

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.163>



北羌塘三叠纪辉石闪长玢岩的成因 及其地球动力学背景

杨 凯^{1,2,3}, 刘 彬^{1,2,4*}, 马昌前⁴, 孙 洋^{1,4}, 张 飞⁵, 牟进忠¹, 何 雨¹, 肖 露¹

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100
2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
5. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

摘 要: 尽管大量的研究发现青藏高原中部地区发育有三叠纪大规模岩浆活动, 然而对于这些岩浆活动的成因机制以及深部动力学背景等问题的认识还存在很大的分歧. 通过对青藏高原中部北羌塘地区三叠纪典型辉石闪长玢岩开展了系统的锆石 U-Pb 年代学、矿物化学、岩石地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 深入剖析其岩石成因及动力学背景, 进而为深入探究青藏高原中部三叠纪岩浆作用形成机理与有关板块构造演化过程提供重要的证据. 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法获得该岩浆岩的结晶年龄为 227 ± 2 Ma (MSWD=0.86). 岩石样品在地球化学组成上相对富硅和铝, 属于钙碱性系列. 样品轻重稀土分异较强, 轻稀土相对于重稀土显著富集, 并且具有明显的 Eu 负异常. 在微量元素组成上, 样品相对于原始地幔要富集轻稀土以及 Th、U, 显著亏损 Nb、Ta 和 Ti, 整体表现出火山弧岩浆岩的特征. 样品均具有相对较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-4.53 \sim -4.99$)、比较集中 I_{Sr} 值 ($0.70705 \sim 0.70714$), 以及正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+0.81 \sim +2.48$), 表明其岩浆源区很可能以富集的地幔组分为主. 综合岩石学、地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素等研究结果, 确定该岩体的形成应该与受俯冲组分 (例如沉积物) 改造的富集地幔的部分熔融有关. 此外, 结合区域上已有的多学科研究资料还可以证实北羌塘地区有关古特提斯洋的俯冲时间至少开始于 227 Ma.

关键词: 三叠纪; 闪长玢岩; 岩石成因; 古特提斯洋; 北羌塘; 岩石学.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2020)05-1490-13

收稿日期: 2019-07-08

Petrogenesis and Geodynamic Setting of Triassic Pyroxene Diorite-Porphyrite from the North Qiangtang Terrane: Geochronology, Mineral Petrogeochemistry and Sr-Nd-Hf Isotope Constraints

Yang Kai^{1,2,3}, Liu Bin^{1,2,4*}, Ma Changqian⁴, Sun Yang^{1,4}, Zhang Fei⁵, Mou Jinzhong¹, He Yu¹, Xiao Lu¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

基金项目: 油气资源与探测国家重点实验室开放课题基金项目 (No. PRP/open-1908); 国家自然科学基金项目 (No. 41502050); 中国地质调查局项目 (No. DD20160022); 长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目和长江青年基金项目 (No. 2015cqn29); 大学生创新创业训练计划项目 (No. 2016011).

作者简介: 杨凯 (1995-), 男, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: kaiy_cugb@163.com

***通讯作者:** 刘彬, E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

引用格式: 杨凯, 刘彬, 马昌前, 等, 2020. 北羌塘三叠纪辉石闪长玢岩的成因及其地球动力学背景. 地球科学, 45(5):1490-1502.

Abstract: Although large volume of Triassic magmatism has been identified in the central Tibetan Plateau, the petrogenesis and geodynamic setting of these igneous rocks are still poorly understood. In this paper, we carried out a detailed study of zircon U-Pb geochronology, petrology, and geochemistry for the diorite porphyrite in North Qiangtang terrane, aiming to reveal its petrogenesis and constrain the exploration of the Triassic tectonic-magmatic evolution. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for this magmatic rock yields a crystallization age of 227 ± 2 Ma (MSWD=0.86). All the samples have high contents of silicon and aluminum and belong to calc-alkaline series in composition. Compared with the primitive mantle, they exhibit enrichment of LREE, Th, and U, with depletion of Nb, Ta and Ti. All the samples have relatively low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-4.53 to -4.99), relatively concentrated I_{Sr} values (0.707 05 to 0.707 14), and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($+0.81$ to $+2.48$), suggesting an enriched mantle. Geochemical and isotopic variations reveal that the diorite-porphyrite was derived from partial melting of an enriched mantle that was previously modified by subduction-related components (e.g., sediments). In addition, combined with the existing multi-disciplinary research data in the region, it could be concluded that the subduction of the Paleo-Tethyan ocean in the North Qiangtang terrane lasted at least to 227 Ma.

Key words: Triassic; diorite-porphyrite; petrogenesis; Paleo-Tethyan Ocean; North Qiangtang terrane; petrology.

0 引言

作为世界“第三极”的青藏高原,被国内外众多学者公认为是世界上研究大陆动力学和构造—岩浆—成矿作用最好的天然实验室,一直受到国际地质界的密切关注与重视(莫宣学,2010)。青藏高原的形成经历了自500 Ma以来与东特提斯(始、古、新)三大洋盆演化密切相关的历史,通过许多条带状地体汇聚到最后的两大陆碰撞,构筑了现今由“始、古特提斯复合造山系”和“冈底斯—喜马拉雅新特提斯造山系”组成的“巨型复合碰撞造山拼贴体”。青藏高原中部地区发育了典型的古特提斯造山系,其构造格架涉及到诸多条带状地体、缝合带、高压变质带、岛弧群和增生楔系列组合(许志琴等,2013),是认识青藏高原古特提斯洋构造演化与金属成矿作用的最佳窗口之一(Yin and Harrison, 2000; Pan *et al.*, 2012; Metcalfe, 2013; 许志琴等,2013)。伴随着有关古特提斯洋盆的构造演化以及相关地体拼合过程,该区发育了大量的三叠纪岩浆作用,这些岩浆岩集中分布在北羌塘北缘和南缘位置(Zhao *et al.*, 2015; 刘彬等,2016; Liu *et al.*, 2020)。然而,目前对于这些岩浆岩的成因机制和地球动力学背景等认识还存在很大的争论,其争论焦点在于究竟是形成于与板块俯冲有关环境(Yang *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015)还是陆—陆碰撞后伸展的环境(Fu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2014)?对这些三叠纪岩浆岩开展深入研究,能为详细刻画青藏高原晚古生代—早中生代板块构造演化过程提供非常关键的证据。

本研究主要选取青藏高原中部北羌塘地体北

缘三叠纪典型闪长玢岩为具体研究对象,通过开展系统的锆石 U-Pb 年代学、矿物化学、岩石地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素等研究,来深入剖析其成因机制与地球动力学背景,进而为深入认识与理解青藏高原中部三叠纪岩浆作用的形成机理及有关板块构造演化过程提供重要的证据。

1 区域地质背景与样品描述

青藏高原是世界上最高、最大、最年轻的高原,经历了复杂的特提斯构造演化(Yin and Harrison, 2000; 莫宣学, 2010; Pan *et al.*, 2012)。其中,古特提斯构造—岩浆体系在青藏高原中部地区发育较为典型,该体系涉及多个地体和缝合带的复杂演化过程。青藏高原中部有4个古特提斯缝合带,由北向南依次为阿尼玛卿—昆仑缝合带(AKS)、甘孜—理塘缝合带(GLS)、金沙江缝合带(JS)和龙木错—双湖缝合带(LSS)(图1)。其中,羌塘地体被龙木错—双湖缝合带分为北羌塘地体和南羌塘地体两个单元,总体上形成两坳一隆的构造格局,龙木错—双湖缝合带和甘孜—理塘缝合带之间的北羌塘地体主体为中生代海相沉积,主要出露石炭系浅变沉积岩系、石炭纪—二叠纪陆缘碎屑岩—火山岩和三叠纪火山岩—陆缘碎屑岩—碳酸盐岩3个地层单元,并且含有少量第三系—第四系的山间盆地沉积物(刘彬等,2016)。石炭系地层主要由下石炭统杂多群和上石炭统加麦弄群组成。杂多群自下而上可以分为3个组,分别为下碳酸盐岩组(C_1Z^1)、碎屑岩组(C_1Z^2)和上碳酸盐岩组(C_1Z^3)。上石炭统加麦弄群与下伏杂多群平行不整合接触,可以分为下部碎屑岩夹灰岩组(C_2Z^1)和上部碳酸盐岩组(C_2Z^2)。二叠系

