

拉萨地体的起源和古生代构造演化

朱弟成¹, 赵志丹¹, 牛耀龄^{2,3}, 王青¹, Yildirim DILEK^{1,4}, 董国臣¹, 莫宣学¹

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK;

3. 兰州大学 地质科学与资源学院, 兰州 730000; 4. 美国迈阿密大学 地质系, Oxford, OH 45056, USA

摘要: 早期由于资料有限,对拉萨地体古生代时期的裂解、漂移、俯冲和碰撞历史的认知程度还很低。本文利用目前已有地质和地球化学资料,分析了拉萨地体的中生代岩石圈结构,探讨了拉萨地体的起源和古生代演化历史。大量长英质岩石的锆石 Hf 同位素和全岩 Nd 同位素表明,南部和北部拉萨地体以新生地壳为主,部分地区可能存在前寒武纪结晶基底,而中部拉萨地体是具有古元古代甚至太古代结晶基底的条带状微陆块。大量古生代沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据表明,拉萨地体约 1170 Ma 的碎屑锆石年龄指标,明显不同于以约 950 Ma 为碎屑锆石年龄指标的安多、羌塘和特提斯喜马拉雅。拉萨地体起源于澳大利亚大陆北缘是目前资料情况下的最合理解释。中部拉萨地体约 492 Ma 的双峰式火山岩形成于活动大陆边缘背景,代表了古地理上位于澳大利亚大陆北缘的岩浆弧的一部分,可能与原特提斯洋岩石圈板片的断离有关。拉萨地体南缘和南羌塘的泥盆纪末期—石炭纪早期片麻状花岗岩类为存在明显幔源物质输入的 S 型花岗岩,可能形成于最终演化为松多特提斯洋的弧后盆地背景。中二叠世末期发生的拉萨地体与澳大利亚大陆北缘的碰撞造山事件可能触发了班公湖—怒江特提斯洋岩石圈的南向俯冲,并随后对拉萨地体的中生代构造岩浆演化发挥关键性作用。

关键词: 泥盆纪弧后盆地; 古生代岩浆弧; 拉萨—澳大利亚联系; 岩石圈结构; 拉萨地体; 西藏高原

中图分类号: P541

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2012)0001-15

Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane

ZHU Dicheng¹, ZHAO Zhidan¹, NIU Yaoling^{2,3}, WANG Qing¹,
Yildirim DILEK^{1,4}, DONG Guochen¹, MO Xuanxue¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK;

3. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

4. Department of Geology, Miami University, Oxford, OH 45056, USA

Abstract: The history of breakup, drift, subduction, and collision of the Lhasa Terrane during the Paleozoic remains poorly understood because of the scarcity of data. This paper reviews the Mesozoic lithospheric architecture and explores the origin and Paleozoic evolution of the Lhasa Terrane on the basis of geological and geochemical data currently available. Abundant zircon Hf isotope and whole-rock Nd isotope data of silicic rocks indicate that the southern and northern Lhasa subterrane are

收稿日期: 2011-11-04; 修回日期: 2012-01-04

基金项目: 教育部新世纪优秀人才项目 (NCET-10-0711); 国家973项目 (2011CB403102, 2009CB421002); 国家自然科学基金面上基金项目 (40973062; 40973026); 国家自然科学基金重点基金项目 (40830317) 和中国地质调查局工作项目 (1212011121260; 1212011121066) 联合资助

作者简介: 朱弟成, 1972年生, 男, 博士, 教授, 主要从事岩浆作用与特提斯演化研究; E-mail: dchengzhu@163.com

dominated by juvenile crust with possible Precambrian crystalline basement locally preserved, while the central Lhasa subterrane is a microcontinental ribbon with ancient basement rocks as old as Archean. Over 3000 U–Pb ages of detrital zircons from Late Neoproterozoic–Paleozoic strata define an age peak of ca. 1170 Ma for the Lhasa Terrane and identical age peaks of ca. 950 Ma for the Amdo, Southern Qiangtang, and Tethyan Himalaya. Thus the most plausible explanation for the origin of the Lhasa Terrane is that it came from the northern Australia. The ca. 492 Ma bimodal metavolcanic rocks identified in the central Lhasa subterrane were likely developed in an active continental margin representing a part of a magmatic arc paleogeographically located in the northern Australian continent and may be a result of slab break-off of the subducting proto-Tethyan oceanic lithosphere. The Late Devonian to Early Carboniferous gneissic granitoids in both the southern margin of the Lhasa Terrane and Southern Qiangtang are S-type granitoids with significant contributions from mantle-derived materials. These rocks may have been emplaced in a back-arc setting that ultimately evolved to what is known as the Songdo Tethyan Ocean. The Lhasa-northern Australia collision at the end of the Middle Permian may have triggered the southward subduction of the Bangong-Nujiang oceanic lithosphere, imposing a critical role on the subsequent tectonomagmatic evolution of the Lhasa Terrane during the Mesozoic.

Key words: Devonian back-arc basin; Paleozoic magmatic arc; Lhasa–Australian connection; lithospheric architecture; Lhasa Terrane; Tibetan Plateau

First author: Zhu Dicheng, Professor; E-mail:dchengzhu@163.com

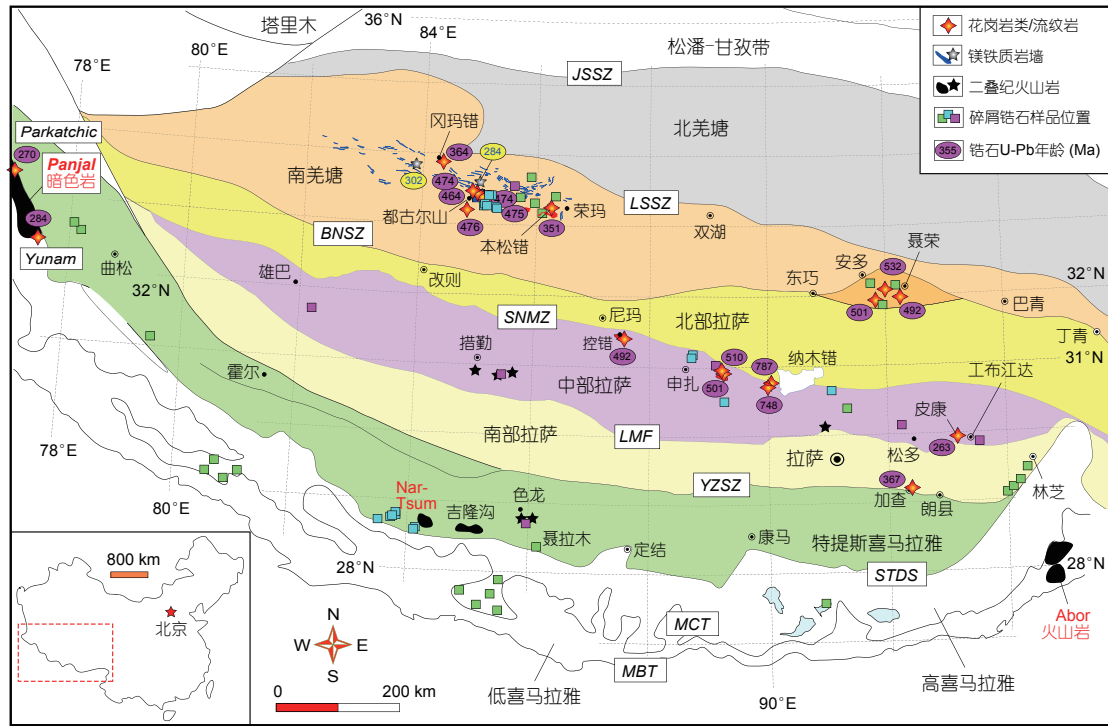
西藏高原是地球上最大最高的高原，这里不但是探索陆–陆碰撞带大陆动力学过程和机制的天然实验室（Allègre et al., 1984; Yin and Harrison, 2000; 许志琴等, 2011; Xu et al., 2012），而且还是检验大陆漂移和板块构造理论的理想地区之一。这是因为构成西藏高原主体的羌塘和拉萨地体，均来源于冈瓦纳大陆北缘，其演化历史涉及到微陆块裂离、漂移和最后拼贴到亚洲大陆南缘等一系列板块构造过程（Audley-Charles, 1983, 1984, 1988; Sengör, 1987; Sengör et al., 1988, 1993; Yin and Harrison, 2000; Metcalfe; Zhu et al., 2011a）。随着越来越多资料的积累，目前对西藏高原南部拉萨地体中生代时期的板块构造过程已日趋清晰（莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; Ji et al., 2009; Zhu et al., 2011a），但对其古生代时期的裂解和漂移过程，目前的认知程度仍然很低。另外，自从拉萨地体发现了松多二叠纪榴辉岩（Li et al., 2009; Yang et al., 2009）、相关超镁铁质岩（Chen et al., 2009）和识别出拉萨地体与周边地区二叠纪岩浆岩构造背景的差异进而推论拉萨地体的古地理位置以来（朱弟成等, 2009a; Zhu et al., 2009a），拉萨地体的起源和古地理位置已经引起了广泛关注（Gehrels et al., 2011; Guynn et al., 2012; Zhu et al., 2011b;

朱弟成等, 2011; 张泽明等, 2011^①）。本文的主要目的是，利用目前已有资料，刻画拉萨地体的中生代岩石圈结构，分析和讨论拉萨地体的起源和古生代演化历史。

1 拉萨地体的中生代岩石圈结构

位于班公湖–怒江缝合带（BNSZ）和印度河–雅鲁藏布缝合带（YZSZ）之间的拉萨地体，以狮泉河–纳木错蛇绿混杂岩带（SNMZ）和洛巴堆–米拉山断裂带（LMF）为界，由北向南可将其分为北部、中部和南部三部分（图1; Zhu et al., 2012a, 及该文参考文献）。一般认为，南部拉萨地体以新生地壳为特征，因为这里大多数中新生代岩浆岩均显示正的全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和正的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值，指示它们或来源于新生地壳和/或新特提斯洋壳的部分熔融，或与镁铁质岩浆与长英质岩浆的混合有关（Chu et al., 2006, 2011; Mo et al., 2007, 2008a; 李皓扬等, 2007; 张宏飞等, 2007; Zhu et al., 2008, 2009b; Ji et al., 2009; Lee et al., 2009; 管琪等, 2010）。新的中生代–新生代早期岩浆岩的大量锆石 Hf 同位素数据表明（图2; Zhu et al., 2011a），南部拉萨地体东西两端以变化范围大的、中部地区以变化范围小的锆石 Hf 同位素地壳模式年龄（ t_{DM}^{C} ）为特征（即：西

① 张泽明, 董昕, 刘峰, 等. 2011. 拉萨地体起源于东非造山带: 新元古代高压变质基底的岩石与年代学. 2011年岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, p. 378.



