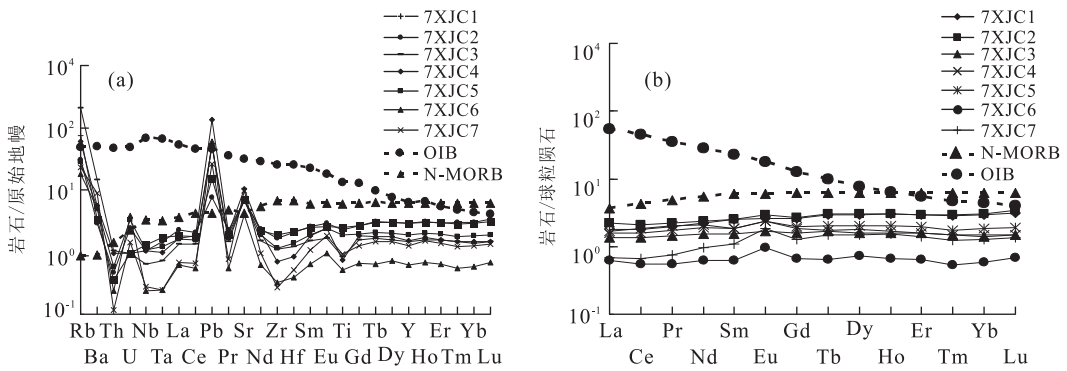


图 7 江错蛇绿岩微量元素对原始地幔蜘蛛图(a)和稀土元素配分(b)

Fig.7 Pattern of trace elements of Jiang Tso ophiolite (a) and REE pattern of Jiang Tso ophiolite (b)

和 0.76) 较接近, 表现出 N-MORB 的特征. 而本区辉绿岩的稀土元素总量在 4.63~13.59 $\mu\text{g/g}$ 之间, 平均为 10.57 $\mu\text{g/g}$, 比辉长岩的低一些, 分别是球粒陨石和 OIB 稀土总量的 3.21 和 0.13 倍. 轻重稀土分异不明显, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 1.04, 平均为 1.10. 样品的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 同样为 0.85~0.98, 平均为 0.91, 与 N-MORB 的相应值相当; 而样品的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.07\sim 1.24$, 平均为 1.14; 岩石的 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.87\sim 1.12$, 平均为 1.02; $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 0.86\sim 1.25$, 平均为 1.01, 与 N-MORB 的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值相差不大.

稀土元素特别是重稀土元素受海水蚀变、热液交代或后期变质作用的影响甚微, 因此稀土分配型式能较好地反映岩浆形成时的特点. 在球粒陨石标准化配分图上(图 7b), 江错蛇绿岩基性岩表现为平坦的模式, 各样品 REE 配分型式相互平行, 只有位置的高低, 显示其稀土分异程度相当, 具有同源岩浆的特征表明辉长岩和辉绿岩可能来自同一源区. 江错蛇绿岩同典型 N-MORB 的元素含量差别, 指示江错蛇绿岩并非形成于典型 N-MORB 的大洋中脊环境 (Pearce *et al.*, 1984), 而是形成于成熟的扩张脊环境, 为俯冲带之上的弧后盆地扩张脊环境.

6 SHRIMP U-Pb 定年

江错蛇绿岩辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年样品位(JC3)位于江错西侧 1 km, 岩性为辉长岩. 样品中锆石的阴极发光图像如图 8 所示. 这些锆石颗粒均发育有规则的韵律环带结构, 反映其为岩浆成因锆石特点. 对江错蛇绿岩中辉长岩的 11 个定年锆石进行了 11 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析, 结果列于表 4.

锆石颗粒粒度变化于 20~100 μm 之间, 通过

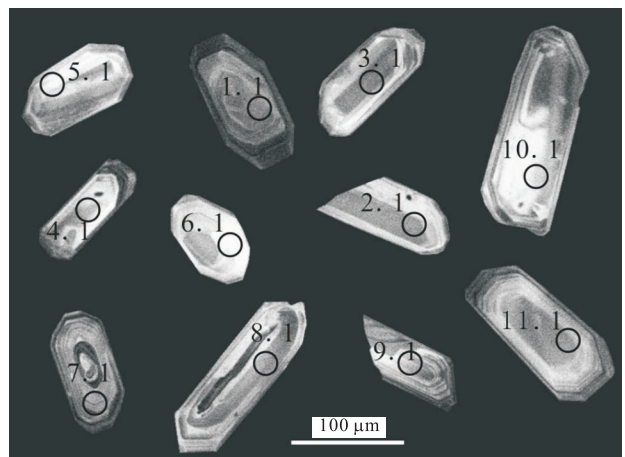


图 8 江错蛇绿岩中辉长岩锆石 CL 图像

Fig.8 Cathode luminescence images of zircons in gabbro from Jiang Tso ophiolite

阴极发光照片显示大多数锆石具有较好的晶形, 并显示出岩浆结晶环带或条带结构, 反应岩浆成因的锆石的特点. 不同结构类型的锆石结晶时代相当, 说明辉长岩形成时的岩浆事件相对简单. 测定结果表 3 所示, 可见 U 和 Th 的含量较高, 分别介于 86~485 $\mu\text{g/g}$ 和 62~1021 $\mu\text{g/g}$, Th/U 介于 0.50~2.18. 在 U-Pb 谐和图上 9 个数据点集中分布(图 9), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄变化范围为 178.0~200.1 Ma, 加权平均值为 189.8 ± 3.3 Ma (95% 置信度, MSWD = 0.97), 该年龄即为辉长岩的结晶年龄.

