

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.546>



藏东江达中石炭世弧火山岩的厘定及其构造意义

闫国川^{1,2}, 王保弟^{2*}, 刘 函², 李小波², 周 放^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

摘要:金沙江特提斯洋盆是三江地区重要的洋盆之一,然而目前对于金沙江洋壳俯冲时限认识不一,弧火山岩对限定洋壳的俯冲消减过程具有重要意义。在西藏东部江达地区首次识别出一套中石炭世晚期的火山岩,主要岩性为玄武岩及安山岩,安山岩锆石 U-Pb 年龄为 332 ± 3.3 Ma (MSWD=2, $n=14$),指示该火山活动为中石炭世晚期。江达火山岩 SiO_2 含量为 45.65%~55.73%,具有高 Al_2O_3 含量(15.48%~16.79%), TiO_2 含量为 0.82%~1.12%,富 Na 低 K;轻重稀土分异明显,无 δEu 异常,强不相容元素 Th、U 等富集,高场强元素 Nb、Ta 等亏损,具有弧火山岩的地球化学性质。安山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为较均一的正值(+11.0~+15.6),指示岩浆源区为受到富集组分影响的岩石圈地幔。研究表明江达中石炭世晚期火山岩形成于岛弧的构造环境,其火山活动与金沙江特提斯洋壳俯冲消减过程有关;结合区域地质资料认为金沙江特提斯洋壳在 332 Ma 之前已经开始了俯冲消减活动,进而为金沙江特提斯洋演化过程提供了岩石学证据。

关键词:江达—德钦—维西火山弧;金沙江特提斯洋;岛弧玄武岩;中石炭世;江达;地球化学;地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2715-12

收稿日期: 2018-04-03

Delineation of Middle Carboniferous Arc Volcanic Rocks in Jomda Area, Eastern Tibet and Its Tectonic Implications

Yan Guochuan^{1,2}, Wang Baodi^{2*}, Liu Han², Li Xiaobo², Zhou Fang^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: The Jinshajiang Tethys is one of the most important ocean basins in the Sanjiang region. However, it is not clear when the oceanic subduction started. The research of arc volcanic rock is significant to constrain the subduction process of the oceanic plate. This paper reports the Late Middle Carboniferous volcanic rocks in Jomda area, eastern Tibet, which are dominated by basalts and andesites. Zircon U-Pb age results show they were formed at 332 ± 3.3 Ma. The arc volcanic rocks have SiO_2 contents of 45.65%–55.73%, Al_2O_3 contents of 15.48%–16.79%, TiO_2 contents of 0.82%–1.12%, and have high Na/K ratios. They show obvious differentiation between LREE and HREE, and without Eu anomaly. They are enriched in strong incompatible trace elements, such as Th and U, and depleted in high field strength element, such as Nb and Ta. The zircons from basalts have positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (+11.0 to +15.6), which indicates that the magma source might be the enriched lithosphere mantle. It is believed that Late Middle Carboniferous volcanic rocks were formed at the island arc tectonic environment, which is related to subduction of Jinshajiang Tethys ocean. Combining with the regional geological data, we propose that the subduction of the Jinshajiang Tethys ocean have started before 332 Ma. This study provides a lithology evidence for the evolution of Jinshajiang Tethys ocean.

基金项目:中国地质调查局项目(No. DD20160016);国家重点研发计划项目(No. 2015CB452601);国家自然科学基金项目(Nos. 41773026, 41603038)。

作者简介:闫国川(1988—),男,硕士研究生,主要从事地球化学研究。ORCID: 0000-0002-1466-8664. E-mail: dizhixiaochuan@163.com

*** 通讯作者:**王保弟, ORCID: 0000-0002-6266-1483. E-mail: baodiwang@163.com; wbaodi@cgs.cn

引用格式:闫国川,王保弟,刘函,等,2018.藏东江达中石炭世弧火山岩的厘定及其构造意义.地球科学,43(8):2715–2726.

Key words: Jomda-Deqin-Weixi volcanic arc; Jinshajiang Tethys ocean; island arc basalt; Middle Carboniferous; Jomda area; geochemistry; geochronology.

滇川西部“三江”地区古特提斯演化记录表明,晚古生代由一系列相对稳定的地块与岛弧及其之间多个规模不等的洋盆所组成,构成了宽阔的多岛弧—盆系统(潘桂棠等,2003)或表观上的多岛洋格局.金沙江古特提斯洋是昌都—思茅地块与中咱—中甸地块之间的一个洋盆,是晚古生代三江多岛弧—盆系中的重要组成部分,经历了较为完整的威尔逊旋回(张旗等,1996;王立全等,1999;孙晓猛和简平,2004;Jian *et al.*, 2009a, 2009b).恢复其形成演化及俯冲消减历史对理解古特提斯多岛弧—盆系的时空格局具有重要意义.

前人对金沙江古特提斯洋演化的主要过程已取得了一些认识,普遍认为金沙江洋盆经历了裂(陷)谷盆地(D)、洋盆扩张(C_1-P_1)、洋壳俯冲消减(P_1-P_2)和弧陆碰撞造山(T_1-T_2)4个主要演化阶段(王立全等,1999;潘桂棠等,2003;孙晓猛和简平,2004;范蔚茗等,2009;Jian *et al.*, 2009b;Zhao *et al.*, 2016).黄汲清等(1984)认为金沙江古特提斯洋盆主要形成于晚石炭世;随后研究者在金沙江洋蛇绿岩带及相关地层中发现了早石炭世至晚二叠世的放射虫化石(吴昊若,1993;孙晓猛等,1995;简平等,1999),并对金沙江蛇绿岩带进行了同位素年代学研究,提出了金沙江古特提斯洋盆的海底扩张始于早

石炭世、可能延至晚石炭世的认识.对于金沙江洋壳俯冲时限认识不一,有研究者认为金沙江洋壳于早二叠世开始俯冲(侯增谦等,1996;潘桂棠等,2002);莫宣学(1998)认为金沙江洋壳在晚二叠世才开始向西俯冲消减;王立全等(1999)认为金沙江弧后洋盆在晚石炭世—早二叠世扩张为洋盆的基础上,于早二叠世晚期发生了向西的大幅度俯冲消减,开始大洋岩石圈向大陆岩石圈构造体制的转换;简平等(2003)在金沙江娘九丁和雪堆蛇绿岩中获得斜长花岗岩锆石年龄分别为 285 Ma、300 Ma,由此认为金沙江洋盆俯冲消减至少在 300 Ma 之前已经开始.宋俊龙等(2018)在小定西组中获得流纹岩锆石年龄分别为 230 Ma、285 Ma,认为金沙江洋盆俯冲消减至少在 230~285 Ma 之前已经发生.金沙江洋盆地层系统由于遭受后期强烈的构造剪切、变形及变质作用,使得完整的岩石层序难以保存,导致在重塑金沙江古特提斯洋形成与演化历史的研究中仍存在一些重要的科学问题未完全解决.例如,金沙江洋壳何时开始俯冲及其相应的火山弧记录在哪里? 这些问题制约了人们对于金沙江洋盆构造演化过程的理解.