JSSZ, 金沙江缝合带; LSSZ, 龙木错—双湖缝合带; BNSZ, 班公湖—怒江缝合带; YZSZ, 印度河—雅鲁藏布缝合带; SNMZ, 狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带; LMF, 洛巴堆—米拉山断裂带; STDS, 藏南拆离系。

(该图在Zhu等(2011b, 2012a)基础上, 增加了Gehrels等(2011)新报道的古生代岩浆岩和碎屑锆石样品位置)

图1 西藏高原大地构造单元划分图及古生代岩浆岩出露位置

Fig. 1 Tectonic framework of the Tibetan Plateau showing the localities of Paleozoic magmatic rocks (modified after Zhu et al., 2012a)

部霍尔= 0.4~1.4 Ga; 中西部萨嘎=0.8~1.3 Ga; 中东部日喀则=0.1~0.8 Ga; 东部朗县=0.1~1.6 Ga)。这种差异既可能与岩浆岩的出露位置(东西两端更靠近中部拉萨地体的古老基底, 岩浆中很可能不同程度地混入了这种古老基底物质)有关, 也可能与南部拉萨地体局部地区存在前寒武纪结晶基底有关。Dong等(2010)在南部拉萨地体东部林芝岩群中发现的寒武纪花岗岩(约496 Ma), 提供了南部拉萨地体东部地区可能存在前寒武纪结晶基底的重要线索。

在中部拉萨地体, 在纳木错西岸发现的新元古代奥长花岗岩(约787 Ma)和侵位于其中的花岗质糜棱岩(约748 Ma)(Hu et al., 2005)以及新元古代变质作用(约720 Ma, 张泽明等, 2010; 约690 Ma, Dong et al., 2011), 确认中部拉萨地体存在新元古代结晶基底。在中部拉萨地体最西部雄巴→中西部措勤→中东部罗扎—申扎→东部门巴(Zhu et al., 2009b, 2011a)甚至到更东部的然乌、察隅等地(Chiu et al., 2009; 朱弟成等, 2009b), 中生代花岗岩类的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

值均为负, 并以古老的锆石Hf同位素地壳模式年龄($t_{\text{DM}}^{\text{c}}=1.1 \sim 2.5 \text{ Ga}$)为特征(图2); 同时, 在措勤、罗扎、申扎、当雄、门巴和察隅等地报道的花岗岩类, 也显示负的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(Chu et al., 2006; 刘琦胜等, 2006; 张宏飞等, 2007; 朱弟成等, 2009b; Zhu et al., 2009b)。这些数据表明, 东西延伸达2000 km的中部拉萨地体, 以再循环或成熟地壳为主。考虑到一些代表岩浆侵位年龄的锆石显示非常负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(达-22.0)并具有太古代地壳模式年龄(Zhu et al., 2011a), 中部拉萨地体很可能存在古元古代甚至太古代结晶基底, 代表了一个条带状的微陆块(continental ribbon)(Zhu et al., 2009b, 2011a)。

北部拉萨地体的情况比较复杂。在西部地区, 日土南部花岗岩类(约80 Ma)的Nd同位素二阶段模式年龄为0.7~0.9 Ga(Zhao et al., 2008), 指示其来源于新生地壳的重熔。在日土以东巨大的盐湖岩基(面积约1260 km²; 约110 Ma)、盐湖流纹岩(约109 Ma)和花岗闪长玢岩(约110 Ma)→尼玛英安岩(约112 Ma)→色林错英安岩

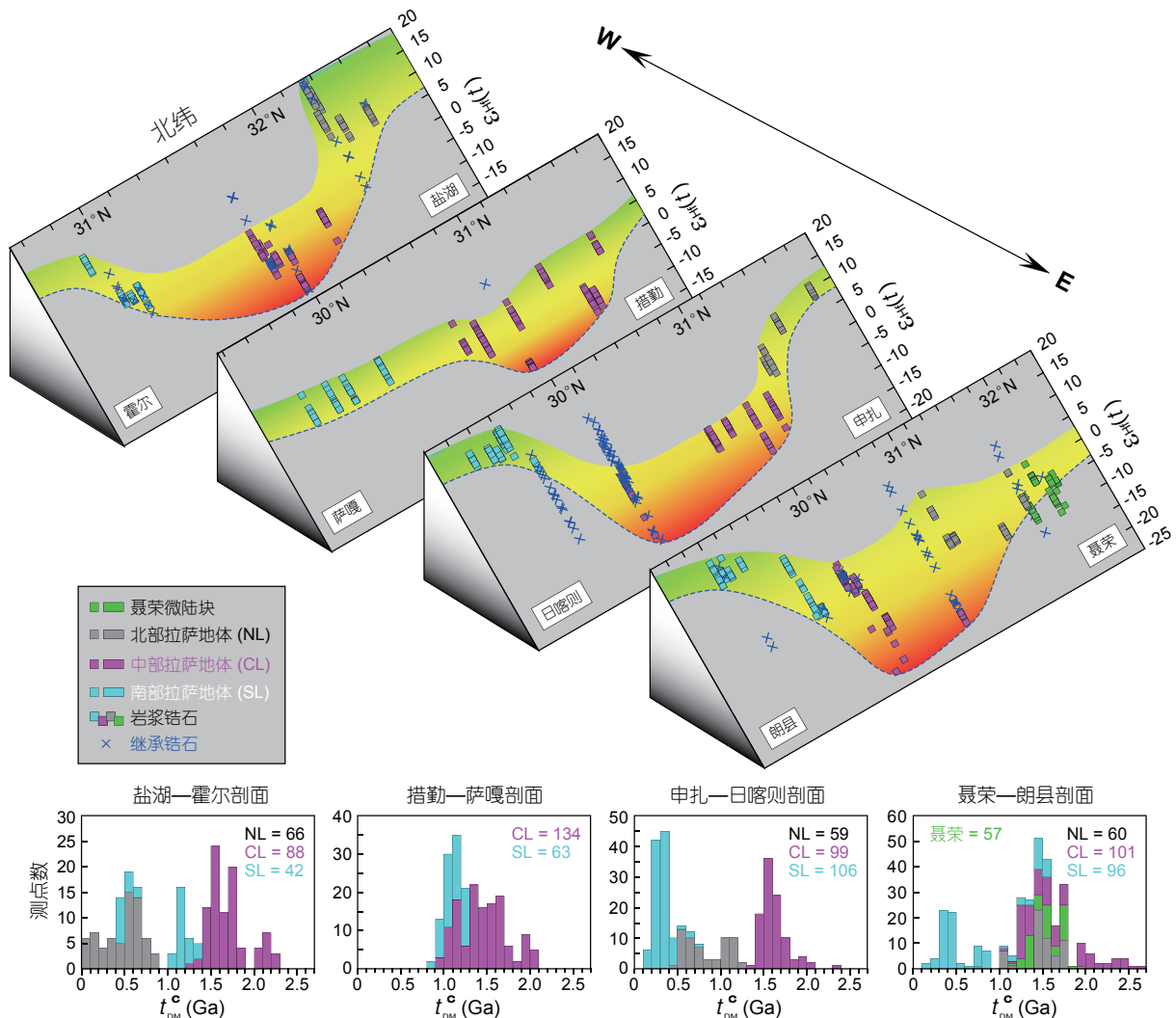


图2 拉萨地体中生代—新生代早期岩浆岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的范围、空间分布和锆石Hf同位素地壳模式年龄直方图
 Fig. 2 The range and spatial distribution of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, and the histogram of Hf “crustal” model ages (t_{DM}^{c}) of zircons from the Mesozoic–early Cenozoic magmatic rocks in the Lhasa Terrane (after Zhu et al., 2011a)

和流纹岩（约115 Ma），均以正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为特征（图2；Zhu et al., 2011a），表明这些地区与西部日土地区一样，均属新生地壳。在东部巨大的班戈岩基（面积约1340 km²）中，岩浆活动分（132 ± 2）Ma，（121 ± 3）Ma和（113 ± 3）Ma三期，其中（132 ± 2）Ma的岩浆活动以正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值（+2.3~+11.0）和较低的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ （5.81‰~7.16‰）为特征（笔者未刊数据），这同样表明班戈岩基来源于新生地壳。在班戈及其以东的北部拉萨地体，（113 ± 3）Ma岩浆活动显示变化范围大的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值（-6.0~+5.0）（笔者未刊数据），这可能与混入邻近的中部拉萨地体的古老基底物质 ± 俯冲的羌塘大陆地壳物质 ± 安多微陆块的古老基底物质有关。

