

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.180>



# 印度—亚洲大陆碰撞过程中新特提斯洋岩石圈的命运

黄 丰<sup>1</sup>, 许继峰<sup>1,3</sup>, 王保弟<sup>2</sup>, 曾云川<sup>1</sup>, 刘希军<sup>3</sup>, 刘 函<sup>2</sup>, 余红霞<sup>3</sup>

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

3. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004

**摘要:** 印度—亚洲大陆碰撞之后的新特提斯洋板片的断离过程及其产生的岩浆作用一直是青藏高原南部地质研究中受到广泛关注但存在极大争议的问题。分析了青藏高原南部拉萨地块上新特提斯洋板片断离存在的问题, 总结了目前用于限制板片断离过程的岩石学方法。对拉萨地块南部典型地区早新生代镁铁质岩石开展了详细的地质年代学、主微量元素和Sr-Nd-Hf同位素地球化学分析, 厘定了~57 Ma 和~50 Ma 与新特提斯洋板片断离过程密切相关的两套岩石。~57 Ma 的镁铁质岩石显示出高的Zr/Y 和Ti/Y 比值, 不同于拉萨地块南部广泛分布的岛弧岩浆地球化学特征, 表明它们形成于板内伸展背景下, 很可能代表了新特提斯板片断离的开始。~50 Ma 的镁铁质岩石为富闪深成岩, 反映了印度—亚洲大陆碰撞后南拉萨地块岩石圈中的富水环境, 暗示大洋板片断离后仍然持续释放流体至上覆岩石圈地幔中。结合拉萨地块上已有的镁铁质岩石的年代学和地球化学数据, 重建了新特提斯洋在印度—亚洲大陆碰撞之后从初始撕裂至板片完全断离的全过程, 即新特提斯板片在~57 Ma 开始发生初始撕裂, 随后以高角度俯冲并与印度大陆岩石圈脱离, 导致中拉萨和南拉萨地块同时出现广泛的镁铁质岩浆作用, 在~50 Ma 大洋板片完全断离。拉萨地块内部岩石圈地幔地球化学组成存在极大的不均一性, 中拉萨地块和南拉萨地块东部的局部地区存在古老的岩石圈物质组成, 而南拉萨地块中部主要为亏损的岩石圈。拉萨地块内局部古老富集岩石圈可能受到新特提斯洋板片断离后深部地幔物质上涌的影响转变为新生的亏损岩石圈, 这一过程很可能促进了拉萨地块的中酸性岩浆大爆发作用和大陆地壳生长。

**关键词:** 印度—亚洲大陆碰撞; 新特提斯洋; 板片断离; 镁铁质岩石; 拉萨地块; 青藏高原; 地质年代学; 地球化学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2020)08-2785-20

收稿日期: 2020-05-29

## Destiny of Neo-Tethyan Lithosphere during India-Asia Collision

Huang Feng<sup>1</sup>, Xu Jifeng<sup>1,3</sup>, Wang Baodi<sup>2</sup>, Zeng Yunchuan<sup>1</sup>, Liu Xijun<sup>3</sup>, Liu Han<sup>2</sup>, Yu Hongxia<sup>3</sup>

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

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

3. Guangxi Key Laboratory of Exploration for Hidden Metallic Ore Deposits, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China

**Abstract:** The breakoff of the Neo-Tethyan slab and related magmatism after India-Asia continental collision has been controversial topics in the geological study of the southern Tibetan Plateau. In this study, it reviews the unsolved problems and petrological methods for exploring the process on the Neo-Tethyan slab breakoff. Based on the systematic geochronology, major and trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemical analyses of the Early Cenozoic mafic rocks in the typical areas of the Lhasa Terrane, it is found that two suites of mafic rocks with ages of ~57 Ma and ~50 Ma have close relationship with the Neo-Tethyan slab

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0600304); 国家自然科学基金(Nos. 41973027, 41603033); 博士后创新人才支持计划(BX201700213); 中央高校基本科研业务费(No. 2652019054)。