笔者在地质调查过程中首次在江达地区车所附近前人划分的洞卡组厘定出一套中石炭世晚期的火山岩(图 1b).本文报道该套火山岩的野外地质特

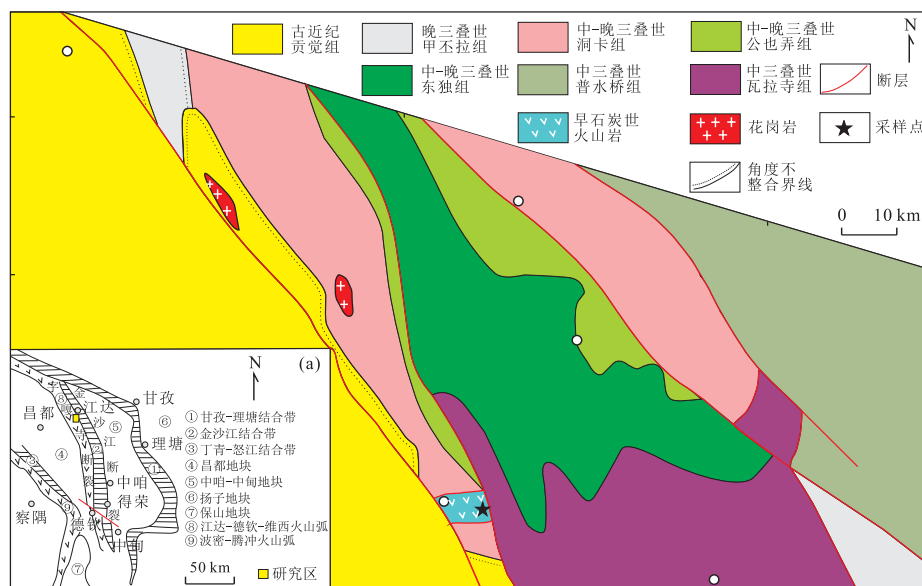


图 1 金沙江洋盆的构造格架(a)和江达县车所地区地质简图(b)

Fig.1 The geotectonic outline of Jinshajiang oceanic basin (a) and simplified geological map of Chesuo area in Jomda County (b)

据西藏自治区地质调查院,2007.1:250 000 江达幅区域地质调查报告

征及锆石 U-Pb 年龄,探讨其岩石成因及形成的构造环境,阐述其对于金沙江古特提斯洋壳俯冲消减时限的制约。

1 地质概况

“三江”构造带的北段属东特提斯构造域的东段,构造格局极其复杂。西以字嘎寺—车所—德钦断裂为界,东界为金沙江断裂带,北至青海玉树,被 NWW 向马尼、干戈—邓柯断裂所断,南至奔子栏断裂(董树义等,2010)。潘桂棠等(2002)认为研究区在古特提斯演化阶段,藏东及甘孜—理塘地区为古特提斯洋北缘晚古生代—中生代的多岛弧盆体系;古生代以来经历了晚古生代到中三叠世多岛弧盆系的形成和弧—盆系向造山带的转换、晚三叠世到白垩纪的盆—山转换、新生代的大规模陆内构造汇聚(壳—幔转换)3次重大的构造体制转换。金沙江结合带位于邓柯以南、剑川以北,即在金沙江主断裂(盖玉—德荣断裂)以西、金沙江河谷与羊拉—鲁甸断裂以东的狭长区域展布。东邻中咱—香格里拉地块,西邻江达—德钦—维西陆缘火山弧,向北在邓柯一带与甘孜—理塘带相接,向南延伸与哀牢山结合带相接。江达—德钦—维西陆缘火山弧带东以金沙江结合带的西界断裂为界,西以车所—热涌—字嘎寺—德钦—维西—乔后逆冲断裂为界,向南延伸与哀牢山结合带西侧的墨江—绿春陆缘火山弧相接(图 1a);空间上,火山弧主体分布于昌都芒康县宗

拉山口东侧、德钦县南仁—捕村—南佐至维西县巴迪—叶枝一带;火山弧内岩浆岩极为发育,类型多样,且具有复杂的空间配置,弧—盆的空间配置和火成岩成分的穿弧极性表明该火山弧是由于金沙江(—哀牢山)洋盆向昌都—思茅地块之下俯冲形成(潘桂棠等,2002)。

研究区位于江达—德钦—维西陆缘弧江达一带,主要分布在车所村附近。主要出露三叠纪的普水桥组、瓦拉寺组、东独组、公也弄组、洞卡组、甲丕拉组。其中普水桥组(T_1p)主要为一套碎屑岩沉积建造;瓦拉寺组(T_2w)为一套碳酸盐岩、碎屑岩沉积建造;东独组(T_3dd)为砂泥质岩沉积建造;公也弄组(T_3g)为一套碳酸盐岩、碎屑岩沉积建造;洞卡组(T_3dk)为一套基性—酸性火山岩建造;甲丕拉组(T_3j)为一套砂泥质岩沉积建造(图 1b)。

本文研究的江达火山岩位于西藏江达县车所地区前人划分的洞卡组里。据详细的野外调查,火山岩的主要岩石类型为玄武岩、玄武安山岩与安山岩,野外观察其相互之间为整合接触关系(图 2a, 2b)。玄武岩镜下呈斑状结构,斑晶成分主要为长石,次为角闪石等,长石多为长柱状,长宽比值为 2~4;基质主要由细小的长石和角闪石组成,有少量火山玻璃以及磁铁矿、磷灰石等(图 2e)。玄武岩枕状构造发育,呈椭球状,大小介于 0.1~0.8 m,岩枕边部常见 1~2 cm 的冷凝边,发育细小的气孔和杏仁构造(图 2c)。安山岩表面为红褐色,表面风化较强(图 2d),具斑状结构,块状构造,斑晶主要为斜长石,斜长石斑

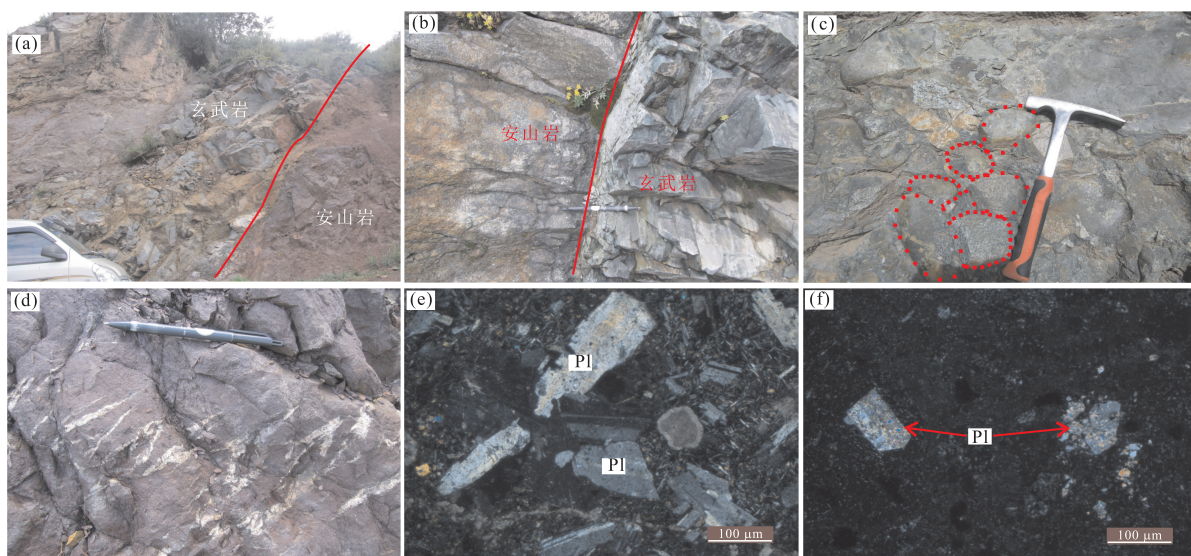


图 2 江达火山岩的野外特征及显微照片(正交偏光)(a~f)