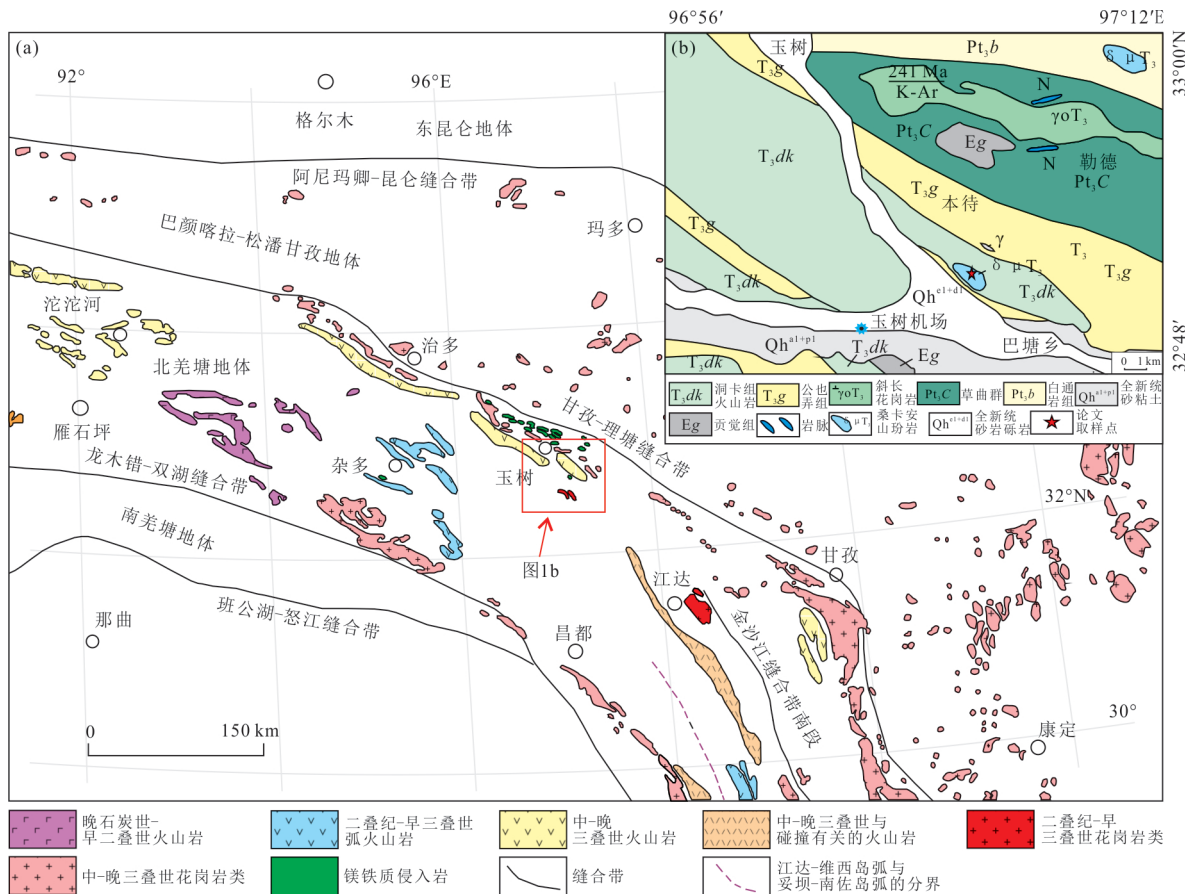


图1 玉树南部闪长玢岩大地构造位置与岩体地质简图

Fig.1 Simplified tectonic map and geological map for the southern Yushu diorite-porphyrite
据 Liu et al.(2016)修改

开心岭群主要出露杂岩组(P_{1-2gd})与石炭系杂多群呈断层接触.岩性组合表现为火山岩或火山碎屑岩与碳酸盐岩或碎屑岩互层.三叠系地层在北羌塘地块主要由中三叠统结隆组(T_2j),其岩性主要为板岩、灰岩和砂岩;上三叠统结扎群和上三叠统巴塘群(T_3B)组成,并且中三叠统上部与上三叠统下部接触关系为角度不整合,岩性主要为砂岩、粉砂岩、灰岩、泥岩和少量板岩.

本文研究岩体位于北羌塘地体北缘,出露于玉树县南,近文成公主庙(图1).该岩体岩性为辉石闪长玢岩,主要侵入到三叠系巴塘群碳酸盐岩或者碎屑岩地层中(图1).岩石样品多为浅灰绿色,发育典型的斑状结构.其中,斑晶主要为斜长石、角闪石、辉石和少量的不透明矿物(图2),斑晶矿物粒径大小约为0.8~1.5 mm,斑晶总量约占35%.斜长石多为半自形板状,无色透明,但蚀变较强,大多被绢云母和粘土矿物等交代,但部分切面的环带结构或者聚片双晶可见.角闪石主要为

长柱状晶,绿色,多数切面被绿泥石和不透明金属矿物所交代.辉石为半自形—他形柱状,具有微弱的蚀变现象,但是大多数切面保存完好,最高干涉色可达Ⅱ蓝(图2).基质主要由斜长石微晶、不透明矿物以及隐晶质物质组成(图2).

2 测试方法

在岩相学分析的基础上,对典型的闪长玢岩样品进行全岩碎样和锆石矿物分选.锆石分选经过机械粉碎、重磁和电磁分选后,在双目镜下进行手工提纯并且选取晶形良好和纯净透明的锆石进行制靶以及阴极发光(CL)、透射—反射光照相.锆石U-Pb定年是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用LA-ICP-MS完成.其中,ICP-MS为Agilent 7500a,激光剥蚀系统为GeoLas 2005,激光剥蚀系统的激光脉冲频率为1 Hz.每个样品分析都具有20~30 s的空白信号以及50 s的样品信号.实验中采用的激光束斑直径为

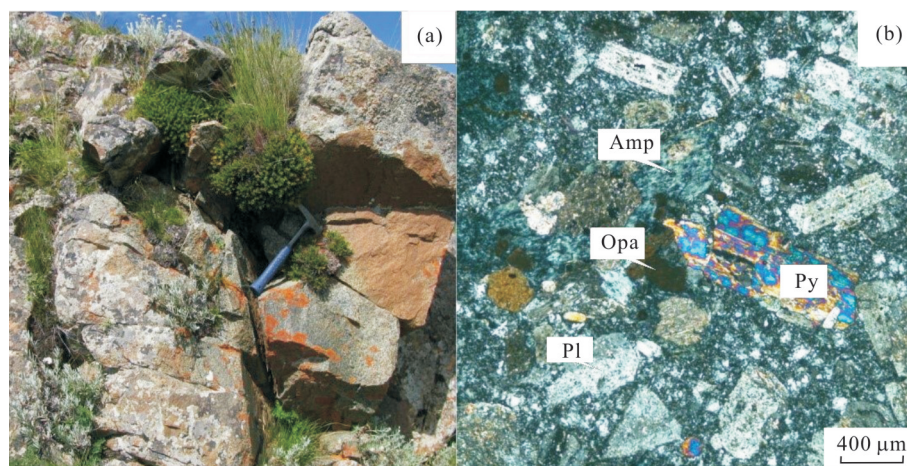


图2 玉树南部闪长玢岩野外露头(a)和正交偏光镜下照片(b)

Fig. 2 Field photographs (a) and photomicrographs (b) of the southern Yushu diorite-porphyre

Amp. 角闪石; Opa. 不透明金属矿物; Py. 辉石; Pl. 斜长石

32 μm . 锆石年龄测定利用哈佛大学标准锆石 91500 作为外标. 实验详细操作和数据处理方法见文献 (Liu *et al.*, 2008a, 2008b, 2010). 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄和 U-Pb 谐和图主要采用 Ludwig 编写的 ISOPLOT 程序完成.