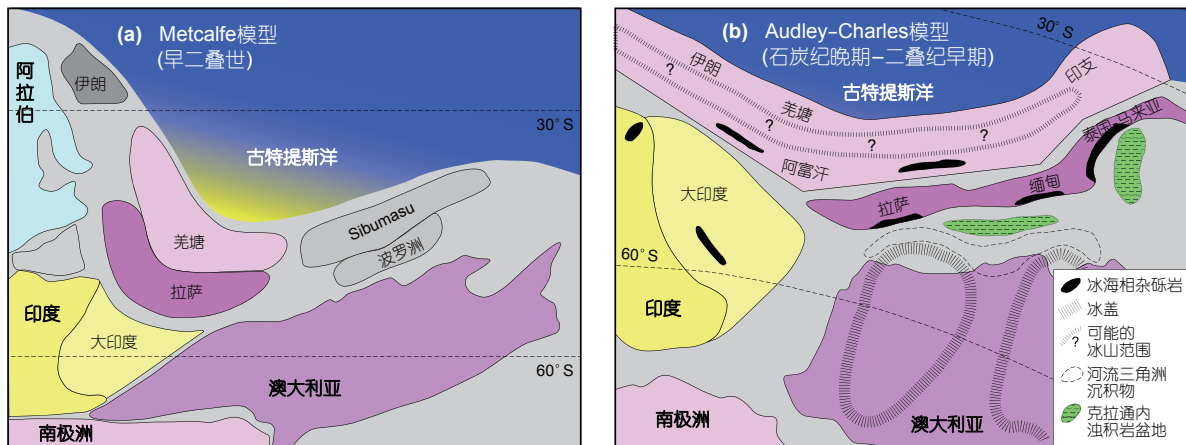
实际上，由于幔源和壳源岩浆之间的混合作用是不可避免的，对南部和北部拉萨地体新生地壳来源的岩浆，其正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值很可能被低估了，它们应该更正并具有更年轻的地壳模式年龄；而对中部拉萨地体来源于再循环地壳的岩浆，其负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值很可能被高估了，它们应该更负并具有更古老的锆石Hf同位素地壳模式年龄（Zhu et al., 2009b, 2011a）。因此，基于大量岩浆岩锆石Hf同位素和部分全岩Nd同位素，可将拉萨地体的中生代岩石圈结构特征表述为：南部和北部拉萨地体以新生地壳为主，部分地区可能存在前寒武纪结晶基底，而中部拉萨地体是具有古元古代甚至太古代结晶基底的条带状微陆块。

2 拉萨地体的起源

对拉萨地体的起源，早期主要存在两种截然不同的解释：①在石炭—二叠纪以前，伊朗、羌塘、拉萨和Sibumasu位于冈瓦纳大陆北缘，羌塘→拉萨→大印度→喜马拉雅构成了古特提斯的南部被动大陆边缘（图3a），随后在石炭—二叠纪和中生代不同时期，羌塘、拉萨地体依次从印度冈瓦纳裂离出来，分别形成以班公湖—怒江蛇绿混杂岩带为代表的中特提斯和以雅鲁藏布蛇绿混杂岩带为代表的新特提斯（Allègre et al., 1984; Sengör et al., 1988, 1993, 2009; Yin and Harrison, 2000; Stampfli and Borel, 2002; Metcalfe, 2009; 李才等, 2009）；②在石炭—二叠纪以前，拉萨—缅甸—泰国—马来亚也位于冈瓦纳大陆北缘，但它们却和澳大利亚一起，构成了古特提斯的南部被动大陆边缘（图3b），随后在石炭—二叠纪或中生代从澳大利亚冈瓦纳裂离出来，形成以雅鲁藏布蛇绿混杂岩带为代表的新特提斯（Audley-Charles, 1983, 1984, 1988）。第一种解释实际上认为拉萨地体起源于印度冈瓦纳，代表了地学界的主流观点；而第二种解释实际上赞成拉萨地体起源于澳大利亚冈瓦纳，这虽然早在1983年就发表于Nature杂志，但长期以来并未得到地学界的足够关注（如其仅被引用了57次，远低于第一种解释的同时代Nature论文的479次）。这两种解释采用的证据是相同的，都包括石炭—二叠纪冰海相杂砾岩、关键陆生植物群、

热带和亚热带海相动物群的分布、沉积相和岩浆岩以及古地磁资料等。这两种不同解释意味着，这些已有证据是多解的，提供的古地理约束不是决定性的。Ferrari等（2008）也赞成拉萨地体可能起源于澳大利亚大陆，但却没有提供任何证据。最近对拉萨地体二叠纪岩浆岩和同期榴辉岩研究后发现，早中二叠世时，拉萨地体很可能处于一种大陆弧背景（潘桂棠等, 2006; Geng et al., 2009; Yang et al., 2009; 朱弟成等, 2009a; Zhu et al., 2010）而不是如第一种解释中认为的伸展背景，并且在中二叠世末期拉萨地体可能还与澳大利亚发生了碰撞造山事件（Zhu et al., 2009a）。这种推测实际上暗示拉萨地体具有澳大利亚大陆亲缘性，但却没有直接证据。

为追踪拉萨地体的起源，笔者对拉萨地体、南羌塘和特提斯喜马拉雅带的奥陶纪—二叠纪变沉积岩进行了碎屑锆石物源区研究。结合文献中发表的大量数据，发现拉萨地体独特的约1170 Ma锆石年龄峰值明显不同于南羌塘和特提斯喜马拉雅特有的约950 Ma年龄峰值（Zhu et al., 2011b）。拉萨地体中生代强过铝质花岗岩中的继承锆石，也显示了近似的约1181 Ma的年龄峰值（朱弟成等, 2011）。这种分布特征与澳大利亚西部Perth盆地二叠纪砂岩（Sircombe and Freeman, 1999; Cawood and Nemchin, 2000）和澳大利亚北部Canning盆地下奥陶统Carranya组Acacia砂岩（Haines and Wingate, 2007）的碎屑锆石年龄特征类似。从已有大量的来自不同地区



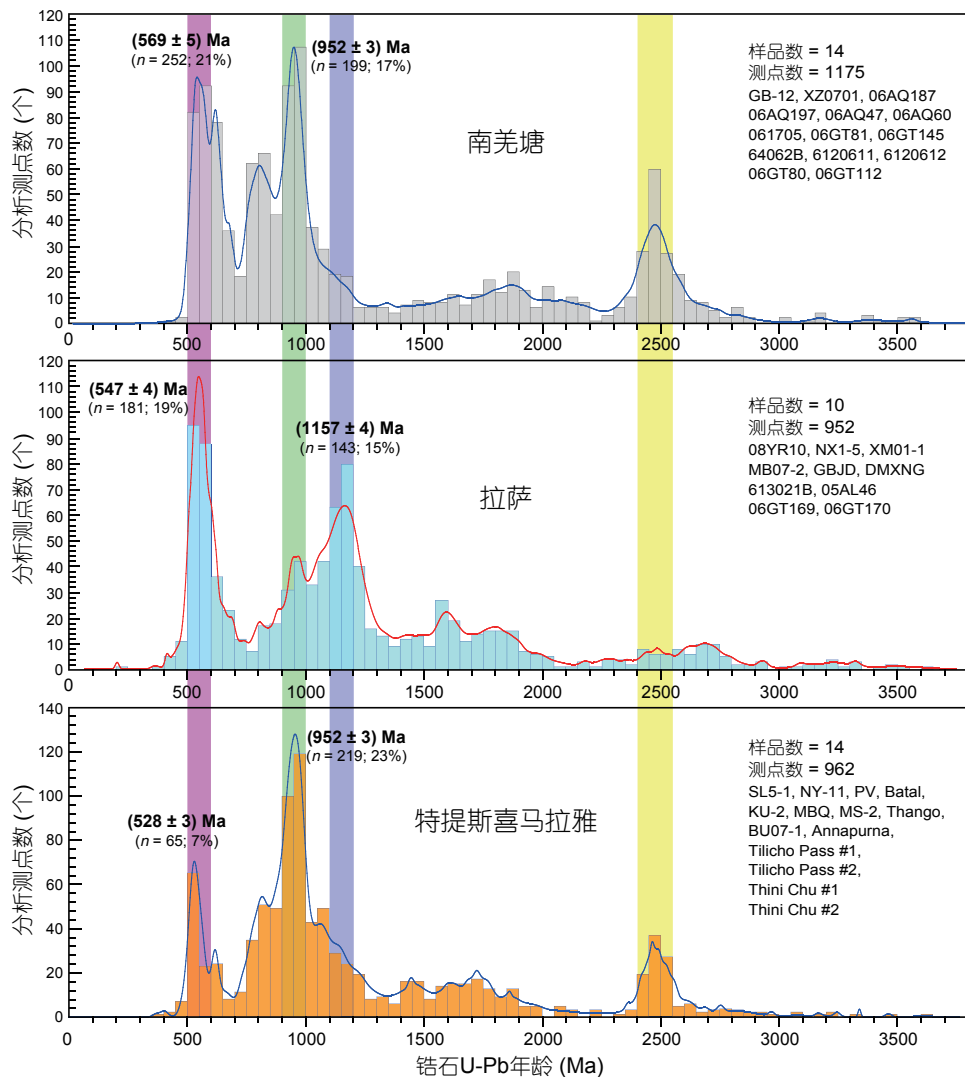
a, 拉萨地块最初来源于印度大陆北缘 (Metcalfe, 2009); b, 拉萨地块最初来源于澳大利亚大陆北缘 (Audley-Charles, 1983, 1984, 1988)