Fig.2 Field characteristics and photomicrograph of the volcanic rock in in Jomda County (a—f)

PL.斜长石

晶呈自形一半自形板状或条状, 粒径为 0.1~1.0 mm, 占 10%~15%; 基质为隐晶质结构(图 2f)。

2 实验方法

本次研究选取江达火山岩中安山岩样品(15JD-04)锆石作为 U-Pb 同位素测定对象。锆石的挑选与分选由河北省廊坊区域地质调查研究所地质实验室完成。锆石在双目镜下被双面胶粘在玻璃基板上, 使用环氧树脂凝固成靶, 然后去掉玻璃基板, 在细砂纸上粗磨使锆石晶体揭露出来, 之后抛光制成样品靶, 通过阴极发光图像以揭示锆石内部结构, 锆石阴极发光照相由北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 完成, LA-ICP-MS 等离子质谱仪为 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为配备有 193 nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005, 每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号, 测定斑束直径为 32 μm , 详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu *et al.* (2008)。

样品主量元素分析在成都地质矿产研究所采用 XRF(Rigaku RIX 2100 型)玻璃熔饼法完成, 分析精度优于 4%。微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所采用酸溶法利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成, 分析精度和准确度一般优于 5%。详细的测定方法和分析流程可参考 Chen *et al.* (2010)。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学(武汉)国家重点实验室利用 LA-MC-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统为配备有 193 nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005。在已测定过年龄的锆石颗粒上选择相同区域进行 Hf 同位素测试, 激光束斑直径

为 44 μm , 剥蚀频率为 10 Hz, 具体分析方法及仪器参数详见 Yuan *et al.* (2008)。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026\ 69$ (Bievre and Taylor, 1993) 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.588\ 6$ (Chu *et al.*, 2002) 进行同质异位干扰校正, 计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。样品测定过程中以标准锆石 91500 作为标样, 并同时测定标准锆石 GJ-1 和 TEM, 实验中 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 318 \pm 23 (2\sigma, n = 22)$, 与推荐值 $0.282\ 307 \pm 31$ (Wu *et al.*, 2006) 在误差范围内一致。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算采用 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 球粒陨石现今值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\ 2$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997); 单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 计算采用现今亏损地幔值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\ 25$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038\ 4$ (Griffin *et al.*, 2000)。

3 测定结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素

用于定年的样品为江达火山岩中的安山岩(15JD-04), 挑选出的锆石颜色为浅灰色, 自形程度较好, 短柱—长柱状, 长为 50~130 μm , 长宽比值为 2~3; 图 3 显示所有锆石具有典型的岩浆锆石韵律环带特征。20 颗锆石的 U-Pb 同位素年龄结果见表 1。锆石的 U 和 Th 含量分别为 $704 \times 10^{-6} \sim 4\ 484 \times 10^{-6}$ 和 $748 \times 10^{-6} \sim 4\ 753 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.87~1.78, 表现出岩浆锆石的特点。

图 4a 显示 01、11、12、18、19、20 六个点谐和度差(谐和度 < 80%), 笔者使用剩余 14 个点投图, 年龄加权平均值为 $332 \pm 3.3 \text{ Ma}$ (MSWD = 2, $n = 14$; 图 4b), 代表了江达火山岩的形成年龄。

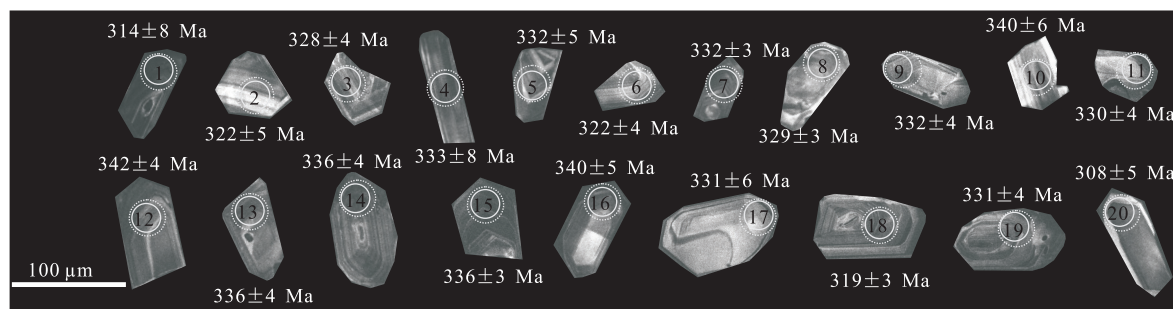


图 3 江达安山岩样品(15JD-04)锆石 CL 图像

Fig.3 Cathodoluminescence image from sample (15JD-04) of the andesite in the Jomda area

实线为锆石年龄打点处, 虚线为锆石 Lu-Hf 同位素打点处

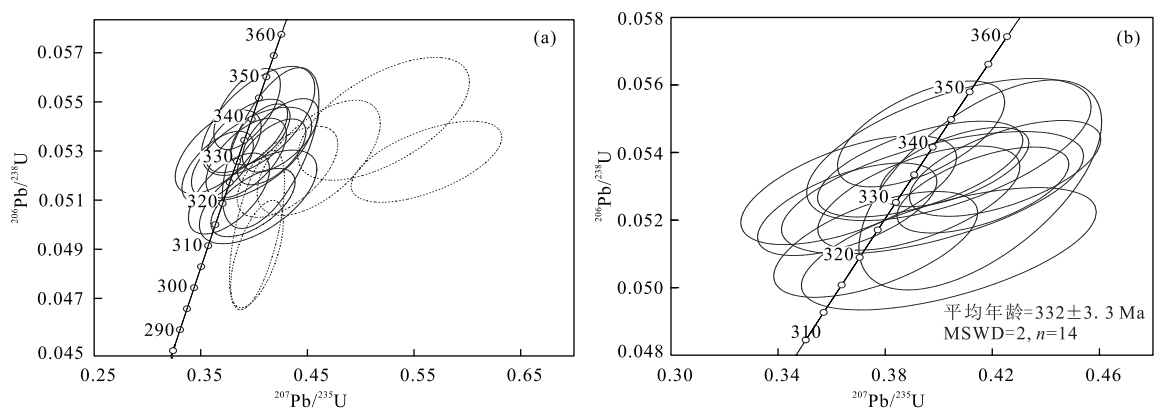


图 4 江达安山岩样品(15JD-04)锆石 U-Pb 谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagram of representative zircon grains of the andesite in the Jomda area

表 1 江达安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analytical results of the andesite in the Jomda area