辉石矿物化学分析主要是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 JEOL-JXA-8100 电子探针完成. 岩石主量元素的测定是在湖北省地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心完成, 主要氧化物采用 X 荧光光谱 α 系数测定法, 分析精度均为 1% (H_2O 除外). 岩石稀土和微量元素的测定是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 全岩 Sr-Nd 同位素测定是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用热电离同位素质谱仪 (TIMS, Triton T1) 完成. 仪器的准确度通过标样 La Jolla 和 NBS987 进行监测. 详细的实验流程和方法可见文献 (Gao *et al.*, 2004). 原位微区锆石 Hf 同位素比值测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 LA-MC-ICP-MS 完成. 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus. 装置所使用的激光脉冲频率低至 1 Hz, 测试过程中使用氦气作为载气, 利用 44 μm 束斑单点剥蚀模式. 详细的实验分析方法和操作过程可参照文献 (Hu *et al.*, 2012).

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本研究利用 LA-ICP-MS 对闪长玢岩样品进行锆石 U-Pb 同位素定年, 共测定 19 颗锆石和 19 个数据点. 测试数据如附表 1 所示. 该样品中的锆石均为无色、淡黄色, 透明度良好, 晶体呈自形一半自形, 晶体粒径为 50~100 μm , 阴极发光 (CL) 图像显示, 多个锆石具有明显的岩浆震荡环带, 并且 19 个测试点的 Th/U 比值为 0.4~0.7, 均大于 0.4, 总体上与典型的岩浆锆石特征类似 (Belousova *et al.*, 2002), 在观测点中, 给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 222~233 Ma, 通过加权平均值计算其平均年龄为 227 ± 2 Ma (MSWD=0.82), 这一年龄代表闪长玢岩的结晶年龄. 在锆石 U-Pb 谐和图 (图 3) 上面没有明显偏移的现象.

3.2 辉石成分

考虑样品中辉石保存相对完好, 因此本次主要对辉石开展矿物化学研究, 共分析 15 个点的主量元素成分. 具体的电子探针分析及相关参数的计算结果见附表 2. 单斜辉石总体化学成分显示 SiO_2 (51.57%~53.37%)、 TiO_2 (0.19%~0.28%)、 Al_2O_3 (0.97%~1.39%)、 Cr_2O_3 (0.00%~0.03%)、 FeO_t (11.63%~12.34%)、 MnO (0.31%~0.40%)、 MgO (11.87%~12.75%)、 CaO (19.89%~20.43%)、 Na_2O (0.19%~0.30%)、 $\text{Mg}^\#$ (45~49), 总体上表现为低钠、铝, 相对富钙、铁的特征. 根据 Morimoto (2007) 方法可以判断这些辉石在成分上属于 Ca-Fe-Mg 辉石, 并且这些辉石成分点在 Wo-En-Fs 图解中投

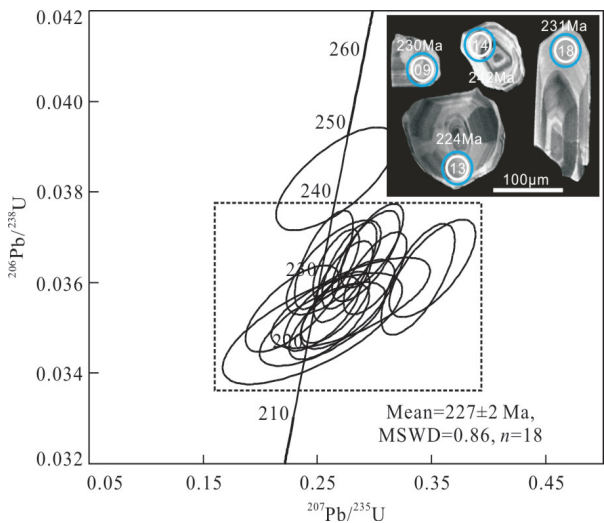


图 3 玉树南部辉石闪长玢岩样品典型锆石的 CL 图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagrams of zircon U-Pb data and representative cathodoluminescence (CL) images of the southern Yushu diorite-porphyre

CL 图中大圈和小圈分别代表锆石 Lu-Hf 同位素和 U-Pb 同位素测点

影均落在普通辉石成分范围内(图 4a). 辉石样品整体上具有较低的 Al_2O_3 含量及较高的 SiO_2 含量, 在单斜辉石的 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中(图 4b), 投影点全部落在亚碱性区域, 表明其母岩浆应属于亚碱性系列.

3.3 全岩主量元素与微量元素

典型火山岩全岩主量元素以及微量元素种类及成分测试结果和计算得到的有关参数见附表 3. 本研究岩石样品含有较高的 SiO_2 (57.62%~

60.30%), 富 Al_2O_3 (15.36%~15.66%)、 FeO^T (6.54%~7.48%) 和 MgO (2.96%~4.06%), 岩石样品 $\text{Mg}^\#$ 值介于 45~49; FeO^T/MgO 比值范围为 1.84~2.21; CaO 含量较高, 介于 5.81%~6.26%.

样品都具有相对富铝的特征, Al_2O_3 的含量为 15.36%~15.66%, 铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.85~1.68, 样品显示出弱过铝质到准铝质的特点. 所有样品都具有低 Nb/Y 比值的特征 ($\text{Nb}/\text{Y}=0.20\sim0.21$), 将样品数据投影在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ 图解中可得到投影基本落在安山岩及安山岩或玄武岩的成分范围内(图 5a).

闪长玢岩的球粒陨石标准化分布图比较平缓, 具有轻微的负坡度, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值为 2.84~3.13, 岩石样品的稀土元素含量中等, ΣREE 为 $75.49\times10^{-6}\sim89.15\times10^{-6}$. 重稀土元素分布平缓, 无明显分异现象, 轻稀土元素具有较强的分异现象, 轻稀土元素相对于重稀土元素具有明显富集的现象 ($\text{LREE}/\text{HREE}=5.26\sim5.76$, 图 6a), 并且显示出比较明显的 Eu 负异常现象 (δEu 为 0.74~0.84, 图 6a). 在微量元素组成上, 样品相对于原始地幔要富集 Th 和 U, 亏损 Nb、Ta 和 Ti, 整体表现出火山弧岩浆岩的特征(图 6b).