蛇绿岩作为构造侵位于大陆上的古大洋岩石圈残片, 其形成时代对于恢复古洋形成演化史、重建古板块构造格局具有重要意义. 本文所分析的辉长岩是研究区特提斯洋壳轴下岩浆房过程的产物, 其形成年龄代表了江错地区特提斯洋海底扩张的时代, 即江错洋盆形成于 189.8 ± 3.3 Ma (早侏罗世晚期). 此外, 班公湖—怒江缝合带西段班公湖地区方辉橄

表 4 江错蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 4 SHRIMP zircon U-Pb age data of gabbro from Jiang Tso ophiolite

测点	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g/g}$)	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{235}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)	$\pm 1\sigma$
JC1.1	86	62	0.74	6.01	2.4	0.37	39.8	0.030 2	4.2	191.7	7.9
JC2.1	184	205	1.15	1.11	4.7	0.35	13.3	0.029 6	2.2	188.1	4.1
JC3.1	163	79	0.50	3.96	4.3	0.28	30.8	0.029 7	2.8	189.0	5.2
JC5.1	200	159	0.82	3.02	5.2	0.25	23.0	0.029 4	2.9	187.1	5.3
JC6.1	322	438	1.41	1.66	8.1	0.23	16.0	0.029 0	2.2	184.0	3.9
JC7.1	114	82	0.74	6.80	3.3	0.43	31.9	0.031 5	3.5	199.7	6.9
JC8.1	115	110	0.99	10.74	3.1	0.19	77.6	0.028 0	4.1	178.0	7.3
JC10.1	516	3418	6.84	2.93	12.9	0.21	15.3	0.028 3	2.5	179.7	4.5
JC12.1	485	1021	2.18	3.95	13.0	0.32	34.2	0.029 9	2.2	190.1	4.1
JC13.1	181	156	0.89	7.29	5.3	0.20	38.3	0.031 5	3.1	200.1	6.1
JC15.1	172	173	1.04	6.43	4.8	0.23	40.3	0.030 2	2.9	191.9	5.5

注： $^{206}\text{Pb}_c$ (%)为普通 ^{206}Pb 占总 ^{206}Pb 的百分比； Pb^* 为放射性成因铅；普通铅用 ^{204}Pb 校正。

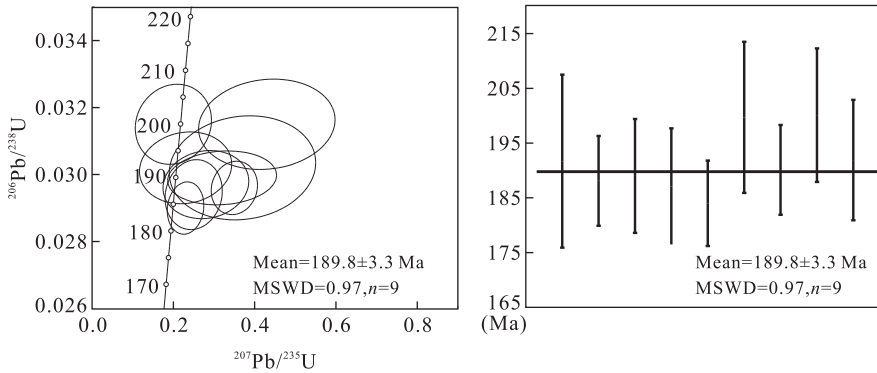


图 9 江错蛇绿岩中辉长岩锆石 U-Pb 年龄的谐和图

Fig.9 Zircons U-Pb Concordia diagram of gabbro from Jiang Tso ophiolite

榄岩 Re-Os 年龄为 254 ± 28 Ma (黄启帅等, 2012a), 舍马拉沟蛇绿岩中层状辉长岩的 Sm-Nd 内部等时线年龄为 191 ± 22 Ma (邱瑞照等, 2004), 西段班公湖蛇绿岩辉长岩锆石年龄为 167 ± 1.4 Ma (史仁灯, 2007), 西段班公湖地区居鲁蛇绿岩辉长岩锆石年龄 103.8 ± 3.9 Ma (Liu *et al.*, 2014); 孙立新等 (2011) 在安多多普尔曲一带发现有斜长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 188.0 ± 2.0 Ma, 属早侏罗世中晚期, 他们认为此年龄代表了洋壳形成的年龄, 那曲蛇绿岩辉长岩锆石年龄为 183.7 ± 1 Ma (黄启帅等, 2012b). 东段丁青东南辉长岩糜棱岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 193.3 ± 3.3 Ma (游再平, 1997), 以上这些同位素定年结果说明班公湖—怒江蛇绿岩带各段洋盆形成时代都有所差别, 存在东早西晚的特点。