测点	含量(10 ⁻⁶)			Th/U	同位素比值(已扣除普通铅)						年龄(Ma)				谐和度(%)
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
1	778	4 464	4 484	1.00	0.055	0.002	0.403	0.011	0.053	0.001	344	8	314	8	74
2	261	1 291	1 477	0.87	0.057	0.003	0.404	0.022	0.051	0.001	344	16	322	5	91
3	310	1 555	1 737	0.89	0.060	0.003	0.431	0.019	0.052	0.001	364	14	328	4	87
4	320	2 352	1 748	1.35	0.057	0.002	0.416	0.019	0.053	0.001	353	13	333	8	93
5	270	2 280	1 369	1.67	0.055	0.003	0.398	0.023	0.053	0.001	340	17	332	5	97
6	343	1 766	1 975	0.89	0.053	0.002	0.376	0.016	0.051	0.001	324	11	322	4	98
7	478	3 201	2 621	1.22	0.057	0.002	0.417	0.013	0.053	0.001	354	9	332	3	91
8	378	3 046	2 069	1.47	0.050	0.002	0.366	0.014	0.052	0.001	317	10	329	3	99
9	254	2 352	1 322	1.78	0.050	0.002	0.366	0.016	0.053	0.001	317	12	332	4	95
10	128	748	704	1.06	0.069	0.004	0.521	0.033	0.054	0.001	426	22	340	6	77
11	402	2 814	2 093	1.34	0.077	0.004	0.562	0.029	0.053	0.001	453	19	330	4	68
12	446	2 248	2 511	0.90	0.052	0.002	0.393	0.013	0.055	0.001	337	9	342	4	99
13	419	2 361	2 297	1.03	0.057	0.002	0.425	0.015	0.054	0.001	359	10	336	4	93
14	406	2 691	2 230	1.21	0.053	0.002	0.393	0.016	0.054	0.001	337	11	336	4	99
15	687	4 166	3 790	1.10	0.055	0.002	0.406	0.011	0.054	0.000	346	8	336	3	97
16	222	1 328	1 033	1.29	0.054	0.003	0.404	0.022	0.054	0.001	344	16	340	5	99
17	194	1568	899	1.74	0.064	0.003	0.461	0.024	0.053	0.001	385	16	331	6	71
18	299	1 680	1 765	0.95	0.059	0.002	0.414	0.016	0.051	0.001	352	12	319	3	74
19	301	2 259	1 704	1.33	0.054	0.002	0.393	0.015	0.053	0.001	336	11	331	4	95
20	551	4 753	2 953	1.61	0.057	0.002	0.403	0.011	0.051	0.001	344	7	308	5	79

表 2 江达安山岩样品(15JD-04)锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions from sample 15JD-04 of the andesite in the Jomda area

测点号	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	1σ	t _{DM1}
15JD-04-02	322	0.003 501	0.283 039	0.000 059	9.43	15.6	2.18	353
15JD-04-03	328	0.005 328	0.282 931	0.000 113	5.63	11.8	4.05	514
15JD-04-04	333	0.004 072	0.282 919	0.000 021	5.21	11.6	0.93	514
15JD-04-05	332	0.002 916	0.282 922	0.000 024	5.32	12.4	1.00	492
15JD-04-06	322	0.003 372	0.282 969	0.000 023	6.98	13.5	0.99	427
15JD-04-07	332	0.002 826	0.282 900	0.000 023	4.51	11.3	0.99	525
15JD-04-08	329	0.002 593	0.282 991	0.000 031	7.74	14.4	1.23	386
15JD-04-09	332	0.005 759	0.282 912	0.000 037	4.94	11.0	1.45	552
15JD-04-12	342	0.003 020	0.282 993	0.000 026	7.81	14.6	1.08	388
15JD-04-13	336	0.003 291	0.282 941	0.000 033	5.99	12.6	1.30	469
15JD-04-14	336	0.004 348	0.282 957	0.000 051	6.54	13.0	1.93	459
15JD-04-15	336	0.002 373	0.282 967	0.000 023	6.89	13.8	0.99	419
15JD-04-16	340	0.002 327	0.282 929	0.000 028	5.57	12.5	1.12	474
15JD-04-19	331	0.001 814	0.282 953	0.000 028	6.40	14.1	1.14	433

在 U-Pb 定年基础上,本文利用 LA-MC-ICP-MS 对其中 14 颗锆石进行了 14 个点原位 Lu-Hf 同位素分析(图 3).如表 2 所示,14 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 900\sim 0.283\ 039$,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+11.0\sim +15.6$;计算得到锆石单阶段亏损地幔模式年龄 t_{DMI} 为 $353\sim 552\ \text{Ma}$.

3.2 元素地球化学特征

江达火山岩 4 件样品的主量、微量元素分析结果见表 3.江达火山岩的 SiO_2 含量为 $45.65\%\sim 55.73\%$,具有高含量的 Al_2O_3 ($15.48\%\sim 16.79\%$), TiO_2 含量为 $0.82\%\sim 1.12\%$ (平均为 0.93%),富 Na 低 K, Na_2O 含量为 $3.14\%\sim 4.52\%$, K_2O 含量为 $0.06\%\sim 3.10\%$.岩石蚀变较强,烧失量为 $4.33\%\sim 7.56\%$,因此笔者采用高场强元素或不活泼元素进行投图,而未采用活动性元素.图 5 中江达火山岩样品均落入玄武岩区,与镜下鉴定的结果基本一致.

江达火山岩富集稀土元素,其 ΣREE 为 $52.6\times 10^{-6}\sim 104\times 10^{-6}$.江达火山岩富集轻稀土元素,La 平均含量为 13×10^{-6} .在稀土元素球粒陨石标准化配分图中(图 6b),所有样品具有近似的变化趋势,表现为轻稀土(LREE)富集的右倾型,且轻、重稀土元素显示出较强的分馏特征($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.8\sim 5.8$);无 Eu 异常.在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 6a),江达火山岩表现出 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)亏损的特征.

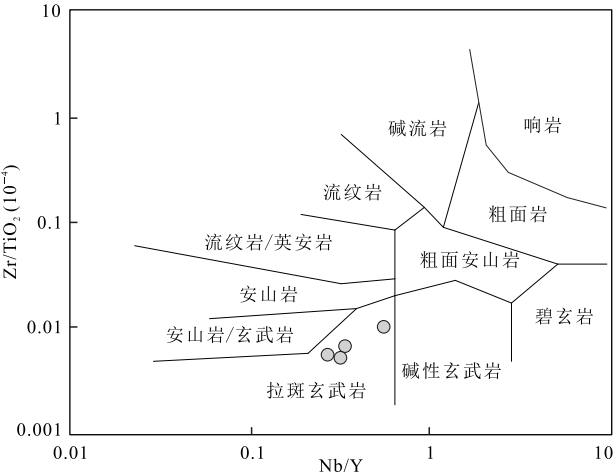


图 5 江达火山岩 $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ 分类图解

Fig.5 $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ classification diagram for the volcanic rock in the Jomda area

底图据 Winchester and Floyd(1977)

表 3 江达火山岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 3 Major elements (%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) results of the volcanic rock in the Jomda area