3.4 Sr-Nd-Hf 同位素

岩石样品选取了 2 件测定全岩 Sr-Nd 同位素, 相关测试及计算结果见附表 4. 样品 Sr、Nd 同位素初始比值以 227 Ma 为基准计算. 结果显示 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.479 54~0.816 68, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为

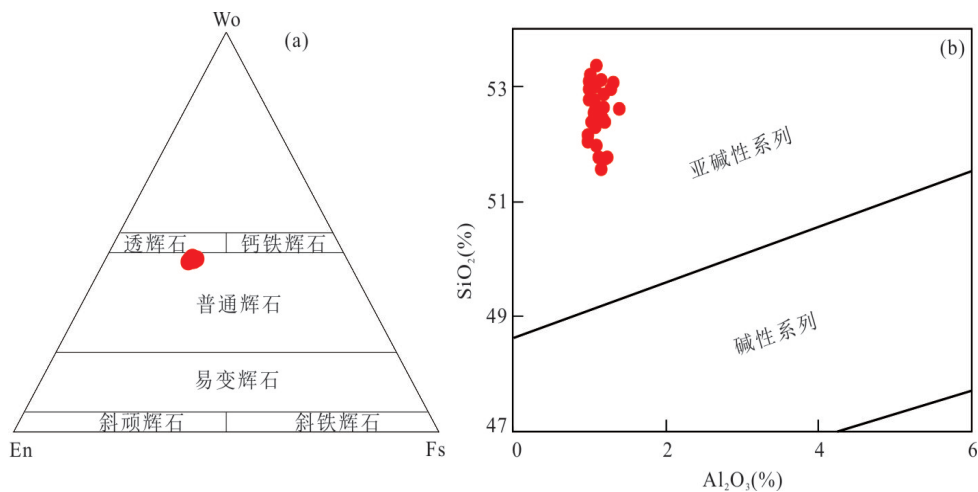
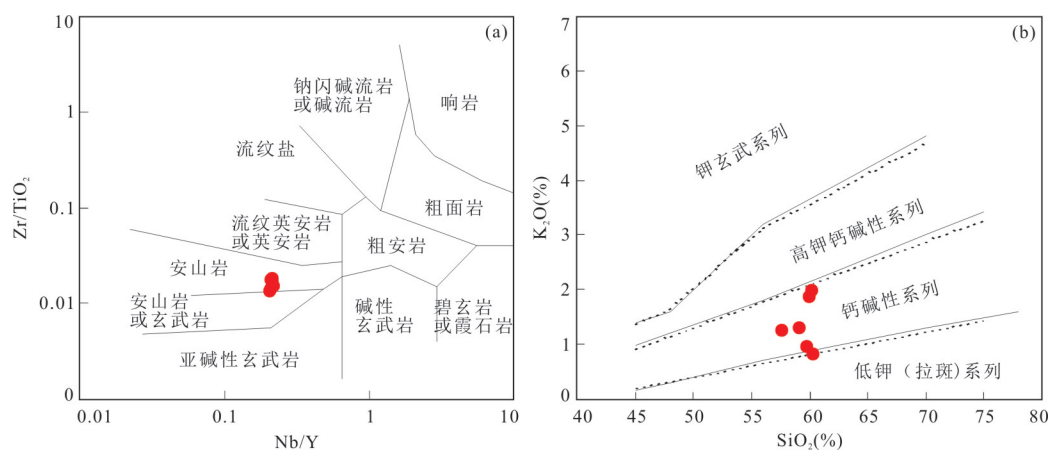


图 4 玉树南部辉石闪长玢岩单斜辉石分类图解(a)及 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 关系 (b)

Fig.4 Compositional characteristics of the pyroxene (a) and $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) digrams of the southern Yushu diorite-porphyre 据 Morimoto (2007)

图5 玉树南部闪长玢岩 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 图解(a)和 SiO_2-K_2O 图解(b)Fig. 5 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ (a) and SiO_2-K_2O (b) diagrams of the southern Yushu diorite-porphyrite

底图据 Peccerillo and Taylor(1976)和 Winchester and Floyd(1977)修改

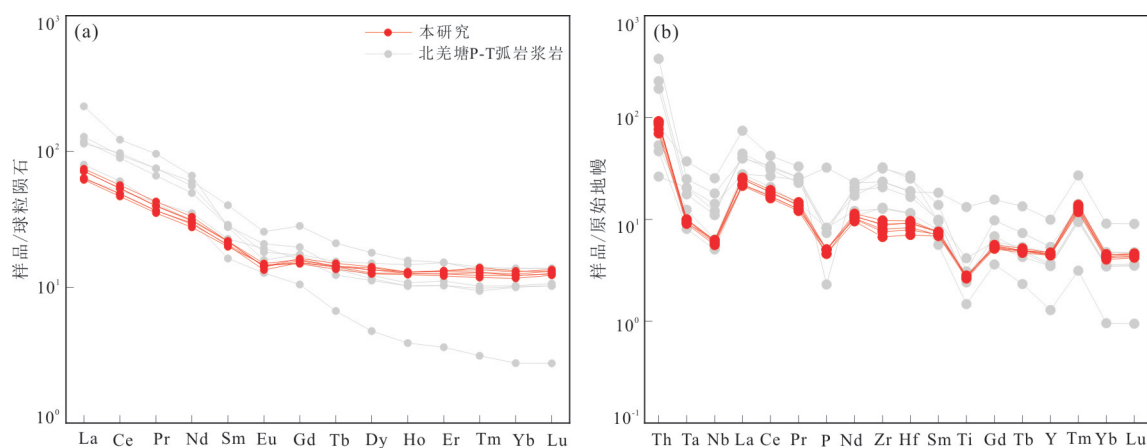


图6 玉树南部闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化分布图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element diagrams (b) of the southern Yushu diorite-porphyrite

球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989), 北羌塘 P-T 弧岩浆岩数据据 Yang *et al.* (2011)

0.708 62~0.709 82, 计算其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值 (I_{Sr}) 为 0.707 05~0.707 14, 可以看出 I_{Sr} 比较集中. 样品 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值为 0.139 50~0.139 64, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值为 0.512 30~0.512 32, 计算得到对应的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -4.53~-4.99 (图 7). 绝大多数样品的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值小于 0.001 811, 表明锆石在形成后具有极低的放射性成因 Hf 的积累. 10 个测点的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值分布在 0.282 643~0.282 703, 平均值为 0.282 666, $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为正值, 并介于 +0.183 172~+2.480 245, 且绝大多数测点分布于 +1.0 左右, 所有样品的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 的平均值为 +1.13, 在 $\epsilon_{Hf}(t)-$ 锆石 U-Pb 年龄图解上, 所有样品分布于亏损地幔演化线和球粒陨石演化线之间. 测点 YS34-07 的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为最高值 +2.480 245, T_{DM2} 分别

用铁镁质地壳 ($f_{Lu/Hf} = -0.34$; Amelin *et al.*, 2000) 和硅铝质地壳 ($f_{Lu/Hf} = -0.72$; Vervoort and Blichert, 1999) 的 Lu/Hf 比值分别计算, 由于锆石的 Lu/Hf 比值 ($f_{Lu/Hf} = -0.96$) 显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比值, 因此两阶段模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或其源区物质在地壳的平均存留年龄. 本次研究结果显示其两阶段模式年龄 (t_{DM2}) 分布在 0.99~1.12 Ga, 平均值为 1.07 Ga (图 8).