图3 拉萨地块起源的两种不同观点

Fig. 3 Contrasting views pertaining to the origin of the Lhasa Terrane

样品的碎屑锆石U-Pb年龄数据看,最突出的特征是拉萨地体与南羌塘—特提斯喜马拉雅的差异性(图4)和拉萨地体与澳大利亚西部—北部的相似性(朱弟成等,2011;Zhu et al.,2011b)。因此,任何关于西藏南部拉萨地体和南羌塘的古地理重建模型,都必须考虑到这种差异性和相似性。羌塘、特提斯喜马拉雅大量约950 Ma年龄群的碎屑锆石,很可能来源于高喜马拉雅甚至广泛出露990~900 Ma花岗岩类的印度Eastern Ghats和南极洲Rayner地区(Yoshida and Upreti,2006;Myrow et al.,2010;Zhu et al.,2011b,2012a),而拉萨地体特有的大量约1170 Ma的碎屑锆石和继

承锆石,其最可能的物源区是含大量约1170 Ma岩浆岩的澳大利亚西南部Albany-Fraser造山带和东南极Wilkes等地(Zhu et al.,2011b,2012a;朱弟成等,2011)。已有研究表明,新元古代晚期东冈瓦纳的聚合导致澳大利亚西部的Yilgarn克拉通很好地发育了北西流向的水系(Veevers et al.,2005)。在这种情况下,位于Yilgarn克拉通以南的Albany-Fraser造山带和东南极的Wilkes造山带将为澳大利亚大陆北缘提供丰富的碎屑沉积物。如果拉萨地体那时位于澳大利亚大陆北缘,就能够很好地解释拉萨地体所特有的大量约1170 Ma碎屑锆石年龄峰。结合拉萨地体和澳大利亚西部二叠



图中不考虑谱和度大于10%的测点;对大于1000 Ma的锆石,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,对小于1000 Ma的锆石,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

数据来源见Zhu等(2011b)和Gehrels等(2011)

图4 南羌塘、拉萨和特提斯喜马拉雅新元古代晚期—古生代沉积碎屑锆石U-Pb年龄频率图

Fig. 4 Age distribution of detrital zircons from the late Neoproterozoic–Paleozoic strata in the Southern Qiangtang, Lhasa, and Tethyan Himalaya

纪砂岩所具有的相似碎屑锆石Hf同位素组成 (Zhu et al., 2011b) 以及拉萨地体和澳大利亚北部同时发生的约720 Ma变质事件 (Bagas, 2004; 张泽明等, 2010), 暗示拉萨地体起源于澳大利亚大陆北缘, 而不是流行观点认为的印度大陆北缘。

Gehrels等 (2011) 报道了大量青藏高原前新生代沉积岩的碎屑锆石年代学数据。这些作者根据拉萨地体和特提斯喜马拉雅古生代沉积岩中均含有大量冈瓦纳来源的碎屑锆石 (500~1200 Ma), 认为拉萨地体起源于印度大陆北缘。但实际上, 印度大陆并非这些碎屑锆石的唯一候选源区, 澳大利亚西部和北部沉积盆地的古生代沉积岩中也普遍含有这个年龄范围的碎屑锆石 (Sircombe and Freeman, 1999; Cawood and Nemchin, 2000; Haines and Wingate, 2007)。综合分析Gehrels等 (2011) 报道的新元古代和古生代沉积岩样品数据和目前已有的其它同期样品的数据 (图4) 表明, 除了共有的泛非期碎屑锆石外, 拉萨地体约1157 Ma的碎屑锆石年龄峰值最为突出, 这明显不同于南羌塘和特提斯喜马拉雅约950 Ma的碎屑锆石年龄峰值。这种差异与笔者最近的发现是完全一致的 (Zhu et al., 2011b)。随后, Guynn等 (2012) 也注意到了这种差异, 并通过与特提斯喜马拉雅碎屑锆石特征的类比, 将以1000~900 Ma峰值为特征的羌塘和安多置于特提斯喜马拉雅西部地区的外侧, 将以1200~1000 Ma年龄群为特征的拉萨地体 (数据主要来自南部拉萨地体东部的林芝岩群; Dong et al., 2010) 置于特提斯喜马拉雅中部地区的外侧。但笔者注意到, Guynn等 (2012) 发现的特提斯喜马拉雅西部和中部地区碎屑锆石年龄频谱存在的差异 (峰值分别为约950 Ma和约1050 Ma) 可能仅仅是一种假象, 因为这些作者引用的特提斯喜马拉雅中部地区显示约1050 Ma峰值年龄, 来源于以800 Ma (而不是以1000 Ma) 作为划分标准来确定究竟是采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (对老锆石) 还是 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (对年轻锆石) (Gehrels et al., 2003)。如果采用同样的1000 Ma标准进行划分, 特提斯喜马拉雅中部地区最突出的碎屑锆石年龄群仍然为1.0~0.9 Ga (峰值约960 Ma) (朱弟成等, 2011; Zhu et al., 2012a)。实际上, 从已有数据 (Zhu et al.,

2011b) 和Wang等 (2011) 在康马地区新获得的数据看, 特提斯喜马拉雅西部和中部地区的碎屑锆石年龄频谱是类似的, 峰值均为约950 Ma。因此, 笔者认为, 基于碎屑锆石年龄频谱的高度相似性 (图4), 安多和南羌塘应位于特提斯喜马拉雅的外侧。

大量研究表明, 西冈瓦纳和东冈瓦纳的碎屑锆石年龄频谱是明显不一样的, 前者的寒武纪岩石中含大量700~550 Ma的碎屑锆石, 而后者古生代岩石中这个年龄区间的碎屑锆石不是主要的 (Guynn et al., 2012)。因此, 拉萨地体很少或弱的约950 Ma碎屑锆石, 暗示只有少量碎屑物质来源于和南羌塘、安多和特提斯喜马拉雅类似的物源区; 相反, 拉萨地体大规模出露的石炭—二叠纪变沉积岩以独特的约1170 Ma碎屑锆石年龄群为特征的现象, 指示大量碎屑物质应该来源于澳大利亚大陆和东南极。基于上述分析, 笔者认为, 拉萨地体起源于澳大利亚大陆北缘是目前资料情况下的最合理解释。

3 拉萨地体的古生代岩浆作用

3.1 寒武—奥陶纪岩浆作用

计文化等 (2009) 最早在中部拉萨地体北缘的申扎东侧发现了约501 Ma寒武纪变质火山岩, 这些火山岩被奥陶纪底砾岩角度不整合覆盖 (李才等, 2010)。大致在同一位置 (图1), Gehrels等 (2011) 发现了寒武纪斑状细粒花岗岩, 其锆石U-Pb年龄为 (510.4 ± 6.5) Ma。有意思的是, Gehrels等 (2011) 还发现, 直接位于奥陶纪底砾岩之上的砂岩, 其碎屑锆石峰值年龄集中在511 Ma, 这表明它们来源于下伏寒武纪花岗岩和火山岩的剥露。最近, 笔者在中部拉萨地体北缘的控错地区 (图1), 根据计文化等 (2009) 的信息, 也发现了略早于寒武—奥陶纪角度不整合的寒武纪末期变质酸性火山岩 (锆石U-Pb年龄为493~491 Ma) 和变玄武岩 (锆石U-Pb年龄约492 Ma) (Zhu et al., 2012b), 其中的变质酸性火山岩还含有大量约537 Ma的继承锆石。由于野外和室内均未发现安山质岩石, 因此控错地区的变质火山岩很可能构成了一套寒武纪末期的双峰式火山岩套。区域上, 在中部拉萨地体发生寒武纪岩

浆活动(537~492 Ma)的同时,在南部拉萨地体(约496 Ma; Dong et al., 2010)、特提斯喜马拉雅(530~470 Ma; Cawood et al., 2007; Quigley et al., 2008)和安多(530~470 Ma; Guynn et al., 2012)等地,也发生了基本同期的岩浆活动。在南羌塘都古尔山(图1),目前也发现了与这些早古生代末期岩浆活动同期的花岗岩类(476~471 Ma; Pullen et al., 2011)。

除了控错火山岩外,其它地区火山岩均未报道相关的地球化学数据。控错变玄武岩主要为高钾钙碱性、富集Th, U和轻稀土元素,亏损Nb, Ta, Ti, Zr和Hf等高场强元素,以负的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-4.7~-3.5)和变化的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ (-0.7~+7.5)值为特征,可能来源于受到流体和沉积物熔体改造的岩石圈地幔物质的部分熔融(Zhu et al., 2012b)。变质酸性火山岩具有较低的高场强元素丰度(如:Nb=10.6×10⁻⁶~21.2×10⁻⁶; Zr=175×10⁻⁶~362×10⁻⁶)和低的10 000×Ga/Al比值(1.41~2.49),全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-8.4~-7.2)和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-13.9~-4.6)明显不同于同期的变玄武岩,可能来源于中部拉萨地体古老基底物质的重熔并伴随着少量幔源物质的注入(Zhu et al., 2012b)。多种构造环境判别图指示变玄武岩具有火山弧玄武岩的亲缘性(Zhu et al., 2012b),变质酸性火山岩的Th/Ta比值为13.2~17.9,类似于活动大陆边缘的长英质岩石(Gorton and Schandl, 2000)。结合变质火山岩地层中的石英岩发育的浅水沉积标志(如粒序层理和斜层理)(计文化等, 2009),表明这套寒武纪末期的双峰式火山岩很可能形成于活动大陆边缘,而不是大陆裂谷、板内和弧后盆地等环境(Zhu et al., 2012b)。

3.2 泥盆纪末期—石炭纪早期岩浆作用

最近,董昕等(2010)在南部拉萨地体南缘加查地区发现了泥盆纪花岗岩(图1)。加查泥盆纪花岗岩类由似斑状(斑晶为钾长石)片麻状花岗岩组成,其中见少量闪长质包体。锆石U-Pb定年结果表明,这些寄主花岗岩大约侵位于367 Ma(董昕等, 2010)。与Dai等(2011)在仲巴微陆