样品号	15JD-01	15JD-02	15JD-03	15JD-04
SiO_2	47.91	46.15	45.65	55.73
TiO_2	0.97	0.83	0.82	1.12
Al_2O_3	15.51	16.79	16.47	15.48
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{ T}$	10.63	10.21	9.50	9.84
MnO	0.13	0.10	0.15	0.09
MgO	8.20	9.66	5.50	4.98
CaO	8.04	3.86	10.93	2.00
Na_2O	4.00	4.52	4.30	3.14
K_2O	0.06	0.28	0.07	3.10
P_2O_5	0.21	0.17	0.16	0.30
烧失量	4.33	7.56	6.36	4.59
总量	99.99	100.13	99.91	100.37
Sc	31.7	32.3	32.7	26.4
Ti	5791	4982	5028	6815
V	198	219	192	158
Cr	401	392	227	28.0
Mn	994	771	1214	702
Co	39.6	40.2	38.4	21.6
Ni	115	130	73.1	4.38
Cu	51.0	5.04	73.8	22.2
Zn	123	167	97.0	106
Ga	16.8	15.4	16.5	18.3
Ge	2.58	3.37	2.22	2.47
Rb	1.84	5.98	1.66	126
Sr	60.7	113	124	88.4
Y	16.5	13.7	14.0	22.0
Zr	66.3	45.5	47.5	117
Nb	5.55	4.34	3.75	12.2
Cs	0.17	1.82	0.76	4.51
Ba	53.7	120	35.1	228
La	12.0	10.4	9.10	20.0
Ce	24.2	21.9	19.0	39.9
Pr	2.98	2.72	2.38	4.84
Nd	12.2	11.1	10.0	19.2
Sm	2.72	2.53	2.37	4.09
Eu	0.86	0.87	0.84	1.21
Gd	2.80	2.57	2.43	4.07
Tb	0.46	0.41	0.4	0.64
Dy	2.81	2.37	2.37	3.79
Ho	0.59	0.50	0.50	0.80
Er	1.69	1.39	1.43	2.22
Tm	0.25	0.20	0.21	0.33
Yb	1.59	1.29	1.35	2.11
Lu	0.26	0.21	0.22	0.34
Hf	1.81	1.37	1.40	3.08
Ta	0.39	0.31	0.25	0.79
Pb	2.64	1.32	5.29	11.7
Th	3.64	3.22	2.57	8.31
U	1.00	0.92	0.92	2.05
ΣREE	65.4	58.5	52.6	104

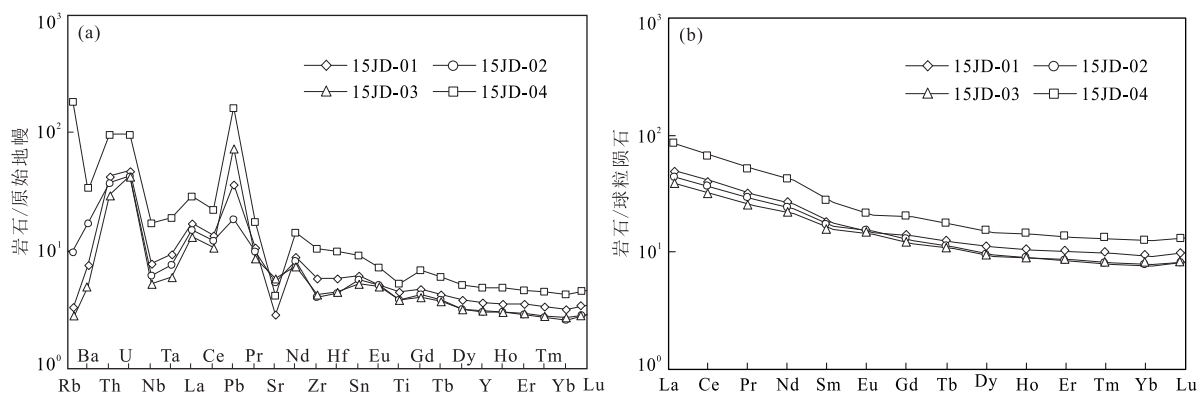


图6 江达火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化分配曲线(b)

Fig.6 The PM-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) of the volcanic rock in the Jomda area

据 Sun and McDonough(1989)

4 讨论

4.1 江达火山岩岩浆源区性质

江达火山岩显著富集 Th、U 等强不相容元素和明显亏损 Nb、Ta 等高场强元素,中等富集轻稀土元素(图6),具有该特征的火山岩岩浆源区可能为岩石圈地幔(Saunders *et al.*, 1991).江达火山岩蚀变较强,不能直接反映其源区的地球化学性质,锆石具有很高的 Hf 同位素封闭温度,可保持其原始 Hf 同位素组成,因此锆石 Hf 同位素可真实反映其源区的地球化学性质(吴福元等, 2007).江达火山岩锆石原位 Hf 同位素具有均一、正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+11.0~+15.6),均一的 Hf 同位素组成表明锆石结晶于均一、无混染的岩浆源区,正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值反映了锆石母岩浆的幔源属性。

研究表明, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值岩石或是直接来自亏损地幔,或是源自亏损地幔形成的基性下地壳物质再熔融(吴福元等, 2007).但是,江达火山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值没有达到其形成时(332 Ma)的亏损地幔 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图7).相对锆石形成时的亏损地幔而言,演化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明锆石母岩浆来源于受富集组分影响的地幔,并非类似于亏损地幔源区的 N-MORB.锆石 Hf 模式年龄反映寄主岩石从亏损地幔分离的时间,若锆石母岩浆直接来源于未受任何混染的亏损地幔,那锆石年龄应该近似等于 Hf 模式年龄.但是江达安山岩锆石单阶段亏损地幔模式年龄 t_{DM1} 为 353~552 Ma,平均值为 457 Ma,明显大于其结晶年龄(332 Ma),表明岩浆源区受富集组分影响(表3).江达玄武岩的 Nb、Ta、Ti 等高场强元素

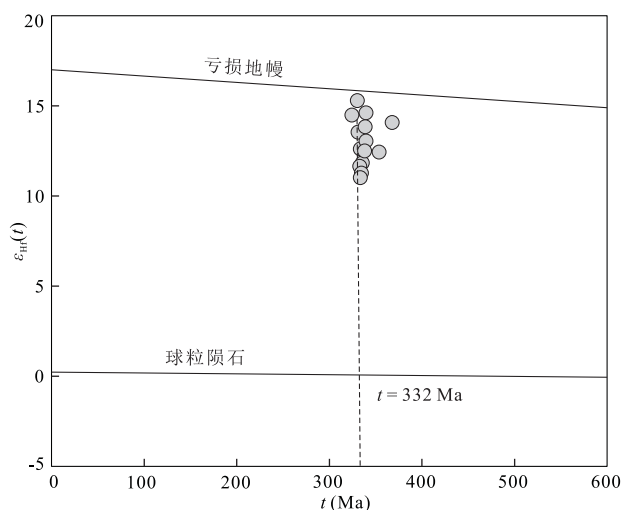


图7 江达安山岩(15JD-04)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解

Fig.7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram of zircons from sample 15JD-04 of the andesite in the Jomda area