7 蛇绿岩形成构造环境分析

江错蛇绿岩中辉长岩和辉绿岩主量元素 TiO_2

平均含量分别为 0.37% 和 0.11%, TiO_2 含量较低, 明显低于洋脊玄武岩 TiO_2 的平均值 1.15% (Pearce, 1983), 与岛弧区火山岩 (0.58%~0.85%) 含量较为接近 (Pearce, 1983); P_2O_5 平均含量分别为 0.04% 和 0.02%, 与洋脊玄武岩的 P_2O_5 的平均含量 0.09% 相差甚远, 二者暗示了江错辉长岩和辉绿岩非典型大洋中脊的特点. 在球粒陨石标准化配分图上 (图 7b), 辉长岩和辉绿岩的稀土配分模式均呈平坦型曲线; 辉长岩和辉绿岩的 Th/Yb 和 Zr/Y 等微量元素比值均一致反映了 N-MORB 的地球化学特征; 据 Elthon (1991) 和 Pearce (1991) 可知, 形成于 MORB 环境下的玄武岩中 $\text{Th}/\text{Ta} = 0.75 \sim 2.00$, 江错蛇绿岩辉长岩和辉绿岩的 Th/Ta 平均值分别为 1.31 和 1.15, 这也说明江错蛇绿岩具有 N-MORB 性质. 但是据 Wilson (1989) 可知, N-MORB 的 Zr/Nb 值多大于 30, 江错蛇绿岩基性岩 Zr/Nb 值均小于 30, 说明江错蛇绿岩不完全具有 MORB 的特征. 本区辉长岩和辉绿岩微量元素 MORB 标准

化的配分图并非呈现直线型式,而是显示 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素的富集以及 Ti、Nb 和 Ta 亏损,特别是 Nb 的亏损,这与典型的大洋中脊玄武岩明显不同.大洋中脊玄武岩一般不会出现 K、Rb、Ba 等元素富集,更不会出现 Nb 的亏损,但是在岛弧区,产生的岛弧火山岩往往具有这样的地球化学特征.江错蛇绿岩的这些特征指示其形成过程中可能遭受了陆源物质的混染,反映了消减作用的影响.

蛇绿岩代表残余的古洋壳,按照洋壳的形成构造背景通常将蛇绿岩划分为 MOR 和 SSZ 两种类型 (Pearce *et al.*, 1984).通常成熟的大洋中脊玄武岩

由于形成于亏损的地幔源区,而且熔融程度较高,因此玄武岩在地球化学特征上表现为轻稀土元素明显亏损,与 N-MORB 相比 SSZ 型蛇绿岩的玄武岩表现为高场强元素明显亏损.

蛇绿岩的形成构造环境可以通过微量元素比值特征加以认识(图 10),在江错蛇绿岩辉长岩和辉绿岩的微量元素构造环境判别图的 FeOt-MgO-Al₂O₃ 判别图中样品全部落入到 MORB 中;在 Ti-Zr-Y×3 判别图中,样品基本上都在岛弧拉斑玄武岩附近;在 Ti/100-Zr-Sr/2 判别图中,样品也都是在岛弧玄武岩附近;在 Hf/3-Th-Nb/16 判别图中,