4 讨论

4.1 岩石成因

本文研究的玉树南部辉石闪长玢岩样品的 Sr-

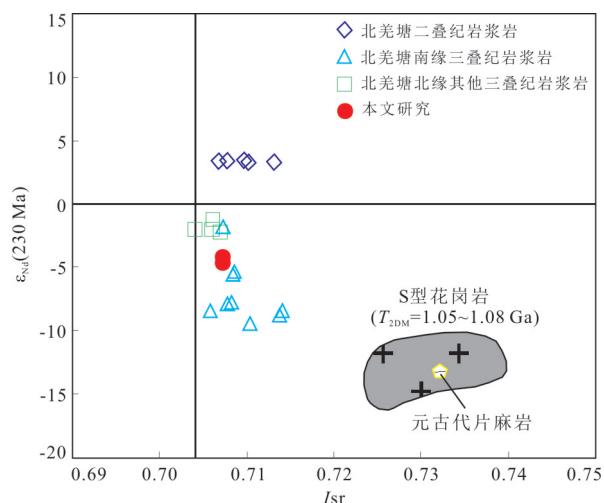
图7 玉树南部闪长玢岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - I_{\text{Sr}}$ 图解

Fig.7 Plot of $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - I_{\text{Sr}}$ of the southern Yushu diorite-porphyrite

S型花岗岩和元古代片麻岩 Sr-Nd 同位素数据据 Peng *et al.* (2014) 和 Tao *et al.* (2014); 北羌塘二叠纪岩浆岩、南缘三叠纪岩浆岩以及北缘其他三叠纪岩浆岩的 Sr-Nd 同位素数据分别据 Zhai *et al.* (2013); Zhang *et al.* (2013); Zhao *et al.* (2015)

Nd 同位素比值与 SiO_2 含量无明显的相关性, 并且其 Nb/La 比值 (0.24~0.28) 随着 $\text{Mg}^\#$ 值的降低而基本保持不变 (图 9a), $\text{Mg}^\#$ 和 Nb/La 没有明确的相关性, 说明没有同时经历岩浆分离结晶和同化混染作用 (即 AFC 过程), 表明该闪长玢岩在形成过程中受地壳混染的影响较小. 因此, 可以根据该样品的地球化学和同位素特征来有效地揭示其源区组成与岩石成因机制.

所有的岩石样品相对原始地幔富集 LILE 和

LREE, 明显亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 等, 并且具有较高的 Th、U 以及 Pb 含量 (图 6b), 这些与典型弧火山岩的化学特征类似. 岩石样品具有相对高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.707 05~0.707 14) 和相对低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-4.53~-4.99), 并且样品也具有相对低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+0.2~+2.5). 这些特征表明其源区很可能以富集地幔组分或者陆壳物质为主. 最新实验岩石学研究也揭示下地壳变玄武质岩在 1 100 °C 时可发生部分熔融形成低硅 ($\text{SiO}_2 < 58\%$) 准铝质熔体, 但是通过该机制产生的熔体无论部分熔融程度怎样, 均具有较低 $\text{Mg}^\#$ 值 (< 44) 和较高 Na_2O 含量 ($> 4.3\%$) 的地球化学特征 (Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995), 而本文研究的闪长玢岩所有样品 $\text{Mg}^\#$ 值明显大于 45, Na_2O 值较低, 多数要小于 4.3%, 这些特征与变玄武岩部分熔融形成的熔体成分明显不同 (图 9b), 表明其岩浆源区并非来自玄武质下地壳成分. 结合岩石的 Sr-Nd-Hf 同位素特征, 可以进一步推断其源区很可能为一个富集的地幔源区.

玉树南部闪长玢岩在原始地幔标准分布图具有明显的 Nb-Ta 槽 (图 6b), 与典型俯冲带岩浆岩相似, 样品中具有较高的 Th/La、Nb/Y 及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (分别为 0.40~0.48、0.19~0.21 和 0.708~0.709), 低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-4.53~-4.99), 指示出地幔源区可能受到俯冲组分的改造 (Plank, 2005). 值得注意的是, 俯冲带携带的沉积物熔体和含水流体会交代地幔楔, 从而导致地幔的 Nd-Hf 同位素解耦、偏离 $\epsilon_{\text{Hf}} - \epsilon_{\text{Nd}}$ 的地幔排序 (Pearce *et al.*, 1999; Polat and

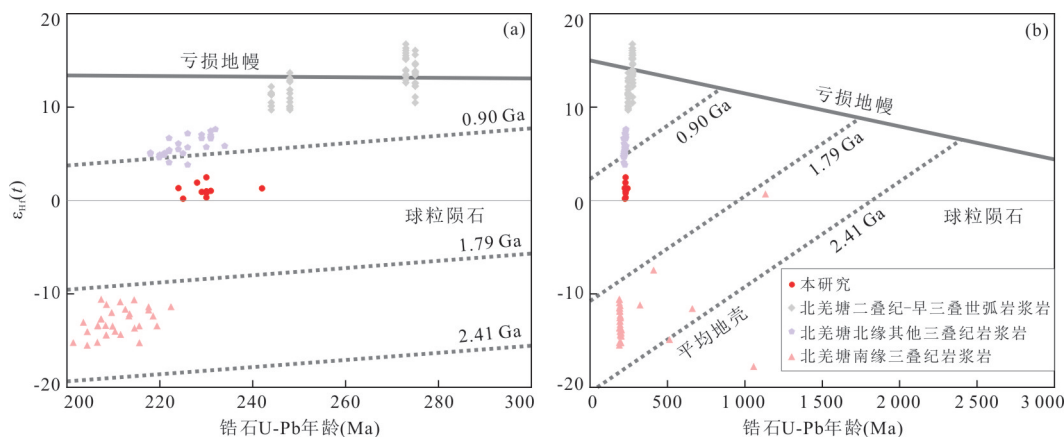


图8 玉树南部闪长玢岩样品 Hf 同位素组成图解

Fig.8 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \text{zircon U-Pb ages (Ma)}$ of the southern Yushu diorite-porphyrite

北羌塘二叠纪-早三叠世弧岩浆岩的 Hf 同位素数据据 Yang *et al.* (2011); 北羌塘北缘其他三叠纪岩浆岩数据分别据 Zhao *et al.* (2015) 和刘彬等 (2016); 北羌塘南缘三叠纪岩浆岩数据据 Peng *et al.* (2014)

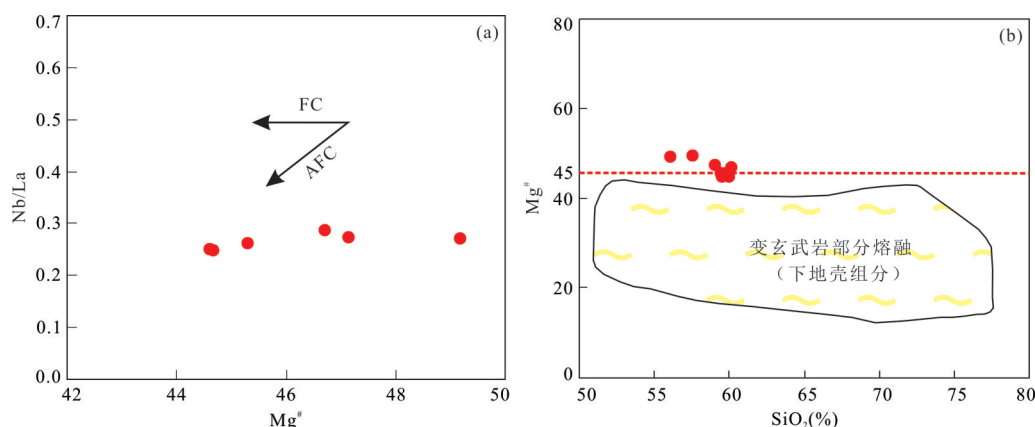
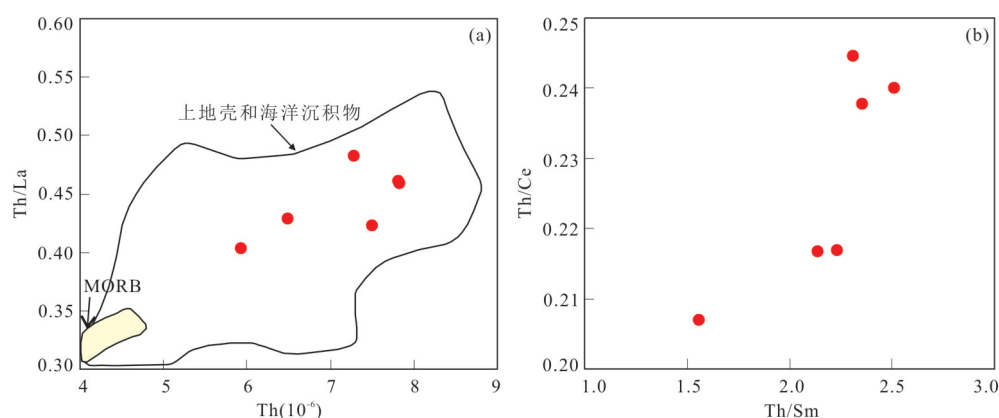
图9 玉树南部闪长玢岩样品 Nb/La—Mg[#](a)和 Mg[#]—SiO₂图解(b)Fig.9 Plots of Nb/La—Mg[#] (a) and Mg[#]—SiO₂ (b) of the southern Yushu diorite-porphphyrite