亏损可能是由俯冲洋壳板片脱水交代或地壳混染地幔作用所致(Thirlwall *et al.*, 1994).而玄武岩 Nb/La 均值为 0.48, 小于大陆地壳 Nb/La 均值(0.5~0.8; Rudnick and Fountain, 1995),因此江达玄武岩的 Nb、Ta、Ti 等高场强元素亏损并非由地壳混染作用形成.江达玄武岩的 Nb/U 均值为 5.0, 在俯冲带流体(Nb/U $\approx$ 0.22; Ayers, 1998)与全球俯冲沉积物(Nb/U $\approx$ 5.0; Plank and Langmuir, 1998)之间,亦指示俯冲作用的存在.江达火山岩锆石 Hf 同位素特征、模式年龄及岩石地球化学特征综合表明,江达玄武岩来源于受俯冲带流体交代影响的岩石圈地幔源区。

4.2 江达火山岩形成的构造环境

江达火山岩主要为一套玄武岩、玄武安山岩、安山岩以及玄武质火山角砾岩,以玄武岩为主,该岩石组合通常被认为形成于岛弧的构造环境。如表 3 所示,江达火山岩同时具有高 Al_2O_3 含量(15.51%~16.79%),低 TiO_2 含量(0.82%~1.12%);所有样品均表现为明显亏损 Nb、Ta 等元素(图 6a),轻稀土元素(LREE)富集和重稀土元素(HREE)相对亏损的特征(图 6b),是典型岛弧火山岩的标志(White and Patchett, 1984; Ryerson and Watson, 1987)。江达火山岩的 $\text{Yb} < 5 \times 10^{-6}$, $\text{Ta} < 1 \times 10^{-6}$, Ta/Yb 值 < 0.5 ,表明其源区岩浆为与俯冲带有关的岛弧岩浆(Condie *et al.*, 1986)。在图 8 中江达火山岩样品全部落入岛弧玄武岩区域。样品 La/Nb 值为 1.63~2.42,与岛弧玄武岩的 La/Nb 值一致($\text{La}/\text{Nb} > 1.4$)。在 La/Nb -Ta 判别图(图 9)中,所有样品均落入岛弧玄武岩区,与图 8 投点结果一致。综上所述,本文认为江达火山岩形成于岛弧构造环境。

4.3 江达火山岩对金沙江洋壳俯冲消减的制约

金沙江弧盆系所有火山岩是金沙江洋盆所代表的古特提斯洋俯冲消减、洋盆闭合碰撞等不同构造阶段的产物和记录,金沙江混杂岩带洋脊—准洋脊型玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 361.6 ± 8.5 Ma,吉义独堆晶岩 Rb-Sr 等时线年龄为 264 ± 18 Ma,移山湖辉

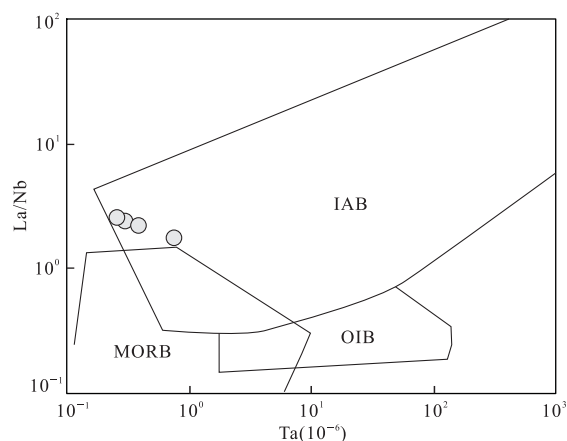


图 9 江达火山岩的 La/Nb -Ta 图解

Fig. 9 La/Nb -Ta diagram of the volcanic rock in the Jomda area

底图据李曙光(1993). IAB. 岛弧火山岩; MORB. 洋中脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩

绿岩墙角闪石 Ar-Ar 坪年龄为 345.7 ± 0.9 Ma 和等时线年龄为 349.1 ± 4.4 Ma(莫宣学等, 1993); 以上表明金沙江弧后洋盆形成时代为早石炭世。Jian *et al.* (2009a) 报道了书松堆晶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 343.5 ± 2.7 Ma, 认为其近似代表了金沙江古特提斯洋早期形成的时间。

简平等(1999)利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法获得德钦县书松斜长岩年龄为 340 Ma, 代表了金沙江洋盆扩张的时代。路远发等(2000)利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法获得嘎金雪山岩群中 2 件玄武岩样品的年龄, 2 个下交点年龄分别为 362 ± 8 Ma 和 396 ± 7 Ma, 2 个上交点年龄分别为 2525 ± 12 Ma 和 1387 ± 59 Ma, 并认为前者代表金沙江洋盆扩张的年龄、后者代表下伏基底年龄。Jian *et al.* (2008) 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年技术, 获得之用角闪辉长岩、书松斜长岩年龄分别为 320 ± 10 Ma、 329 ± 7 Ma, 认为它们反映的是洋盆不同扩张阶段的时代。王冬兵等(2012)获得东竹林层状辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 354 ± 3 Ma, 代表了洋盆扩张的时代。以上资料表明金沙江洋盆在早石炭世处于扩张阶段。

如前所述, 研究者们对于金沙江洋壳俯冲时限认识不一(侯增谦等, 1996; 莫宣学, 1998; 王立全等, 1999; 潘桂棠等, 2002; 简平等, 2003)。而金沙江(一哀牢山)洋盆西侧岛弧火山岩、弧后盆地的形成以及其弧盆系格局的发育为洋壳俯冲提供了证据。在早二叠世晚期至晚二叠世分别形成江达—维西—绿春二叠纪陆缘火山弧及其陆缘弧西侧的昌都—兰坪—

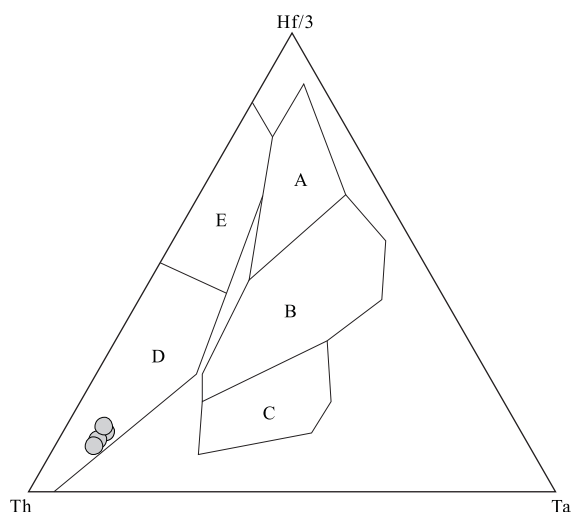


图 8 江达火山岩的 $\text{Hf}/3$ -Th-Ta 图解

Fig. 8 $\text{Hf}/3$ -Th-Ta diagram of the volcanic rock in the Jomda area

底图据 Jochum *et al.* (1991). A. N 型洋脊玄武岩; B. E 型洋脊玄武岩+板内拉斑玄武岩; C. 板内碱性玄武岩; D. 岛弧钙碱性玄武岩; E. 岛弧拉斑玄武岩