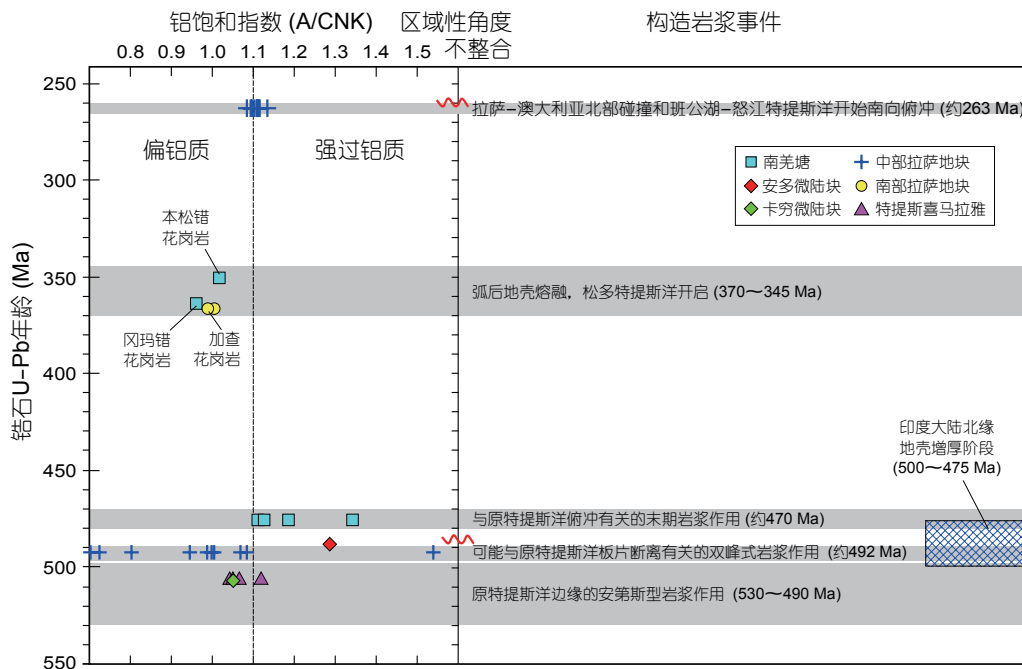
块南部的雅鲁藏布缝合带内发现的OIB型辉长岩(锆石U-Pb年龄约363 Ma)同期,略早于罗布莎蛇绿岩中层状辉长岩的斜长石和单斜辉石的Ar-Ar年龄(353~352 Ma; Mo et al., 2008b)。在南羌塘冈玛错(约364 Ma; Pullen et al., 2011)和本松错(约351 Ma; 李才等, 2006^①),目前也报道有同期岩浆活动记录(图1)。

非常有限的地球化学数据表明(董昕等, 2010),加查泥盆纪花岗岩的铝饱和指数(A/CNK)为0.96~1.00,刚玉分子数为0.00%~0.23%,和南羌塘冈玛错同期花岗岩类似(Zhu et al., 2012a),均属于钙碱性偏铝质花岗岩(图5)。这套花岗岩的锆石微量元素以低的Th/Pb比值(0.4~6.0)和显著的负Eu异常($\delta Eu = 0.02 \sim 0.16$)为特征(董昕等, 2010),非常类似于S型花岗岩的锆石微量元素组成(Wang et al., 2012)。因此,尽管目前尚未报道有同位素数据,但笔者推测这些花岗岩很可能来源于南部拉萨地体东部地区古老基底物质的重熔,其偏铝质特征可能与幔源物质的混入有关(Collins and Richards, 2008; 朱弟成等, 2009b; Zhu et al., 2009b, 2011a)。

3.3 石炭—二叠纪岩浆作用

王立全等(2008)和Zhu等(2010)先后系统总结了中部拉萨地体存在晚石炭世—中二叠世火山岩的古生物学和地层学证据。这些赋存于上石炭统一中二叠统地层中的火山岩,主要由玄武岩组成,也包括次要的安山岩、英安岩和流纹岩。其中的玄武岩以高的Al₂O₃含量和显著的负Nb-Ta和Ti异常为特征,地球化学特征与形成于俯冲带背景下的高铝玄武岩类似(Zhu et al., 2010)。除这些火山岩外,在中部拉萨地体东部皮康村还发现了二叠纪花岗岩(Zhu et al., 2009a)。皮康花岗岩以高的铝饱和指数(A/CNK=1.08~1.14)、高的刚玉分子数(1.3%~2.0%)、负的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-6.4~-6.0)和多数为负的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-4.5~+1.9)为特征,表明其属于过铝质S型花岗岩(图5),很可能来源于中部拉萨地体古老基底物质的重熔,并混入有一定数量的幔源物质(Zhu et al., 2009a)。非常重要的一点是,这些二叠纪S型花

① 李才,程立人,于介江,等. 2006.1: 25万中华人民共和国区域地质调查报告玛依岗日幅. 吉林大学地质调查研究院: 8-68.



A/CNK=摩尔 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ 。全岩地球化学数据来源: 牟世勇等(2005^①), 李才等(2006^②, 2008a), Zhu等(2009a, 2012b), 董昕等(2010), 解超明等(2010)。图中印度大陆北缘地壳增厚时间据Cawood等(2007)

图5 南羌塘、拉萨和特提斯喜马拉雅古生代构造岩浆事件

Fig. 5 Tectonomagmatic events of the Southern Qiangtang, Lhasa, and Tethyan Himalaya (modified after Zhu et al., 2012a)

岗岩的侵位时代(约263 Ma; Zhu et al., 2009a)与其西侧约80 km松多榴辉岩的高压变质作用时代(约262 Ma; Li et al., 2009; Yang et al., 2009)和在中部拉萨地体记录到的中上二叠统之间的角度不整合(Zhu et al., 2009a; 朱弟成等, 2009a)同期。因此, 晚石炭世—中二叠世时, 中部拉萨地体很可能处于一种从俯冲到碰撞的构造背景(Yang et al., 2009; Zhu et al., 2009a, 2010), 而不是如同期羌塘、特提斯喜马拉雅那样的伸展背景(Gehrels et al., 2011)。

4 拉萨地体的古生代构造演化

印度大陆北缘的早古生代岩浆作用常被解释为泛非造山事件的产物。但越来越多的研究表明, 这种解释可能是有问题的, 因为: ①泛非运动主要发生在冈瓦纳大陆内部不同陆块之间, 而不是冈瓦纳大陆边缘(Cawood and Buchan, 2007; Cawood et al., 2007); ②东冈瓦纳的最后聚合发生在570~510 Ma之间(Meert, 2003; Cawood

and Buchan, 2007), 早于印度大陆北缘多数早古生代岩浆作用发生的时间。Cawood and Buchan (2007)注意到沿冈瓦纳原太平洋边缘(proto-Pacific margin)俯冲作用的开始时间(580~550 Ma)和冈瓦纳大陆内部泛非造山事件的结束时间一致。由此这些作者提出, 在地球半径不变的情况下, 冈瓦纳大陆内部俯冲作用的结束(570~510 Ma)必定触发冈瓦纳大陆边缘形成新的俯冲带。基于这种全球尺度的地球动力学观点和相关岩浆作用(530~470 Ma)、变质作用和变形作用(500~475 Ma; 图5)以及地层学证据, Cawood等(2007)认为, 印度大陆北缘古生代早期的岩浆作用和变质作用可能与原特提斯大洋(proto-Tethyan Ocean)岩石圈向印度大陆之下的俯冲有关或以拉萨、羌塘地体为代表的微陆块碰撞增生事件有关, 是俯冲型造山作用的产物(即图6中的印度北部造山带)。这一观点已逐渐得到一些国内学者的赞同(如: 张泽明等, 2008; 王晓先等, 2011)。

① 牟世勇, 王常微, 王敏, 等. 2005. 中华人民共和国区域地质调查报告1: 25万丁固幅. 贵州省地质调查院. 135-143.

② 李才, 程立人, 于介江, 等. 2006. 1: 25万中华人民共和国区域地质调查报告玛依岗日幅. 吉林大学地质调查研究院. 8-68.

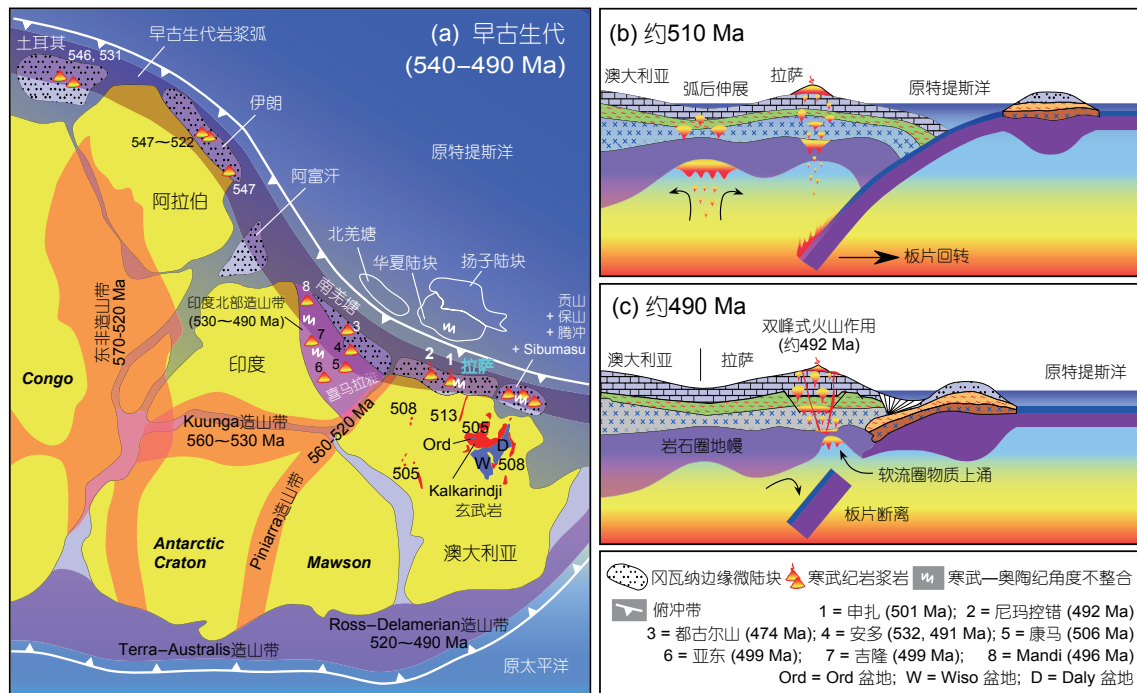


图6 原特提斯边缘早古生代岩浆弧构造重建图(a)和拉萨地块寒武纪双峰式岩浆成因模式图(b和c)