图10 玉树南部闪长玢岩 Th/La—Th(a)和 Th/Ce—Th/Sm关系图解(b)

Fig.10 Plots of Th/La—Th (a) and Th/Ce—Th/Sm (b) showing a significant linear relationship of the southern Yushu diorite-porphphyrite

a. 据 Plank (2005)

Munker, 2004). 本文研究的闪长玢岩样品 Nd-Hf 同位素存在部分解耦的现象, 其中 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值明显小于 0, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值却明显大于 0, 为 +0.2~+2.5, 进一步证实了俯冲组分的加入导致地幔源区的相对富集.

闪长玢岩样品均具有较低的 U/Th (0.18~0.25) 比值和较高的 Th/La (0.40~0.48) 比值, 并且其 Th/Ce (0.20~0.24) 明显高于地幔和 MORB 的相应比值, 这些特征与远洋沉积物类似. 样品在 Th/La—Th (图 10a) 图解中的投影点全部落在上地壳和海洋沉积物区域内, 在 Th/Ce—Th/Sm 图解中具有明显的正相关性 (图 10b), 表明有大量的大洋沉积物加入到地幔源区中 (Hawkesworth *et al.*, 1997; Plank, 2005). 此外, 俯冲沉积物熔体的加入会显著提高岩浆的 La/Sm 比值, 但是不会改变其 Ba/Th 比值 (Tatsumi, 2006). 所有样品显示出相对较高 La/Sm (4.80~5.28) 比值和相对较低

的 Ba/Th (27.53~53.22) 比值 (图略), 进一步证实了沉积物组分改造了深部地幔源区.

综合上述资料, 可以判断玉树南部闪长玢岩的形成应该与一个初始受到俯冲组分 (例如沉积物熔体) 改造的富集地幔的部分熔融有关.

4.2 构造背景

由于研究区分布范围广、受到中生代地层覆盖、自然环境恶劣, 并且由于早期测试条件比较简陋等因素, 目前国内外学者对于北羌塘地体三叠纪岩浆岩的成因机制与构造属性的认识存在很大的争论, 其争论的焦点主要在于三叠纪岩浆岩是形成于陆—陆碰撞后伸展的环境 (Fu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2014) 还是与板块俯冲有关环境 (Yang *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2011, 2013; Zhao *et al.*, 2015).

本文研究闪长玢岩样品为钙碱性系列, 稀土和

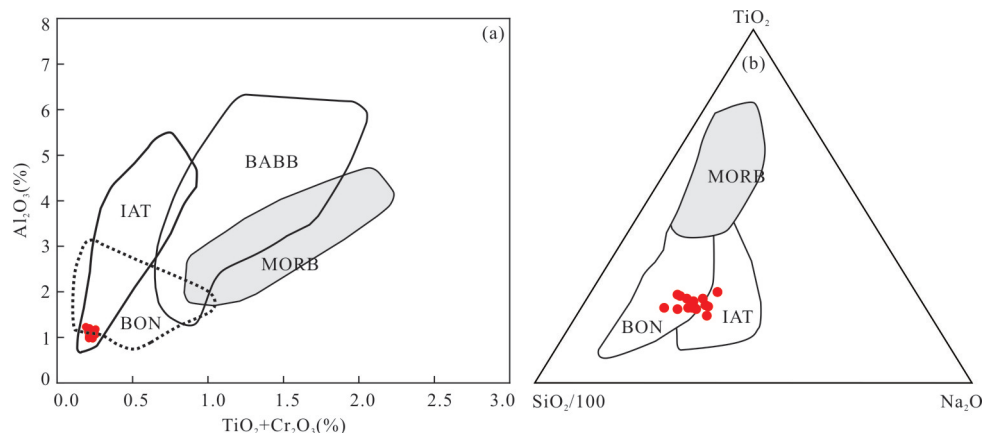


图 11 单斜辉石 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{TiO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (a)、 $\text{TiO}_2-(\text{SiO}_2/100)-\text{Na}_2\text{O}$ (b)

Fig. 11 Plot of $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{TiO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (a) and $\text{TiO}_2-(\text{SiO}_2/100)-\text{Na}_2\text{O}$ (b) for the Clinopyroxene

据 Barth and Gluhak (2009) 和 Moghadam *et al.* (2010). MORB. 洋中脊玄武岩; BON. 玻安岩; BABB. 弧后盆地玄武岩; IAT. 岛弧拉斑玄武岩

微量元素显示出轻重稀土元素分异较强以及富集大离子亲石元素而亏损高场强元素的特征,具有富集 Rb、Th、Pb 和亏损 Nb、Ta、Sr 以及比较明显的 Eu 负异常,显示俯冲消减带之上火山弧岩浆的典型特征 (Pearce and Peate, 1995),并且与 Yang *et al.* (2011) 厘定的北美塘二叠—三叠纪弧岩浆岩成分进行类比,这些暗示着闪长玢岩很可能形成于一个与板块俯冲有关的环境。

玉树辉石闪长玢岩样品中的单斜辉石电子探针数据显示出其具有较低的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量,相对较高的 SiO_2 含量,在 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{TiO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 和 $\text{TiO}_2-(\text{SiO}_2/100)-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中 (图 11),样品的投影点位于玻安岩 (BON) 和岛弧拉斑玄武岩 (IAT) 范围内,进一步表明该辉石闪长玢岩很可能形成洋壳俯冲消减的构造背景中。

尽管认识到玉树南部这些闪长玢岩应该形成在洋壳俯冲消减的环境中,但其形成究竟是与甘孜—理塘洋或者金沙江洋南向俯冲 (刘彬, 2014; Zhao *et al.*, 2015; 刘彬等, 2016; 王键等, 2018) 还是与龙木错—双湖洋的北向俯冲作用 (Yang *et al.*, 2011) 相关呢? 金沙江缝合带 (JS) 通常被认为是古特提斯洋的重要分支,在玉树地区可分为西段 (WJS) 和南段 (SJS) (图 1a)。以前的研究集中在 SJS 的蛇绿岩、火山岩、花岗岩侵入体、地层学和古生物学上,并提出 SJS 的演化涉及晚泥盆世—早石炭世海底扩张和二叠—三叠纪洋盆闭合及随后的大陆碰撞 (Wang *et al.*, 2000, 2008, 2011; Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Metcalfe, 2013)。然而, SJS 与 WJS 是否有联系却引起了热烈的争论。最近对 WJS 蛇绿