普洱弧后盆地。陆缘火山弧上的火山—沉积岩系在空间上岩相多变、沉积类型多样,岛弧地势起伏很大,有出露水面发育陆生植物和柱状节理的陆地,亦有潜伏于水下的碳酸盐岩台地及深水谷地,出现从陆相—海陆过渡相—浅海相—台地斜坡—深水盆地各种不同沉积相和沉积类型的沉积物,为岛链体分布的构造古地理格局。弧火山岩从早到晚发育拉斑玄武岩系列—钙碱性系列—钾玄武岩系列火山岩,火山岩性质标志着岛弧产生—发展—成熟的完整过程(莫宣学等,1993)。江达—维西—绿春陆缘火山弧的西侧为昌都—兰坪—普洱盆地,盆地中沉积形成次稳定型海陆交互复陆屑含煤碎屑岩、火山岩建造,滨海相复陆屑碎屑岩、火山岩建造以及浅海相碳酸盐岩、碎屑岩、火山岩建造。在金沙江洋盆东侧的中咱—香格里拉地块主体保持浅海台地相的碳酸盐岩沉积,中咱—香格里拉地块西部边缘相对昌都地块东部活动边缘弧盆系而言,二叠纪为被动大陆边缘裂陷盆地的演化发展时期,在其中发育陆棚边缘斜坡相的碳酸盐岩滑塌堆积、海底浊积扇沉积和次深海盆地相的砂泥质—硅泥质复理石,以及张裂型基性、中基性火山岩,火山岩及砂岩的岩石地球化学特征表现为被动大陆边缘环境(莫宣学等,1993)。滇东南晚二叠世砂岩和哀牢山带绿春二叠纪砂岩年龄谱相似。最年轻锆石年龄约为 285 Ma,在微量元素组成上与弧/造山型岩浆结晶锆石一致,对应于安山质—流纹质火山岩屑,指示早二叠世的火山岩浆活动(杨江海等,2017)。上述资料一致显示金沙江洋壳的俯冲消减时限为晚石炭世—二叠纪。

研究区江达安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 332 ± 3.3 Ma (MSWD = 2, $n = 14$; 图 4),系江达地区首次发现中石炭世晚期火山岩。据江达玄武岩主量、微量元素特征,玄武岩明显亏损 Nb、Ta 等元素,样品全部落入岛弧玄武岩区域(图 8)。综上所述,笔者认为江达玄武岩形成于岛弧构造环境,说明金沙江洋盆在中石炭世晚期之前已经开始俯冲消减活动。结合区域地质资料,笔者认为中石炭世—晚二叠世时期,金沙江带的构造地质背景发生了重大变化。金沙江盆地在早期扩张为大洋盆地的基础上,于中石炭世晚期发生了向西的俯冲消减,早二叠世晚期—晚二叠世时期达到顶峰,其标志是江达—德钦—维西陆缘火山弧及其陆缘弧西侧的昌都—兰坪—普洱弧后盆地的形成,从而奠定了金沙江(哀牢山)弧盆系的构造格局。

5 结论

(1)江达地区火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄约为 332 Ma,表明江达洞卡组并非前人认为的全部为三叠纪岩浆活动,同时指示金沙江洋盆存在中石炭世晚期岩浆活动。

(2)江达火山岩岩浆源区来源于受富集组分影响的岩石圈地幔,其岩石组合以及地球化学性质指示其形成于岛弧构造环境。

(3)金沙江特提斯洋在 332 Ma 之前就已经开始俯冲消减活动,为金沙江洋壳俯冲消减时限提供了新制约。

致谢:在文章撰写过程中王启宇、贺娟博士给予了帮助;审稿人对本文进行了认真审阅,提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

References

- Ayers, J., 1998. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid-Peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132 (4): 390 — 404. <https://doi.org/10.1007/s004100050431>
- Bièvre, P.D., Taylor, P.D.P., 1993. Table of the Isotopic Compositions of the Elements. *International Journal of Mass Spectrometry & Ion Processes*, 123(2): 149 — 166. [https://doi.org/10.1016/0168-1176\(93\)87009-h](https://doi.org/10.1016/0168-1176(93)87009-h)
- Blichert-Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127 (3): 248 — 260. <https://doi.org/10.1007/s004100050278>
- Chen, J.L., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2010. Origin of Cenozoic Alkaline Potassic Volcanic Rocks at Konglong Xiang, Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Products of Partial Melting of a Mafic Lower-Crustal Source? *Chemical Geology*, 273(3-4): 286 — 299. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.03.003>
- Chu, N.C., Taylor, R.N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17 (12): 1567 — 1574. <https://doi.org/10.1039/b206707b>
- Condie, K. C., 1986. Geochemistry and Tectonic Setting of Early Proterozoic Supracrustal Rocks in the Southwestern United States. *The Journal of Geology*, 94 (6):

- 845—864. <https://doi.org/10.1086/629091>
- Dong, S. Y., Zhong, K. H., Tang, J. X., et al., 2010. Intracontinental Rift the Jiangda Tectonic Evolution and Mineralization of Belt on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, SW China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37(4): 475—480 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. M., Peng, T. P., Wang, Y. J., et al., 2009. Triassic Magmatism in the Southern Lancangjiang Zone, Southwestern China and Its Constraints on the Tectonic Evolution of Paleo-Tethys. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 291—30 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00343-9)
- Hou, Z. Q., Mo, X. X., Zhu, Q. W., et al., 1996. Mantle Plume in the Sanjiang Paleo-Tethyan Region, China: Evidence from Ocean-Island Basalts. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 343—361 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., Chen, G. M., Chen, B. W., 1984. Preliminary Analysis of the Tethys-Himalayan Tectonic Domain. *Acta Geological Sinica*, 58(1): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009a. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (I): Geochemistry of Ophiolites, Arc/Back-Arc Assemblages and within-Plate Igneous Rocks. *Lithos*, 113(3—4): 748—766. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.004>
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009b. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (II): Insights from Zircon Ages of Ophiolites, Arc/Back-Arc Assemblages and within-Plate Igneous Rocks and Generation of the Emeishan CFB Province. *Lithos*, 113(3—4): 767—784. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.006>
- Jian, P., Liu, D. Y., Sun, X. M., 2003. SHRIMP Dating of Carboniferous Jinshajiang Ophiolite in Western Yunnan and Sichuan: Geochronological Constraints on the Evolution of the Paleo-Tethys Oceanic Crust. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217—228 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Liu, D. Y., Sun, X. M., 2008. SHRIMP Dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang Ophiolite, Southwestern China: Geochronological Constraints for the Evolution of Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5—6): 371—384. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.11.006>
- Jian, P., Wang, X. F., He, L. Q., et al., 1999. U-Pb Zircon Dating of Anorthosite and Plagiogranite from the Jinshajiang Ophiolite Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 590—593 (in Chinese with English abstract).
- Jochum, K. P., Arndt, N. T., Hofmann, A. W., 1991. Nb-Th-La in Komatiites and Basalts: Constraints on Komatiite Petrogenesis and Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(2): 272—289. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90076-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90076-T)
- Li, S. G., 1993. Ba-Nb-Th-La Diagrams Used to Identify Tectonic Environments of Ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146—157 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Lu, Y. F., Zhan, M. G., Chen, K. X., 2000. U-Pb Isotopic Dating of Basalt from the Gajinxueshan Group in the Jinshajiang Tectonic Belt. *Regional Geology of China*, 19(2): 155—158 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., 1998. Volcanic Rock-Ophiolite and Mineralization in the Middle-South of Sanjiang Area. Geological Publishing House, Beijing, 6—128 (in Chinese).
- Mo, X. X., Lu, F. X., Shen, S. Y., 1993. Tethys Volcanism and Mineralization in the Sanjiang Area. Geological Publishing House, Beijing, 65—77 (in Chinese).
- Pan, G. T., Li, X. Z., Wang, L. Q., et al., 2002. Preliminary Division of Tectonic Units of the Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Regions. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 701—707 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Xu, Q., Hou, Z. Q., 2003. Multi-Island Arc Orogenic Process Metallogenic System and Resource Evaluation in the Southwest “Sanjiang”. Geological Publishing House, Beijing, 11—79 (in Chinese).
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3—4): 325—394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267—310. <https://doi.org/10.1029/95rg01302>
- Ryerson, F. J., Watson, E. B., 1987. Rutile Saturation in Magmas: Implications for Ti-Nb-Ta Depletion in Island-Arc Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 86(2—