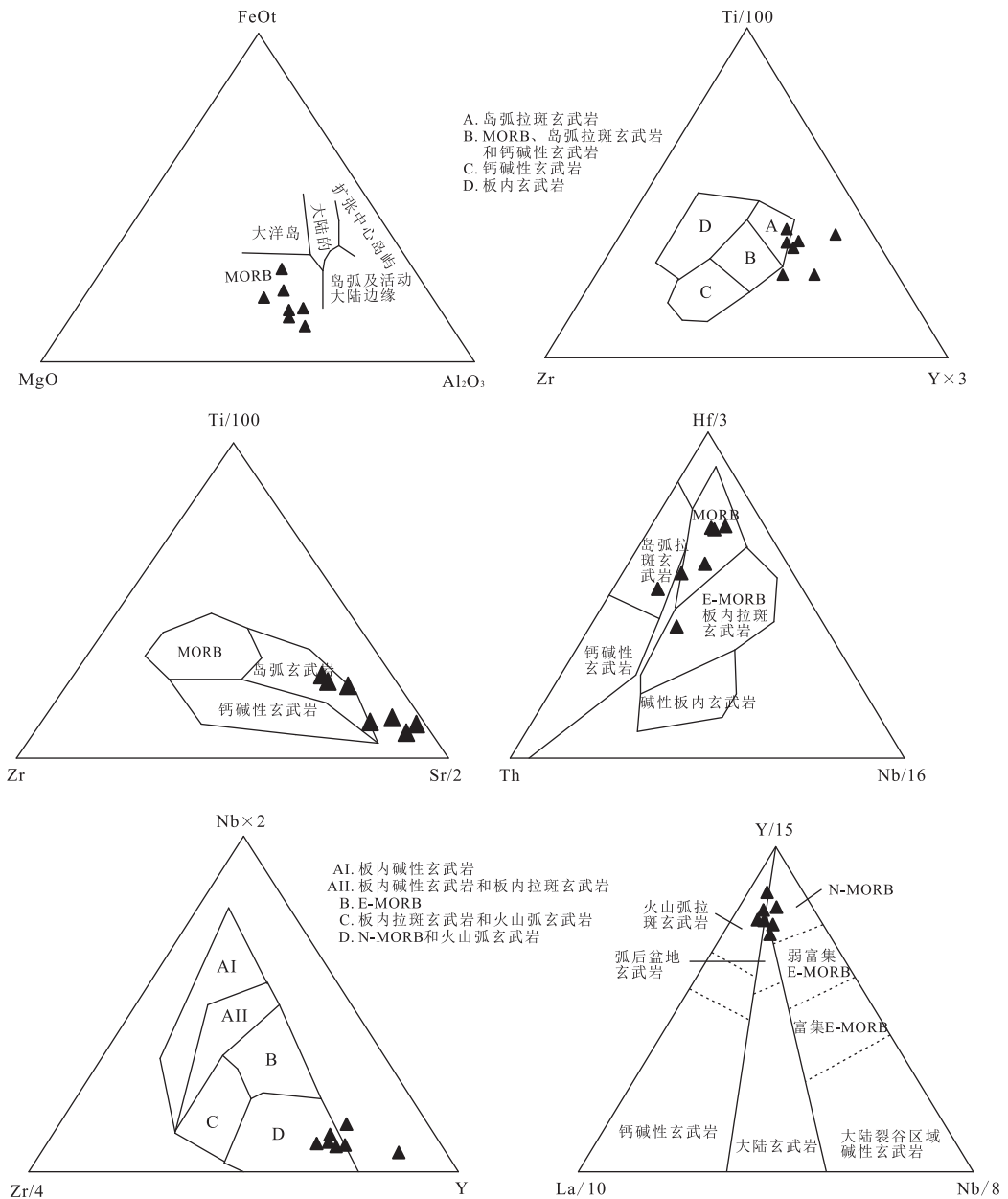


图 10 江错蛇绿岩微量元素构造环境判别图解

Fig.10 Trace elements tectonic discrimination diagram of Jiang Tso ophiolite

样品都落入到 MORB 和岛弧拉斑玄武岩中;在 Nb \times 2-Zr/4-Y 判别图中,样品都落入到 N-MORB 和火山弧玄武岩中;在 Y/15-La/10-Nb/8 判别图中,样品落入到 N-MORB 和火山弧玄武岩中(图 10)。

综上所述,通过各类判别图可以看出江错蛇绿岩辉长岩和辉绿岩既具有 N-MORB 的特征,又有大洋火山弧玄武岩的特征,并且又显示陆源物质混染的地球化学印迹。表明江错蛇绿岩不是洋脊型而可能是岛弧型(SSZ),或者说是与岛弧有关的蛇绿岩。在全球大地构造环境中,俯冲带之上的弧间盆地和不成熟的弧后盆地次级扩张产生的新洋壳往往兼有这两种地球化学特征。韦振权(2007)对蓬湖西蛇绿岩研究后认为,蓬湖西蛇绿岩形成 SSZ 之上的弧后盆地环境;而白拉蛇绿岩和觉翁蛇绿岩也形成于弧后盆地环境(汤耀庆和王方国,1984;王希斌等,1987);湖区南侧的拉弄蛇绿岩也形成与弧后盆地环境(徐力峰,2009)。在江错蛇绿岩西北面的东卡错微路块上,发育一套岩浆弧型火山岩(去申拉组火山岩)和早白垩世酸性侵入岩,是特提洋向南俯冲消减过程中形成的。江错蛇绿岩成因是北侧的特提斯洋在中晚侏罗世向南俯冲消减过程中,在其后缘诱发拉张作用引起次级弧后扩张,形成了新的大洋岩石圈,并在后来的拼贴过程中造成蛇绿岩就位。结合区域地质构造和地球化学特征分析,江错蛇绿岩形成构造环境应为俯冲带之上(SSZ)的弧后盆地扩张脊环境。