岩的年代学研究得出其年龄为 240~232 Ma (段其发等, 2009; 付修根等, 2009; 刘银等, 2010; 张能等, 2012; 辜平阳等, 2013), 明显晚于 SJS 蛇绿岩的年龄 (346~341 Ma; Jian *et al.*, 2009a), 但与甘孜—理塘缝合带内三叠纪镁铁质混杂岩的形成年龄 (234~236 Ma; Liu *et al.*, 2016) 相似。结合区域已有研究资料,可以发现北美塘三叠纪岩浆岩主要集中分布在北美塘的北缘和南缘位置 (图 1)。其中,北美塘南缘岩浆岩的时代集中分布在 223~205 Ma, 其与羌中变质带内高压岩石的折返时代基本一致 (222~203 Ma; Kapp *et al.*, 2000, 2003; 李才等, 2007; 翟庆国等, 2009)。这些岩浆岩在岩石组合上具有双峰式特点,其中,长英质岩石大规模出露并且伴生有少量的玄武质岩,并且这些岩浆岩在北美塘南缘呈线性分布 (刘彬等, 2016; 赵珍等, 2018)。因此北美塘南缘这些岩浆岩的形成更可能与碰撞阶段板片断离作用有关。与北美塘南缘岩浆岩相比,北美塘北缘三叠纪岩浆岩不具备双峰式岩浆岩特征,以大面积出露中性岩和酸性岩为特征 (王剑等, 2007, 2008; Zhao *et al.*, 2015; 刘彬等, 2016; 王键等, 2018), 并且其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显较高。这些特征指示,北美塘北缘和南缘这些三叠纪岩浆作用可能形成于两个不同的构造体制中。值得注意的是,北美塘北缘三叠纪岩浆岩与义敦地体内部弧岩浆岩具有相同的活动峰期 (~215 Ma; 刘彬等, 2016), 并且三叠纪构造变形事件均可与义敦地体对比 (Yang *et al.*, 2012), 暗示着北缘这些三叠纪岩浆岩应该具有与义敦弧岩浆岩类似的成因机制,很可能与甘孜—理塘古特提斯洋盆的向南俯冲有关。因

此,本文更倾向认为玉树南部闪长玢岩的形成应该与甘孜—理塘洋盆的南向俯冲相关,并且洋壳俯冲时间应该至少开始于227 Ma.在这种洋壳俯冲作用下,受到俯冲组分(例如沉积物)改造的富集地幔源区发生部分熔融,进而形成玉树南部这些典型的中性岩类.

5 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示玉树南部闪长玢岩的结晶年龄约为 227 ± 2 Ma (MSWD=0.86).

(2) 玉树闪长玢岩的形成与应该与一个初始受到俯冲组分(例如沉积物熔体)改造的富集地幔的部分熔融有关.

(3) 结合区域上已有的多学科研究资料可以判断,该岩体应该形成于洋壳俯冲的环境中,并且北羌塘地区有关古特提斯洋的俯冲时间至少开始于227 Ma.

致谢:研究工作得到了许志琴院士、杨经绥院士和李海兵研究员的关心与指导;野外地质考察和室内工作得到郭盼、黄坚、张鑫、洛桑塔青和索朗欧珠等的帮助;样品处理与实验测试得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜、胡兆初、郑曙、陈海红和周炼等老师的热情帮助与耐心指导.在此特表感谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early - Middle Archean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 64: 4205—4225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00493-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00493-2)
- Barth, M. G., Gluhak, T. M., 2009. Geochemistry and Tectonic Setting of Mafic Rocks from the Othris Ophiolite, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(1): 23—40. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0318-9>
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602—622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Duan, Q. F., Wang, J. X., Bai, Y. S., et al., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Lithogeochemistry of Gabbro from the Ophiolite in Southern Qinghai Province. *Geology in China*, 36(2): 291—299 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. G., Wang, J., Tan, F. W., et al., 2010. The Late Triassic Rift - Related Volcanic Rocks from Eastern Qiangtang, Northern Tibet (China): Age and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 17(1): 135—144. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.04.010>
- Fu, X. G., Wang, J., Wu, T., et al., 2009. Discovery of the Large - Scale Paleo - Weathering Crust in the Qiangtang Basin, Northern Tibet, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 28(6): 696—700 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892—897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Gu, P. Y., He, S. P., Ji, W. H., et al., 2013. Geochemical Characteristics of Trachyandesite from Dongka Formation, Yushu (Qinghai): Petrogenesis and Its Tectonic Significance. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 1069—1082 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Turner, S. P., McDermott, F., et al., 1997. U - Pb Isotopes in Arc Magmas: Implications for Element Transfer from the Subducted Crust. *Science*, 276(5312): 551—555. <https://doi.org/10.1126/science.276.5312.551>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP - MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27: 1391—1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- 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: 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>
- Kapp, P., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2000. Blueschist-Bearing Metamorphic Core Complexes in the Qiangtang

- Block Reveal Deep Crustal Structure of Northern Tibet. *Geology*, 28(1): 19–22. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<19:bmccit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<19:bmccit>2.0.co;2)
- Kapp, P., Yin, A., Manning, C.E., et al., 2003. Tectonic Evolution of the Early Mesozoic Blueschist-Bearing Qiangtang Metamorphic Belt, Central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 540–566. <https://doi.org/10.1029/2002TC001383>
- Li, C., Zhai, Q.G., Chen, W., 2007. Geochronology Evidence of the Closure of Longmu Co-Shuanghu Suture, Qinghai-Tibet Plateau: Ar-Ar and Zircon SHRIMP Geochronology from Ophiolite and Rhyolite in Guoganjianian. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 911–918 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., 2014. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Permian to Triassic Mafic Rocks in the Yushu Area, Central Qinghai-Tibetan Plateau (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C.Q., Guo, Y.H., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implications of Triassic Mafic Complexes with MORB/OIB Affinities from the Western Garzê-Litang Ophiolitic Mélange, Central Tibetan Plateau. *Lithos*, 260: 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.009>
- Liu, B., Ma, C.Q., Huang, J., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Significance of Triassic Yushu Volcanic Rocks in the North Part of the North Qiangtang Terrane. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Xu, Y., Li, Q., et al., 2020. Origin of Triassic Mafic Magmatism in the North Qiangtang Terrane, Central Tibetan Plateau: Implications for the Development of a Continental back-Arc Basin. *Journal of the Geological Society*, <https://doi.org/10.1144/jgs2019-130>
- Liu, Y., Li, R.S., Ji, W.H., et al., 2010. The Define and Geological Significance of Permian-Triassic Magmatic Arc at Dangjiangrong, South of Duocai Ophiolite Mélange Zone in the Zhiduo Area, Qinhai, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1840–1850 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008a. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y.S., Zong, K.Q., Kelemen, P.B., et al., 2008b. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1): 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Zong, K.Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Metcalf, I., 2013. Gondwana Dispersion and Asian Accretion: Tectonic and Palaeogeographic Evolution of Eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.020>
- Mo, X.X., 2010. A Review and Prospect of Geological Researches on the Qinghai-Tibet Plateau. *Geology in China*, 37(4): 841–853 (in Chinese with English abstract).
- Moghadam, H. S., Stern, R. J., Rahgoshay, M., et al., 2010. The Dehshir Ophiolite (Central Iran): Geochemical Constraints on the Origin and Evolution of the Inner Zagros Ophiolite Belt. *Geological Society of America Bulletin*, B30061–B30066. <https://doi.org/10.1130/B30066.1>
- Morimoto, N., 2007. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55–76. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R.S., et al., 2012. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.12.018>
- Pearce, J. A., Kempton, P. D., Nowell, G. M., et al., 1999. Hf-Nd Element Isotope Perspective on the Nature and Provenance of Mantle and Subduction Components in Western Pacific Arc-Basin Systems. *Journal of Petrology*, 40: 1579–1611. <https://doi.org/10.1093/petroj/40.11.1579>
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–286. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Peng, T. P., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2014. Late Triassic Granitic Magmatism in the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: Geochronology, Petrogenesis