- 4); 225—239. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(87\)90223-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(87)90223-8)
- Saunders, A.D., Norry, M.J., Tarney, J., 1991. Fluid Influence on the Trace Element Compositions of Subduction Zone Magmas. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 335(1638): 377—392. <https://doi.org/10.1098/rsta.1991.0053>
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293(5530): 683—687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, X.M., Jian, P., 2004. The Wilson Cycle of the Jinshajiang Paleo-Tethys Ocean, in Western Yunnan and Western Sichuan Provinces. *Geological Review*, 50(4): 343—350 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X.M., Nie Z.T., Liang, D.Y., 1995. Determination of Sedimentary Environments and Tectonic Significance of Silicites in Jinsha River Belt, NW Yunnan. *Geological Review*, 41(2): 174—178, 200 (in Chinese with English abstract).
- Song, J.L., Ding, J., Wang, B.D., et al., 2018. Wenyu Copper (Silver) Deposit Ore-Forming Geological Background, Jingdong County, Yunnan: Geochronology and Geochemistry Evidences from Ore-Bearing Volcanic Rocks. *Earth Science*, 43(3): 696—715 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.902>
- Thirlwall, M.F., Smith, T.E., Graham, A.M., et al., 1994. High Field Strength Element Anomalies in Arc Lavas: Source or Process? *Journal of Petrology*, 35(3): 819—838. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.3.819>
- Wang, D.B., Wang, L.Q., Yin, F.G., et al., 2012. Timing and Nature of the Jinshajiang Paleo-Tethys: Constraints from Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of the Dongzhulin Layered Gabbro from Jinshajiang Ophiolite Belt, Northwestern Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1542—1550 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.Q., Pan, G.T., Li, D.M., et al., 1999. The Spatio-Temporal Framework and Geological Evolution of the Jinshajiang Arc-Basin Systems. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 206—218 (in Chinese with English abstract).
- White, W.M., Patchett, J., 1984. Hf-Nd-Sr Isotopes and Incompatible Element Abundances in Island Arcs: Implications for Magma Origins and Crust-Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(2): 167—185. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(84\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(84)90112-2)
- 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. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Yang, Y.H., Xie, L.W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234(1—2): 105—126. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.003>
- Wu, H.R., 1993. Discovery of Early Carboniferous Deep-Sea Sediments from Jinsha Belt, NW Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 28(4): 395—397, 406 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Du, Y.S., Yu, X., et al., 2017. Early Permian Volcanic Fragment-Bearing Sandstones in Babu of Southeast Yunnan: Indicative of Paleo-Tethyan Ocean Subduction. *Earth Science*, 42(1): 24—34 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.002>
- Yuan, H.L., Gao, S., Dai, M.N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1—2): 100—118. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.003>
- Zhang, Q., Zhou, D.J., Zhao, D.S., et al., 1996. Wilson Cycle of the Paleo-Tethyan Orogenic Belt in Western Yunnan: Record of Magmatism and Discussion on Mantle Processes. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 17—28 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T.Y., Qian, X., Feng, Q.L., 2016. Geochemistry, Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Constraints on the Petrogenesis of the Silurian Rhyolites in the Loei Fold Belt and Their Tectonic Implications. *Journal of Earth Science*, 27(3): 391—402. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0671-y>

附中文参考文献

- 董树义, 钟康惠, 唐菊兴, 等, 2010. 西藏高原东部江达构造带陆内裂谷演化与成矿作用. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 475—480.
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军, 2009. 滇西古特提斯俯冲—碰撞过程的岩浆作用记录. 地学前缘, 16(6): 291—302.
- 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 等, 1996. “三江”古特提斯地幔热

- 柱——洋岛玄武岩证据.地球学报,17(4):343—361.
- 黄汲清,陈国铭,陈炳蔚,1984.特提斯—喜马拉雅构造域初步分析.地质学报,58(1):1—17.
- 简平,汪啸风,何龙清,等,1999.金沙江蛇绿岩中斜长岩和斜长花岗岩的 U-Pb 年龄及地质意义.岩石学报,15(4):590—593.
- 简平,刘敦一,孙晓猛,2003.滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年:古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约.地质学报,77(2):217—228.
- 李曙光,1993.蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图.岩石学报,9(2):146—157.
- 路远发,战明国,陈开旭,2000.金沙江构造带嘎金雪山岩群玄武岩铀—铅同位素年龄.中国区域地质,19(2):155—158.
- 莫宣学,路风香,沈上越,等,1993.三江特提斯火山作用与成矿.北京:地质出版社,65—77.
- 莫宣学,1998.三江中南段火山岩—蛇绿岩与成矿,北京:地质出版社,6—128.
- 潘桂棠,侯增谦,徐强,等,2003.西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价.北京:地质出版社,11—79.
- 潘桂棠,李兴振,王立全,等,2002.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分.地质通报,21(11):701—707.
- 孙晓猛,简平,2004.滇川西部金沙江古特提斯洋的威尔逊旋回.地质论评,50(4):343—350.
- 孙晓猛,聂泽同,梁定益,1995.滇西北金沙江带硅质岩沉积环境的确定及大地构造意义.地质论评,41(2):174—178,200.
- 宋俊龙,丁俊,王保弟,等,2018.云南景东县文玉铜(银)矿成矿地质背景:来自赋矿火山岩年代学和地球化学的证据.地球科学,43(3):696—715. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.902>
- 王冬兵,王立全,尹福光,等,2012.滇西北金沙江古特提斯洋早期演化时限及其性质:东竹林层状辉长岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素约束.岩石学报,28(5):1542—1550.
- 王立全,潘桂棠,李定谋,等,1999.金沙江弧—盆系时空结构及地史演化.地质学报,73(3):206—218.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 吴浩若,1993.滇西北金沙江带早石炭世深海沉积的发现.地质科学,28(4):395—397,406.
- 杨江海,杜远生,于鑫,等,2017.滇东南八布早二叠世含火山岩屑砂岩指示古特提斯洋俯冲.地球科学,42(1):24—34. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.002>
- 张旗,周德进,赵大升,等,1996.滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回:岩浆活动记录和深部过程讨论.岩石学报,12(1):17—28.