8 结论

(1)江错蛇绿岩位于班公湖—怒江缝合带中段,主要由纯橄岩、变质橄榄岩、辉长岩和辉绿岩组成,具有比 N-MORB 较高的 Mg[#],低 Ti、K、Na、P 的特征,富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba 和亏损高场强元素 Th、Hf、Ta、Nb,REE 配分图总体显示为平坦型分布模式。

(2)江错蛇绿岩辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 189.8 \pm 3.3 Ma(MSWD=0.97),该结果代表了班公湖怒江缝合带中段江错地区特提斯洋的扩张时代。

(3)通过地球化学元素分析认为江错蛇绿岩是形成于 SSZ 之上的弧后盆地扩张脊环境。

致谢:本文在研究过程中,南京大学周国庆老师曾提出许多宝贵意见,西藏地质调查院刘鸿飞院长、曾庆高总工程师在野外工作进行指导以及匿名审稿专家的建议,在此诚表谢意。

References

- Alabaster, T., Pearce, J. A., Malpas, J., 1982. The Volcanic Stratigraphy and Petrogenesis of the Oman Ophiolite Complex. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 81 (3): 168 — 183. doi:10.1007/BF00371294
- Bao, P. S., Wang, J., 2000. Petrology, Geochemistry and Tectonic Significance of Qingzang Plateau Suture. In: Xiao, X. C., Li, T. D., eds., *The Tectonic Evolution and Uplift Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 139 — 189 (in Chinese).
- Bao, P. S., Xiao, X. C., Su, L., et al., 2007. Tectonic Environment of Dong Tso Ophiolite: Petrology, Geochemistry and Chronology, Tibet. *Science in China (Ser. D)*, 37 (3): 298 — 307 (in Chinese).
- Bao, P. S., Xiao, X. C., Wang, J., 1996. Geochemistry and Genesis of Dongcuo Ophiolite, Tibet. Geological Publishing House, Beijing, 190 — 194 (in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Tibet, 1993. *Regional Geology of the Tibet Autonomous Region*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cameron, W. E., 1985. Petrology and Origin of Primitive Lavas from the Troodos Ophiolite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89(2—3): 239 — 255. doi:10.1007/BF00379457
- Chen, Y. L., Zhang, K. Z., Yang, Z. M., et al., 2006. Discovery of a Complete Ophiolite Section in the Jueweng Area, Nagqu County, in the Central Segment of the Bangong Co-Nujiang Junction Zone, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 694 — 699 (in Chinese with English abstract).
- Compton, W., Williams, I. S., Meyer, C., 1984. U-Pb Geochronology of Zircons from Lunar Breccia 73217 Using a Sensitive High Mass-Resolution Ion Microprobe. *Geophy. Res.*, 89 (S02): 525 — 534. doi: 10.1029/JB089iS02p0B525
- Elthon, D., 1991. Geochemical Evidence for Formation of the Bay of Islands Ophiolite above a Subduction Zone. *Nature*, 354: 140 — 143. doi:10.1038/354140a0
- Fan, S. Q., Shi, R. D., Ding, L., et al., 2010. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of the Plagiogranite in Gaize Ophiolite of Central Tibet and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 467 — 478 (in Chinese with English abstract).
- Girardeau, J., Marcoux, J., Allègre, C. J., et al., 1984. Tectonic Environment and Geodynamic Significance of the Neocimmerian Dongqiao Ophiolite, Bangong-Nujiang Suture Zone, Tibet. *Nature*, 307: 27 — 31. doi: 10.1038/