Fig. 6 Reconstruction of an early Paleozoic magmatic arc along the proto-Tethyan margin (a) and models for the generation of the bimodal magmatism in the Lhasa Terrane (b and c) (after Zhu et al., 2012b)

如果印度大陆北缘的原特提斯边缘经历了俯冲和相关造山事件的地球动力学解释是可信的,那么其邻近的东冈瓦纳大陆一侧的原特提斯边缘(即澳大利亚大陆北缘)也应该经历类似的构造岩浆事件,这正如在其邻近的西冈瓦纳大陆一侧的原特提斯边缘(如阿拉伯、伊朗和土耳其等地;图6)记录到的同期俯冲型造山作用(Ramezani and Tucker, 2003; Hassanzadeh et al., 2008; Mahmoud et al., 2011)一样。然而,在现今澳大利亚大陆北缘并未报道有这种早古生代构造岩浆事件(Mory et al., 2003; Cawood et al., 2007)。考虑到拉萨地体起源研究的最新成果(Zhu et al., 2011b)、拉萨地体控错双峰式火山岩(Zhu et al., 2012b)和申扎东部变质火山岩(计文化等, 2009)所代表的岩浆活动以及申扎东部地区发现的寒武—奥陶纪角度不整合(李才等, 2010)等一系列可比于印度大陆北缘的构造岩浆记录,笔者提出,早古生代时位于澳大利亚大陆北缘的拉萨地体,很可能代表了早古生代冈瓦纳大陆原特提斯边缘岩浆弧的一部分(图6)(Zhu et al., 2012b)。因此,古地理上位于印度大陆北缘一侧的南羌塘—安多—特提斯喜马拉雅

雅和古地理上位于澳大利亚大陆北缘一侧的拉萨地体和其它可能的微陆块(如贡山、保山和腾冲等),可能代表了面向原特提斯洋一侧的早古生代岩浆弧(图6)。

笔者的上述解释与Cawood等(2007)关于印度大陆北缘早古生代岩浆弧位置(位于特提斯喜马拉雅或以北)的推测是一致的。已有研究不但在位于印度大陆北缘的特提斯喜马拉雅(Garzanti et al., 1986; 潘桂棠等, 2004; Myrow et al., 2006),而且还在来源于澳大利亚大陆北缘的中部拉萨地体(李才等, 2010)发现了寒武—奥陶纪角度不整合和在保山地体发现了寒武纪花岗岩(500~493 Ma; Liu et al., 2009)和下中奥陶统地层缺失的现象(黄勇等, 2009)。这意味着早期的大陆弧岩浆作用(如控错双峰式岩浆活动)和随后的角度不整合都发育在同一构造带。这种构造岩浆现象与北部拉萨地体的早白垩世早期的弧型岩浆作用(131~115 Ma)、早白垩世晚期的双峰式岩浆作用(约110 Ma; 笔者未刊数据)和随后的上白垩统/下伏地层之间的角度不整合(潘桂棠等, 2006)非常类似,这些构造岩浆事件很可能与班公湖—怒江岩石圈板片的南向俯冲、板片

断离和随后羌塘—拉萨的最终焊接有关 (Zhu et al., 2009b, 2011a)。虽然还需要更多资料的进一步支持, 但基于上述类比, 笔者认为Cawood等 (2007) 提出的板片断离模式可能是目前解释中部拉萨地体控错双峰式岩浆作用的一种合理机制 (图6), 而寒武—奥陶纪角度不整合的形成可能与岩浆弧外侧微陆块 (可能包括华南) 的碰撞增生有关 (Zhu et al., 2012b)。这是因为在从俯冲到碰撞的地球动力学框架内, 板片断离将导致上覆岩石圈板块形成短暂的伸展背景 (Davies and von Blanckenburg, 1995; Duretz et al., 2011), 而这正是双峰式岩浆作用最可能的产出背景。

在大约470 Ma印度大陆北部的Bhimphedian造山作用结束之后 (Cawood et al., 2007), 冈瓦纳大陆北缘转换为被动大陆边缘, 或由于俯冲带后撤形成开阔的弧后盆地 (Cawood et al., 2009), 并可能持续到泥盆纪古特提斯开启之时。大量研究表明, 古特提斯最初可能是在奥陶纪晚期以弧后盆地的方式开启, 到泥盆纪时已经发生了北向俯冲 (Stampfli and Borel, 2002; Metcalfe, 2009)。南羌塘和南部拉萨地体泥盆纪末期岩浆作用指示古特提斯大洋岩石圈那时也可能发生了向冈瓦纳大陆北缘的俯冲作用。随后的岩浆作用可能与俯冲的古特提斯大洋岩石圈的回转有关, 其结果是引起软流圈上涌并发生减压熔融, 导致古老地壳来源的花岗质熔体中幔源物质的明显增加。由于拉萨地体泥盆纪时期以碳酸盐沉积为主 (潘桂棠等, 2004), 笔者推测拉萨地体和南羌塘泥盆纪晚期—石炭纪早期的岩浆作用可能发生在弧后背景 (图7a) (Zhu et al., 2012a)。最近, Murphy等 (2011) 从地球动力学观点, 也提出了类似的弧后盆地系统来解释东冈瓦纳大陆北缘早石炭世时期的演化历史。

如果上述弧后盆地系统的推测是合理的, 那么可以设想, 随着该弧后盆地的进一步发展和演化, 就可能形成以松多榴辉岩为代表的松多特提斯洋 (Chen et al., 2009; Li et al., 2009; Yang et al., 2009)。松多榴辉岩南部与橄榄岩呈断层接触的绿片岩约305 Ma的锆石SHRIMP U—Pb年龄, 可能指示松多特提斯洋在晚石炭末期已经开启 (Chen et al., 2009)。其结果是导致拉萨地体

从澳大利亚大陆北缘裂离出来, 在石炭纪晚期到中二叠世以前呈孤立微陆块形式位于古特提斯洋内 (图7b) (Zhu et al., 2010; Zhu et al., 2011b, 2012a)。现今拉萨地体大陆弧火山岩与榴辉岩、同碰撞S型花岗岩的空间关系, 指示石炭纪晚期到中二叠世以前孤立于古特提斯洋内的拉萨微陆块, 可能在早中二叠世时经历了松多特提斯洋的北向俯冲 (Yang et al., 2009; Zhu et al., 2010) 和中二叠世末期 (约263 Ma) 与澳大利亚大陆北缘的碰撞造山事件 (图7c) (Zhu et al., 2009a)。澳大利亚大陆北部Perth盆地和Carnarvon盆地发现的上二叠统沉积间断和二叠纪—三叠纪不整合 (Mory and Backhouse, 1997; Archbold, 1999; Crostella and Backhouse, 2000) 也支持拉萨地体和澳大利亚大陆北缘可能发生的这种构造事件。拉萨地体与澳大利亚大陆北缘中二叠世末期 (约263 Ma) 的碰撞可能触发了班公湖—怒江特提斯洋岩石圈的南向俯冲, 并随后导致雅鲁藏布新特提斯在中晚三叠世以弧后盆地的方式开启 (图7d), 从而拉开了拉萨地体中生代构造岩浆演化的序幕 (Zhu et al., 2011a)。

5 结语及将来工作

目前已有数据表明: ①南部和北部拉萨地体以新生地壳为主, 其东部地区可能存在前寒武纪结晶基底; 中部拉萨地体是具有古元古代甚至太古代结晶基底的条带状微陆块; ②拉萨地体古生代沉积岩中的碎屑锆石以特有的约1170 Ma峰值为特征, 明显不同于以约950 Ma峰值为特征的安多、羌塘和特提斯喜马拉雅, 拉萨地体很可能起源于澳大利亚大陆北缘; ③拉萨地体寒武纪末期的双峰式火山岩很可能形成于活动大陆边缘, 代表了原特提斯洋岩石圈俯冲到澳大利亚大陆北缘之下的产物, 地球动力学机制上可能与微陆块增生引起的板片断离事件有关; ④拉萨地体南缘泥盆纪末期花岗岩 (可能也包括南羌塘同期花岗岩类) 可能形成于最终演化为松多特提斯洋的弧后盆地背景; ⑤中二叠世末期拉萨地体与澳大利亚大陆北缘的碰撞造山事件触发了班公湖—怒江特提斯洋岩石圈的南向俯冲, 拉开了拉萨地体中生代构造岩浆演化的序幕。