- and Implications for the Tectonic Evolution of the Paleotethys. *Gondwana Research*, 27(4): 1494–1508. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.009>
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46: 921–944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>
- Polat, A., Munker, C., 2004. Hf-Nd Isotope Evidence for Contemporaneous Subduction Processes in the Source of Late Archean Arc Lavas from the Superior Province, Canada. *Chemical Geology*, 213: 403–429. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.016>
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- 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>
- Tao, Y., Bi, X.W., Li, C., et al., 2014. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of the Jitang Granitic Pluton in Eastern Tibet, SW China. *Lithos*, 184: 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.031>
- Tatsumi, Y., 2006. High-Mg Diorite Porphyrite in the Setouchi Volcanic Belt, Southwestern Japan: Analogy to Archean Magmatism and Continental Crust Formation?. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 467–499. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125014>
- Vervoort, J.D., Blichert, T.J., 1999. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks through Time. *Geochimica et Acta*, 63: 533–556. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00274-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00274-9)
- Wang, B., Zhou, M., Li, J., et al., 2011. Late Triassic Porphyritic Intrusions and Associated Volcanic Rocks from the Shangri-La Region, Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic Magmatism and Porphyry Copper Mineralization. *Lithos*, 127(1): 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.028>
- Wang, J., Fu, X.G., Chen, W.X., et al., 2007. The Late Triassic Paleo-Weathering Crust in the Qiangtang Basin, Northern Tibet: Geology, Geochemistry and Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 487–494 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Fu, X.G., Chen, W.X., et al., 2008. Geochronology and Regional Geochemistry of the Volcanic Rocks in the Wuruoshan Area, Northern Qiangtang, China: Implications for Late Triassic Volcanic - Sedimentary Events. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, (1): 33–43 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Sun, F.Y., Jiang, R. F., et al., 2018. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of High-Mg Diorite in Chayong Region, Yushu, Qinghai. *Earth Science*, (3): 733–752 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J., et al., 2008. Triassic Nb-Enriched Basalts, Magnesian Diorite Porphyrite, and Adakites of the Qiangtang Terrane (Central Tibet): Evidence for Metasomatism by Slab-Derived Melts in the Mantle Wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 473–490. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0253-1>
- Wang, X., Metcalfe, I., Jian, P., et al., 2000. The Jinshajiang - Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, Age and Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 675–690. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00039-0)
- 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)
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1994. Dehydration-Melting of Amphibolite at 10 kbar: the Effects of Temperature and Geological Society. *London, Special Publications*, 76: 405–416. <https://doi.org/10.1007/BF00320972>
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, W.C., et al., 2013. Paleo-Tethys System and Accretionary Orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Hou, Z. Q., Wang, Y., et al., 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic Tectonic Evolution of Northeast Tibet: Evidence from the Triassic Composite Western Jinsha-Garzê-Litang Suture. *Tectonics*, 31(4): 1–20. <https://doi.org/10.1029/2011TC003044>
- Yang, T. N., Zhang, H. R., Liu, Y. X., et al., 2011. Permo-Triassic Arc Magmatism in Central Tibet: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopes, Rare Earth Elements, and Bulk Geochemistry. *Chemical Geology*, 284(3): 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.03.006>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan - Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28: 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>

- Zhai, Q., Zhang, R., Jahn, B., et al., 2011. Triassic Eclogites from Central Qiangtang, Northern Tibet, China: Petrology, Geochronology and Metamorphic $P - T$ Path. *Lithos*, 125(1): 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.02.004>
- Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Su, L., et al., 2013. Triassic Arc Magmatism in the Qiangtang Area, Northern Tibet: Zircon U-Pb Ages, Geochemical and Sr - Nd - Hf Isotopic Characteristics, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 162–178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.025>
- Zhai, Q. G., Li, C., Wang, J., et al., 2009. Petrology, Mineralogy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Chronology for Rongma Blueschist from Central Qiangtang, Northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2281–2288 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. Q., Tan, J., Wei, J. H., et al., 2015. Late Triassic Batang Group Arc Volcanic Rocks in the Northeastern Margin of Qiangtang Terrane, Northern Tibet: Partial Melting of Juvenile Crust and Implications for Pale Tethys Ocean Subduction. *International Journal of Earth Sciences*, 104(2): 369–387. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1080-z>
- Zhao, Z., Lu, L., Wu, Z. H., et al., 2018. Characteristics of the Late Triassic Jiangai Granite Mass and the Slab Break-off in Central Qiangtang, Tibet. *Earth Science*, 43(S1): 229–246 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. R., Yang, T. N., Hou, Z. Q., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonics of Late Permian Felsic Volcanic Rocks, Eastern Qiangtang Block, North-Central Tibet: Sr and Nd Isotopic Evidence. *International Geology Review*, 55(8): 1017–1028. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.759669>
- Zhang, N., Li, J., Yang, Y. S., et al., 2012. Petrogeochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Wandao-hu Ophiolite Melange, Jinshajiang Suture, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1291–1304 (in Chinese with English abstract).
- 岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征. 中国地质, 36(2): 291–299.
- 付修根, 王剑, 吴滔, 等, 2009. 藏北羌塘盆地大规模古风化壳的发现及其意义. 地质通报, 28(6): 696–700.
- 辜平阳, 何世平, 计文化, 等, 2013. 青海玉树县南洞卡组粗面安山岩地球化学特征: 岩石成因与构造背景探讨. 地质科学, 48(4): 1069–1082.
- 李才, 翟庆国, 陈文, 等, 2007. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带闭合的年代学证据——来自果干加年山蛇绿岩与流纹岩 Ar-Ar 和 SHRIMP 年龄制约. 岩石学报, 23(5): 911–918.
- 刘彬, 2014. 青藏高原中部玉树二叠纪—三叠纪镁铁质岩石的成因及其地球动力学背景 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 刘彬, 马昌前, 黄坚, 等, 2016. 北羌塘北缘玉树三叠纪火山岩的成因机制及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 35(1): 1–15.
- 刘银, 李荣社, 计文化, 等, 2010. 青海治多地区多彩蛇绿混杂岩带南侧当江荣二叠纪—三叠纪岩浆弧的确定. 地质通报, 29(12): 1840–1850.
- 莫宣学, 2010. 青藏高原地质研究的回顾与展望. 中国地质, 37(4): 841–853.
- 王剑, 付修根, 陈文西, 等, 2007. 藏北北羌塘盆地晚三叠世古风化壳地质地球化学特征及其意义. 沉积学报, 25(4): 487–494.
- 王剑, 付修根, 陈文西, 等, 2008. 北羌塘沃若山地区火山岩年代学及区域地球化学对比——对晚三叠世火山—沉积事件的启示. 中国科学(D辑: 地球科学), (1): 33–43.
- 王键, 孙丰月, 姜和芳, 等, 2018. 青海玉树查涌地区高镁闪长岩年龄、岩石成因及构造背景. 地球科学, 43(3): 733–752.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. 岩石学报, 29(6): 1847–1860.
- 翟庆国, 李才, 王军, 等, 2009. 藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学. 岩石学报, 25(9): 2281–2288.
- 赵珍, 陆露, 吴珍汉, 等, 2018. 羌塘中部晚三叠世江爱岩体特征与板片断离作用. 地球科学, 43(S1): 229–246.
- 张能, 李剑波, 杨云松, 等, 2012. 金沙江缝合带弯岛湖蛇绿混杂岩带的岩石地球化学特征及其构造背景. 岩石学报, 28(4): 1291–1304.

附中文参考文献

段其发, 王建雄, 白云山, 等, 2009. 青海南部蛇绿岩中辉长