307027a0

- Guo, T. Y., Liang, D. Y., Zhang, Y. Z., et al., 1991. Ngari Geology, Tibet. China University of Geosciences Press, Beijing (in Chinese).
- Haines, S. S., Klemperer, S. L., Brown, L., et al., 2003. In-depth III Seismic Data; From Surface Observations to Deep Crustal Processes in Tibet. *Tectonics*, 22(1): 1001. doi: 10.1029/2001TC001305
- He, Z. H., Yang, D. M., Wang, T. W., 2006. Age, Geochemistry and Its Tectonic Significance of Kaimeng Ophiolites in Jiali Fault Belt, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 653—660 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth; The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90(3): 297—314. doi: 10.1016/0012—821X(88)90132—X
- Huang, Q. S., Shi, R. D., Ding, B. H., et al., 2012a. Re-Os Isotopic Evidence of MOR-Type Ophiolite from the Bangong Co for the Opening of Bangong-Nujiang Tethys Ocean. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 465—478 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Q. S., Shi, R. D., Liu, D. L., et al., 2012b. The Os Isotope Characteristic and Its Significance of Nakchu Ophiolite, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 57(33): 3154—3161 (in Chinese).
- Ishii, T., Robinson, P. T., Maekawa, H., et al., 1992. Petrological Studies from Diapiric Serpentine Seamounts in the Izu-Ogazawara-Mariana Forearc. In: Fryer, P., Pearce, J. A., Stokking, L. B., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 125, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 445—485.
- Janney, P. E., Castillo, P. R., 1996. Basalts from the Central Pacific Basin: Evidence for the Origin of Cretaceous Igneous Complexes in Jurassic Western Pacific. *Geophys. Res.*, 101(B2): 2 875—2893. doi: 10.1029/95JB03119
- Jian, P., Liu, D. Y., Zhang, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Ophiolite and Leucocratic Rocks within Ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 439—456 (in Chinese with English abstract).
- Lai, S. C., Liu, C. Y., 2003. Geochemistry and Genesis of the Island-Arc Ophiolite in Anduo Area, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 675—682 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Liu, Y., Tu, X. L., et al., 2002. Precise Determination of Chemical Compositions in Silicate Rocks Using ICP-AES and ICP-MS: A Comparative Study of Sample Digestion Techniques of Alkali Fusion and Acid Dissolution. *Geochimica*, 31(3): 289—294 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W. D., Chen, D. Q., 1990. The Feature of the Ophiolite in Gerze-Sewa, North Tibet. *Journal of Chengdu College of Geology*, 17(2): 17—25 (in Chinese).
- Liu, W. L., Xia, B., Zhong, Y., et al., 2014. Age and Composition of the Rebang Co and Julu Ophiolites, Central Tibet: Implications for the Evolution of the Bangong Meso-Tethys. *International Geology Review*, 56(4): 430—447.
- Liu, Y., Liu, H. C., Li, X. H., 1996. Simultaneous and Precise Determination of 40 Trace Elements in Rock Samples Using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552—558 (in Chinese with English abstract).
- Luo, L., An, X. Y., Wu, N. W., et al., 2014. Evolution of Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basin in Bangonghu-Shuanghu-Nujiang-Changning-Menglian Suture Zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8): 1169—1184. doi: 10.3799/dqkx.2014.102 (in Chinese with English abstract)
- Pan, G. T., Zhu, D. C., Wang, L. Q., et al., 2004. Bangong Lake-Nu River Suture Zone—The Northern Boundary of Gondwanaland: Evidence from Geology and Geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 371—382 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 1975. Basalt Geochemistry Used to Investigate Past Tectonic Environments on Cyprus. *Tectonophysics*, 25(1—2): 41—67. doi: 10.1016/0040—1951(75)90010—4
- Pearce, J. A., 1983. The Role of Sub-Continental Lithosphere in Age Genesis at Destructive Plate Margins. In: Hawkesworth, C. J., Norry, M. J., eds., Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Shiva Publishing House, Nantwich, 230—249.
- Pearce, J. A., 1991. Ocean Floor Comes Ashore. *Nature*, 354: 110—111.
- Pearce, J. A., Deng, W., 1988. The Ophiolites of the Tibet Geotraverse. Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 327(2594): 215—238. doi: 10.1098/rsta.1988.0127
- Pearce, J. A., Lippard, S. J., Roberts, S., 1984. Characteristics and Tectonic Significance of Supra-Subduction Zone Ophiolites. In: Kokel, B. P., Howells, M. F., eds., Marginal Basin Geology. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 77—94. doi: 10.1144/GSL.SP.1984.016.01.06
- Qiu, R. Z., Zhou, S., Deng, J. F., et al., 2004. Dating of Gabbro in the Shemalagou Ophiolite in the Western Segment of