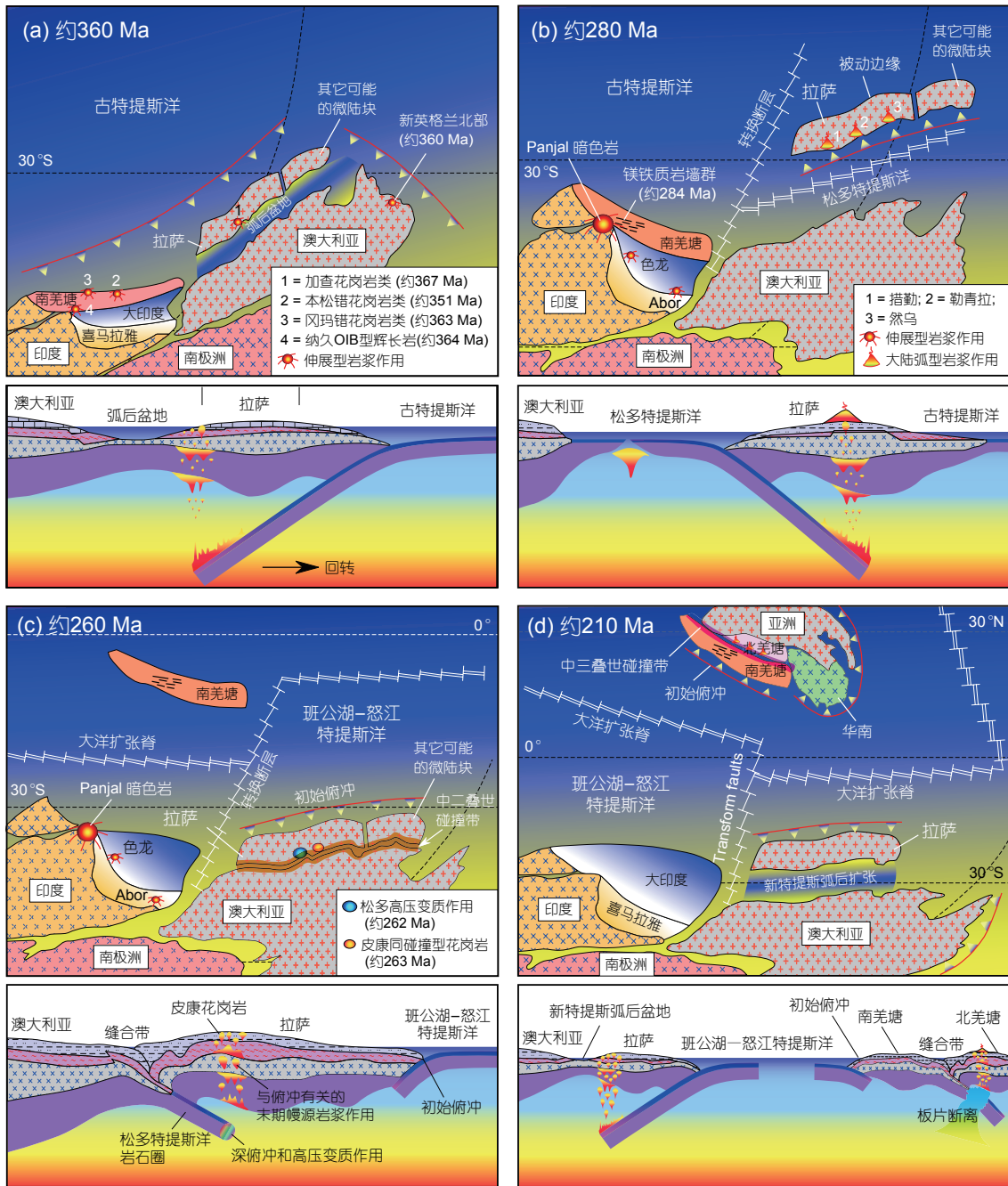


图7 冈瓦纳大陆北缘泥盆纪—中生代早期构造重建图

Fig. 7 Tectonic reconstruction of the northern margin of Gondwana from the Devonian to early Mesozoic (after Zhu et al., 2012a)

笔者强调，由于目前积累的资料非常有限，上述关于拉萨地体古生代（尤其是泥盆—石炭纪时期）构造演化解的合理性尚需积累更多资料后进一步检验。如来自石炭—二叠纪冰海相杂砾岩的证据。在拉萨、羌塘和喜马拉雅均出露的石炭—二叠纪杂砾岩，是这些地体在晚古生代时期具有亲冈瓦纳属性的关键证据之一（Metcalf, 2009）。这些杂砾岩无可争辩地来源于古特提斯

洋南部的冈瓦纳大陆内部冰川。但需要指出，印度大陆冰川来源并不是唯一选择，同样位于古特提斯洋南部的澳大利亚大陆冰川来源也是可以考虑的解释。在这种情况下，就需要结合现代测试分析技术，在准确追踪这些杂砾岩物源区的基础上进一步讨论其古地理意义。这是因为这些冰海相杂砾岩中的砾石成分非常复杂（梁定益等，1994；李才等，1995，2008b），利用常规地层学

和岩石学研究手段很难追踪其物源区。另外, 古地磁数据也是构造重建的另外一项关键指标。但遗憾的是, 目前关于藏南的古生代地层的古地磁数据, 主要来自于20世纪80~90年代(Li et al., 2004)。由于这些地层发生了强烈的重磁化, 已有数据的可靠性尚需进一步评价。

致谢: 感谢徐义刚研究员的热情邀稿! 感谢审稿专家的评审意见!

参考文献 (References) :

- 董昕, 张泽明, 耿官升, 等. 2010. 青藏高原拉萨地体南部的泥盆纪花岗岩[J]. 岩石学报, 26(7): 2226-2232.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物?[J]. 岩石学报, 26(7): 2165-2179.
- 黄勇, 邓贵标, 彭成龙, 等. 2009. 滇西保山南部早中奥陶世沉积缺失的发现及意义[J]. 贵州地质, 26(1): 1-6.
- 计文化, 陈守建, 赵振明, 等. 2009. 西藏冈底斯构造带申扎一带寒武系火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 28(9): 1350-1354.
- 解超明, 李才, 苏黎, 等. 2010. 藏北安多地区花岗岩片麻岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年[J]. 地质通报, 29(12): 1737-1744.
- 李才, 程立人, 胡克, 等. 1995. 西藏羌塘南部地区的冰海杂砾岩及其成因[J]. 长春地质学院学报, 25(4): 368-374.
- 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 2010. 青藏高原泛非-早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现[J]. 地质通报, 2010, 29(12): 1733-1736.
- 李才, 谢尧武, 沙绍礼, 等. 2008a. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年[J]. 地质通报, 27(1): 64-68.
- 李才, 谢尧武, 蒋光武, 等. 2008b. 藏东吉塘地区冈瓦纳相冰海杂砾岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 27(10): 1654-1658.
- 李才, 翟刚毅, 王立全, 等. 2009. 认识青藏高原的重要窗口——羌塘地区近年来研究进展评述(代序) [J]. 地质通报, 28(9): 1169-1177.
- 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 等. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据[J]. 岩石学报, 23(2): 493-500.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 1994. 早二叠世冈瓦纳北缘构造古地理环境与杂砾岩成因剖析[J]. 特提斯地质, 18: 61-73.
- 刘琦胜, 江万, 简平, 等. 2006. 宁中白云母二长花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 22(3): 643-652.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281-290.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. 地质通报, 23(1): 12-19.
- 王立全, 潘桂棠, 朱弟成, 等. 2008. 西藏冈底斯带石炭纪-二叠纪岛弧造山作用: 火山岩和地球化学证据[J]. 地质通报, 27(9): 1509-1534.
- 王晓先, 张进江, 杨雄英, 等. 2011. 藏南吉隆地区早古生代喜马拉雅雅片麻岩锆石SHRIMP U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 18(2): 127-139.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 85(1): 1-33.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 2007. 冈底斯印支期造山事件: 花岗岩类锆石U-Pb年代学和岩石成因证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 32(2): 155-166.
- 张泽明, 董昕, 耿官升, 等. 2010. 青藏高原拉萨地体北部的前寒武纪变质作用及构造意义[J]. 地质学报, 84(4): 449-456.
- 张泽明, 王金丽, 沈昆, 等. 2008. 环冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用: 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据[J]. 岩石学报, 24(7): 1627-1637.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 2009b. 西藏冈底斯带东部察隅高分异I型花岗岩的成因: 锆石U-Pb年代学, 地球化学和Sr-Nd-Hf同位素约束[J]. 中国科学, 39(7): 833-848.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2009a. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地学前缘, 16(2): 1-20.
- 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等. 2011. 西藏拉萨地块过铝质花岗岩中继承锆石的物源区示踪及其古地理意义[J]. 岩石学报, 27(7): 1917-1930.
- Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 307: 17-22.
- Archbold N W. 1999. Permian Gondwanan correlations: the significance of the western Australian marine Permian [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 29: 63-75.
- Audley-Charles M G. 1983. Reconstruction of eastern Gondwanaland [J]. *Nature*, 306: 48-50.
- Audley-Charles M G. 1984. Cold Gondwana, warm Tethys and the Tibetan Lhasa block [J]. *Nature*, 310: 165-166.
- Audley-Charles M G. 1988. Evolution of the southern margin of Tethys (North Australian region) from early Permian to late Cretaceous [J]. *Geological Society Special Publication*, 37: 79-100.
- Bagas L. 2004. Proterozoic evolution and tectonic setting of the northwest Paterson Orogen, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 128: 475-496.
- Cawood P A and Nemchin A A. 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 134: 209-234.
- Cawood P A and Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly [J]. *Earth-Science Reviews*, 82: 217-256.
- Cawood P A, Johnson M R W and Nemchin A A. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70-84.
- Cawood P A, Kröner A, Collins W J, et al. 2009. Accretionary orogens through Earth history [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 318: 1-36.
- Chen S Y, Yang J S, Li Y, et al. 2009. Ultramafic blocks in Sumdo region, Lhasa Block, eastern Tibet Plateau: An ophiolite unit [J]. *Journal of Earth Science*, 20: 332-347.
- Chiu H Y, Chung S L, Wu F Y, et al. 2009. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from eastern Transhimalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 477: 3-19.
- Chu M F, Chung S L, O'Reilly S Y, et al. 2011. India's hidden inputs to Tibetan orogeny revealed by Hf isotopes of Transhimalayan zircons and host rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 307: 479-486.
- Chu M F, Chung S L, Song B, et al. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope

- constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet [J]. *Geology*, 34: 745–748.
- Collins W J and Richards S W. 2008. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens [J]. *Geology*, 36: 559–562.
- Crostella A and Backhouse J. 2000. Geology and petroleum exploration of the central and southern Perth Basin, Western Australia [R]. Western Australia Geological Survey, Report, 57: 1–85.
- Dai J G, Wang C S, Hébert R, et al. 2011. Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleotethys? [J] *Gondwana Research*, 19: 232–243.
- Davies J H, and von Blanckenburg F. 1995. Slab breakoff: a model of lithospheric detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 129: 85–102.
- Dong X, Zhang Z M and Santosh M. 2010. Zircon U–Pb Chronology of the Nyingtri Group, Southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan-African Provenance and Mesozoic–Cenozoic Metamorphism [J]. *Journal of Geology*, 118: 677–690.
- Dong X, Zhang Z M, Santosh M, et al. 2011. Late Neoproterozoic thermal events in the northern Lhasa terrane, south Tibet: Zircon chronology and tectonic implications [J]. *Journal of Geodynamics*, 52(5): 389–405.
- Duret T, Gerya TV, May DA. 2011. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response [J]. *Tectonophysics*, 502: 244–256.
- Ferrari O M, Hochard C and Stampfli G M. 2008. An alternative plate tectonic model for the Palaeozoic–Early Mesozoic Palaeotethyan evolution of Southeast Asia (Northern Thailand–Burma) [J]. *Tectonophysics*, 451: 346–365.
- Garzanti E, Casnedi R, Jadoul F. 1986. Sedimentary evidence of a Cambro–Ordovician orogenic event in the northwestern Himalaya [J]. *Sedimentary Geology*, 48: 237–265.
- Gehrels G, Kapp P, DeCelles P, et al. 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan–Himalayan orogen [J/OL]. *Tectonics*, 30: TC5016, doi:10.1029/2011TC002868.
- Gehrels G E, DeCelles P G, Martin A, et al. 2003. Initiation of the Himalayan Orogen as an early Paleozoic thin-skinned thrust belt [J]. *GSA Today*, 13: 4–9.
- Geng Q R, Sun Z M, Pan G T, et al. 2009. Origin of the Gangdise (Transhimalaya) Permian arc in southern Tibet: Stratigraphic and volcanic geochemical constraints [J]. *Island Arc*, 18: 467–487.
- Gorton M P, and Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canadian Mineralogist*, 38: 1065–1073.
- Guyann J, Kapp P, Gehrels G, et al. 2012. U–Pb geochronology of basement rocks in central Tibet and paleogeographic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 23–50.
- Haines P W and Wingate M T D. 2007. Contrasting depositional histories, detrital zircon provenance and hydrocarbon systems: Did the Larapintine Seaway link the Canning and Amadeus basins during the Ordovician [M] // Munson T J and Ambrose G J. Proceedings of the Central Australian Basins Symposium (CABS). Northern Territory Geological Survey, Central Australian Basins Symposium, Alice Springs, Northern Territory, 16–18 August, 2005, Proceedings; Special Publication, no. 2, p. 36–51.
- Hassanzadeh J, Stockli D F, Horton B K, et al. 2008. U–Pb zircon geochronology of upper Neoproterozoic–Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, metallogeny, and exhumation history of Iranian basement [J]. *Tectonophysics*, 451: 71–96.
- Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, et al. 2005. SHRIMP zircon U–Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqênntanglha Group in Tibet [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48(9): 1377–1386.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al. 2009. Zircon U–Pb chronology and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of Gangdese batholiths, southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 262: 229–245.
- Lee H Y, Chung S L, Lo C H, et al. 2009. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record [J]. *Tectonophysics*, 477: 20–35.
- Li P W, Gao R, Cui J W, et al. 2004. Paleomagnetic analysis of eastern Tibet: Implications for the collisional and amalgamation history of the Three Rivers Region, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 291–310.
- Li Z L, Yang J S, Xu X Z, et al. 2009. Geochemistry and Sm–Nd and Rb–Sr isotopic compositions of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet, and its geological significance [J]. *Lithos*, 109: 240–247.
- Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. 2009. U–Pb zircon, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong–Baoshan Block, Western Yunnan Province, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36: 168–182.
- Mahmoud R I, Wali F S, František H V, et al. 2011. Magmatic and metamorphic evolution of the Shotur Kuh metamorphic complex (Central Iran) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 100: 45–62.
- Meert J. 2003. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana [J]. *Tectonophysics*, 362: 1–40.
- Metcalf I. 2009. Late Palaeozoic and Mesozoic tectonic and palaeogeographic evolution of SE Asia [J]. *The Geological Society, London, Special Publications*, 315: 7–23.
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, et al. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet [J]. *Lithos*, 96: 225–242.
- Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. 2008a. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleocene Linzizong Volcanic Succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 250: 49–67.
- Mo X X, Zhao Z D, Zhou S, et al. 2008b. Complexity in ages and tectonic settings of Yarlung Zangbo Ophiolite Belt [C]. 33rd International Geological Congress Workshop: Oslo, Workshop abstract.
- Mory A J, and Backhouse J. 1997. Permian stratigraphy and palynology of the Carnarvon Basin, Western Australia [J]. *Western Australia Geological Survey, Report*, 51: 1–46.
- Mory A J, Iasky R P, Ghori K A R. 2003. A summary of the geological evolution and petroleum potential of the Southern Carnarvon Basin, Western Australia [J]. *Western Australia Geological Survey, Report*, 86: 1–26.
- Metcalf I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland [J]. *Gondwana Research*, 19: 3–21.
- Murphy J B, van Staal C R and Collins W J. 2011. A comparison of the evolution of arc complexes in Paleozoic interior and peripheral orogens: Speculations on geodynamic correlations [J]. *Gondwana Research*, 19: 812–827.

- Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, et al. 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian–Ordovician [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 1660–1670.
- Myrow P M, Thompson K R, Hughes N C, et al. 2006. Cambrian stratigraphy and depositional history of the northern Indian Himalaya, Spiti Valley, north-central India [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118: 491–510.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al. 2011. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variations and implications for crustal structure [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123: 585–600.
- Quigley M C, Yu L J, Gregory C, et al. 2008. U–Pb SHRIMP zircon geochronology and T–t history of the Kampa Dome, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 446: 97–113.
- Ramezani J, and Tucker R D. 2003. The Saghand Region, Central Iran: U–Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics [J]. *American Journal of Science*, 303: 622–665.
- Sengör A M C, Altner D, Cin A, et al. 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 37: 119–181.
- Sengör A M C, Cin A, Rowley D B, et al. 1993. Space-time patterns of magmatism along the Tethysides: A preliminary study [J]. *Journal of Geology*, 101: 51–84.
- Sengör A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 213–244.
- Sengör A M C and Atayman S. 2009. The Permian extinction and the Tethys: An exercise in global geology [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 448: 1–85.
- Sircombe K N and Freeman M J. 1999. Provenance of detrital zircon on the Western Australian coastline: Implications for the geological history of the Perth Basin and denudation of the Yilgarn Craton [J]. *Geology*, 27: 879–882.
- Stampfli G M, Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 17–33.
- Veevers J J, Saeed A, Belousova E A, et al. 2005. U–Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton [J]. *Earth–Science Reviews*, 68: 245–279.
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. 2011. Detrital zircon U–Pb geochronology and provenance of the Carboniferous–Permian glaciomarine pebbly slates in the Tibetan Plateau. AGU conference abstract, San Francisco, California, T51D–2365.
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study [J/OL]. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2011.07.027.
- Xu Z Q, Ji S C, Cai Z H, et al. 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology [J]. *Gondwana Research*, 21(1): 19–36.
- Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, et al. 2009. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 76–89.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan Orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280.
- Yoshida M and Upreti B N. 2006. Neoproterozoic India within East Gondwana: Constraints from recent geochronologic data from Himalaya [J]. *Gondwana Research*, 10: 349–356.
- Zhao T P, Zhou M F, Zhao J H, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of the c. 80 Ma Rutog granitic pluton, northwestern Tibet: implications for the tectonic evolution of the Lhasa Terrane [J]. *Geological Magazine*, 145: 845–857.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. 2009b. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east–west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet [J]. *Chemical Geology*, 268: 298–312.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. 2009a. Zircon U–Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of Permian peraluminous granite in the Lhasa terrane, southern Tibet: Implications for Permian collisional orogeny and paleogeography [J]. *Tectonophysics*, 469: 48–60.
- Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. 2010. Presence of Permian extension- and arc- type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications [J]. *GSA Bulletin*, 122: 979–993.
- Zhu D C, Pan G T, Chung S L, et al. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese in south Tibet [J]. *International Geology Review*, 50: 442–471.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. 2011a. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241–255.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. 2011b. Lhasa Terrane in southern Tibet came from Australia [J]. *Geology*, 39: 727–730.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. 2012a. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau [J/OL]. *Gondwana Research*, 10.1016/j.gr.2012.02.002
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. 2012b. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin [J/OL]. *Chemical Geology*, doi:10.1016/j.chemgeo.2011.12.024.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, et al. 2009b. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1223–1239.