- the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt, Tibet—With a Discussion of the Age of the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt. *Geology in China*, 31(3): 262—268 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. John Wiley & Sons, New York, 155.
- Shi, R. D., 2005. Comment on the Progress in and Problems on Ophiolite Study. *Geological Review*, 51(6): 681—693 (in Chinese with English abstract).
- Shi, R. D., 2007. The Age of Bangonghu SSZ-Type Ophiolite and Restrict of the Ban-Nu Ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52(2): 223—227 (in Chinese).
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L. X., Bai, Z. D., Xu, D. B., et al., 2011. Geological Characteristics and Zircon U-Pb SHRIMP Dating of the Plagiogranite in Amduo Ophiolites, Tibet. *Geological Survey and Research*, 34(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. Q., Wang, F. G., 1984. Forming Environment of Lake Region Ophiolite, North Tibet. In: Himalaya Geological Collection Editorial Committee II, ed., The Himalaya Geological Investigation Results of China and French, 1981. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Thy, P., Moores, E. M., 1988. Crustal Accretion and Tectonic Setting of the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Tectonophysics*, 147(3—4): 221—245. doi:10.1016/0040—1951(88)90188—6
- Wang, B. D., Xu, J. F., Zeng, Q. G., et al., 2007. Geochemistry and Genesis of Lhaguo Tso Ophiolite in South of Gerze Area, Center Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1521—1530 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Liu, Y. M., Li, Q. S., et al., 2002. Stratigraphic Division and Geological Significance of the Jurassic Cover Sediments in the Eastern Sector of the Bangong Lake-Dēngqēn Ophiolite Belt in Tibet. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 405—410 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. B., Bao, P. S., Deng, W. M., et al., 1987. Tibet Ophiolite. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, X. B., Bao, P. S., Zheng, H. X., 1984. Lake Region Ophiolite and Geochemistry Study. In: Himalaya Geological Collection Editorial Committee II, ed., The Himalaya Geological Investigation Results of China and French, 1981. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wei, Z. Q., 2007. Petrology, Geochemistry and Exsolutions in Eclogite and Its Tectonic Implications of Western Peng Lake Ophiolite, Tibet (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. Q., Xia, B., Xu, L. F., et al., 2009. Geochemistry and Tectonic Setting of Western Pung Co Lake Ophiolite, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 55(6): 785—794 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London.
- Xia, B., Wang, G. Q., Zhong, F. T., et al., 1993. Himalaya and Adjacent Areas Ophiolite Terrane Diggram and Instructions. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou (in Chinese).
- Xia, B., Xu, L. F., Wei, Z. Q., et al., 2008. SHRIMP Zircon Dating of Gabbro from the Donqiao Ophiolite in Tibet and Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 528—531 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Zhong, F. T., 1991. Geochemical Characteristics and Genetic Significance of Ophiolite from Dong Tso, Tibet. *Geology of Tibet*, (2): 73—87 (in Chinese).
- Xu, L. F., 2009. The Lake Area Ophiolite and Tectonic Evolution of Bangonghu-Nujiang Suture Zone (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. Y., Wang, F. G., Li, J. L., et al., 1984. Preliminary Study on the Petrochemistry and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks from Northern Xizang. *Chinese Journal of Geology*, (1): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Ye, P. S., Wu, Z. H., Hu, D. G., et al., 2004. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Ophiolite of Dongqiao, Tibet. *Geoscience*, 18(3): 309—315 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211—280. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.211
- You, Z. P., 1997.⁴⁰Ar—³⁹Ar Chronology of Dingqing Ophiolite, Tibet. *Geology of Tibet*, (2): 24—30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. Z., Chen, Y. L., 2007. Plagiogranite in the Guchang Ophiolites in Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(1): 32—37 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, S., Shi, H. F., Hao, H. J., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Cretaceous Adakites in Bangong Lake, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(5): 509—524. doi:10.3799/dqkx.2014.049 (in Chinese with English abstract)
- Zhang, Q., 1992. Some Problems on Ophiolite Study in China. *Chinese Journal of Geology*, 4 (Suppl.): 139—146 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Yang, R. Y., 1985. Boninite of Dingqing Ophiolite and Its Geological Significance, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 30(16): 1243—1245 (in Chinese).
- Zhang, Q., Yang, R. Y., 1987. The Geochemical Characteristics of Intrusion of Boninitic Series from Dingqing, Xizang. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 64—74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Zhang, K. J., Li, B., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology and Genesis of Plagiogranites of Ophiolite from Laguo Tso, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 100—106 (in Chinese).
- Zhao, W. J., Liu, K., Jiang, Z. T., et al., 2004. Bangong Co-Nujiang Suture Zone, Tibet—A Suggestion Governed by Deep Geophysical Structure. *Geological Bulletin of China*, 23(7): 623—635 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍佩声, 王军, 2000. 青藏高原缝合带的岩石学、地球化学及其构造意义. 见: 肖序常, 李廷栋编, 青藏高原的构造演化与隆升机制. 广州: 广东科技出版社, 139—189.
- 鲍佩声, 肖序常, 苏犁, 等, 2007. 西藏洞错蛇绿岩的构造环境. 岩石学、地球化学和年代学制约. *中国科学(D辑)*, 37(3): 298—307.
- 鲍佩声, 肖序常, 王军, 1996. 西藏洞错蛇绿岩的地球化学及其成因. 见: 张旗编, 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 190—194.
- 陈玉禄, 张宽忠, 杨志民, 等, 2006. 青藏高原班公湖—怒江缝合带中段那曲县觉翁地区发现完整的蛇绿岩剖面. *地质通报*, 25(6): 694—699.
- 樊树权, 史仁灯, 丁林, 等, 2010. 西藏改则蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 29(5): 467—478.
- 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 等, 1991. 西藏阿里地质. 北京: 中国地质大学出版社.
- 和钟铎, 杨德明, 王天武, 2006. 西藏嘉黎断裂带凯蒙蛇绿岩的年代学、地球化学特征及大地构造意义. *岩石学报*, 22(2): 653—660.
- 黄启帅, 史仁灯, 丁炳华, 等, 2012a. 班公湖 MOR 型蛇绿岩 Re-Os 同位素特征对班公湖—怒江特提斯洋裂解时间的制约. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 465—478.
- 黄启帅, 史仁灯, 刘德亮, 等, 2012b. 西藏那曲蛇绿岩地幔源区的碳质球粒陨石型 Os 同位素特征及其意义. *科学通报*, 57(33): 3154—3161.
- 简平, 刘敦一, 张旗, 等, 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. *地学前缘*, 10(4): 439—456.
- 赖绍聪, 刘池阳, 2003. 青藏高原安多岛弧型蛇绿岩地球化学及成因. *岩石学报*, 19(4): 675—682.
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 等, 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289—294.
- 林文第, 陈德泉, 1990. 西藏改则—色哇地区的蛇绿岩特征. *成都地质学院院报*, 17(2): 17—25.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华, 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552—558.
- 罗亮, 安显银, 吴年文, 等, 2014. 班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连新元古代—中生代沉积盆地演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(8): 1169—1184.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等, 2004. 班公湖—怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. *地学前缘*, 11(4): 371—382.
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等, 2004. 西藏班公湖—怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定—兼论班公湖—怒江蛇绿岩带形成时代. *中国地质*, 31(3): 262—268.
- 史仁灯, 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考. *地质论评*, 51(6): 681—693.
- 史仁灯, 2007. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班—怒洋时限的制约. *科学通报*, 52(2): 223—227.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26—30.
- 孙立新, 白志达, 徐德斌, 等, 2011. 西藏安多蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb SHRIMP 年龄. *地质调查与研究*, 34(1): 10—15.
- 汤耀庆, 王方国, 1984. 藏北湖区蛇绿岩形成环境浅析. 见: 喜马拉雅地质文集编辑委员会喜马拉雅地质文集编辑委员会编, 喜马拉雅地质 II. 北京: 地质出版社.
- 王保弟, 许继峰, 曾庆高, 等, 2007. 西藏改则地区拉果错蛇绿岩地球化学特征及成因. *岩石学报*, 23(6): 1521—1530.
- 王建平, 刘彦明, 李秋生, 等, 2002. 西藏班公湖—丁青蛇绿岩带东段侏罗纪盖层沉积的地层划分. *地质通报*, 21(7): 405—410.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等, 1987. 西藏蛇绿岩(喜马拉雅岩石圈构造演化). 北京: 地质出版社.
- 王希斌, 鲍佩声, 郑海翔, 1984. 构造解体的藏北湖区蛇绿岩及其地球化学研究. 见: 喜马拉雅地质文集编辑委员会编, 喜马拉雅地质 II (中法合作喜马拉雅地质考察

- 1981年成果之一).北京:地质出版社.
- 韦振权,2007.西藏蓬湖西蛇绿岩岩石学、地球化学和榴辉岩中的出溶物及其构造意义(博士学位论文).广州:中国科学院.
- 韦振权,夏斌,徐力峰,等,2009.西藏蓬湖西蛇绿岩地球化学及构造背景研究.地质论评,55(6):785-794.
- 西藏地质矿产局,1993.西藏自治区区域地质志.北京:地质出版社.
- 夏斌,王国庆,钟富泰,等,1993.喜马拉雅及邻区蛇绿岩和地体构造图说明书.兰州:甘肃科学技术出版社.
- 夏斌,徐力峰,韦振权,等,2008.西藏东巧蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义.地质学报,82(4):528-531.
- 夏斌,钟富泰,1991.西藏北部洞错蛇绿岩地体的岩石地球化学特征及成因意义.西藏地质,(2):73-87.
- 徐力峰,2009.班公湖—怒江缝合带中段湖区蛇绿岩及其构造演化(博士学位论文).广州:中国科学院广州地球化学研究所.
- 杨瑞英,王方国,李继亮,等,1984.藏北中生代火山岩的岩石化学与地球化学初步研究.地质科学,(1):72-79.
- 叶培盛,吴珍汉,胡道功,等,2004.西藏东巧蛇绿岩的地球化学特征及其形成的构造环境.现代地质,18(3):309-315.
- 游再平,1997.西藏丁青蛇绿混杂岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学.西藏地质,(2):24-30.
- 张宽忠,陈玉禄,2007.古昌蛇绿岩中的斜长花岗岩特征.沉积与特提斯地质,27(1):32-37.
- 张旗,1992.中国蛇绿岩研究中的几个问题.地质科学,4(增刊):139-146.
- 张旗,杨瑞英,1985.西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类的深成岩及其地质意义.科学通报,30(16):1243-1245.
- 张旗,杨瑞英,1987.西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类侵入岩的地球化学特征.岩石学报,(2):64-74.
- 张硕,史洪峰,郝海健,等,2014.青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩年代学、地球化学及构造意义.地球科学——中国地质大学学报,39(5):509-524.
- 张玉修,张开均,黎兵,等,2007.西藏改则南拉果错蛇绿岩中斜长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其成因研究.科学通报,52(1):100-106.
- 赵文津,刘葵,蒋忠惕,等,2004.西藏班公湖—怒江缝合带—深部地球物理结构给出的启示.地质通报,23(7):623-635.