**作者简介:** 黄丰(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩石地球化学研究。ORCID: 0000-0001-6215-8223. E-mail: fenghuang@cugb.edu.cn

**引用格式:** 黄丰, 许继峰, 王保弟, 等, 2020. 印度—亚洲大陆碰撞过程中新特提斯洋岩石圈的命运. 地球科学, 45(8):2785—2804.

breakoff. The ~57 Ma mafic rocks are characterized by high Zr/Y and Ti/Y ratios, and their geochemistry indicates an intraplate affinity rather than arc magmas, indicating that they likely correspond to the magmatic expression of the initial stage of Neo-Tethyan slab breakoff. The ~50 Ma mafic rocks are appinites, reflecting the water-rich environment in the lithospheric mantle of the southern Lhasa Terrane after the India-Asia collision, suggesting the flux of slab fluids through the lithospheric mantle during breakoff of the Neo-Tethyan slab. Integrating the geochronological and geochemical data of the Early Cenozoic mafic magmatism in the Lhasa Terrane, we have reconstructed the processes from initial tear to completely breakoff of the Neo-Tethyan lithosphere after India-Asia continent collision. The initial tear of the Neo-Tethyan lithosphere occurred at ~57 Ma, then the slab detached from the India lithosphere with a high angle subduction, which resulted in the simultaneous occurrence of extensive mafic magmatism in the central and southern Lhasa Terrane. The complete slab breakoff happened at ~50 Ma. The isotopic compositions of Early Cenozoic magmatic rocks reveal that there was great geochemical heterogeneity of lithospheric mantle beneath the Lhasa Terrane. There were ancient lithospheric materials in the central Lhasa Terrane and eastern part of the southern Lhasa Terrane, while there was mainly depleted juvenile lithosphere in the central part of the southern Lhasa Terrane. The local ancient enriched lithosphere in the Lhasa Terrane is likely to transform into a juvenile depleted lithosphere by the upwelling of the deep mantle material, which may promote the eruption of the felsic magmatism and the growth of continental crust in the Lhasa Terrane.

**Key words:** India-Asian continental collision; Neo-Tethys Ocean; slab breakoff; mafic rock; Lhasa Terrane; Tibetan Plateau; geochronology; geochemistry.

## 0 引言

依据板块构造理论,大陆发生碰撞是一个自然的过程 (van Hunen and Allen, 2011), 分隔两个大陆的大洋会不断产生新的洋壳,朝靠近大陆的一侧发生俯冲。相对大陆岩石圈来说,洋壳具有较冷且密度大的性质,它会不断地俯冲到地幔深部,洋壳在汇聚大陆边缘发生快速消减,导致大洋逐渐缩小并消失,两个大陆开始发生碰撞。大陆的碰撞拼合会形成广袤的造山带,从而创造了世界上多个高原(如青藏高原)。在大陆碰撞模型中,上部密度较小的大陆岩石圈与下部密度较大的大洋板片相连(图1)。随着大洋板片的向下俯冲,大陆岩石圈承受的浮力会逐渐增加,当俯冲到一定深度后,大洋板片向下的拖拽力与上覆大陆岩石圈的浮力之间会出现一个明显的应力拉张环境,同时俯冲到地球深部的大洋板片受到大量的热作用局部会因熔融而变得薄弱,进而导致大洋板片的轻微拉开或断裂(图1) (Davies and von Blanckenburg, 1995; van Hunen and Allen, 2011)。板片断离可能最初在一个小的薄弱带开始,其后沿着走向迁移,部分板片的脱离会在仍然连着的板片上增加更多拖拽力,这会持续增加侧向迁移。当板片俯冲到地幔深部,由于浮力拉张导致的大洋板片撕裂带被热的、上涌的软流圈地幔所填充,软流圈物质的进一步上涌会改变上覆岩石圈的物理化学状态,促使岩石圈物质更容易发生部分熔融。对于俯冲的大洋板片来说,地幔的热对流会使其更具韧性,应力拉张进一步扩大,最

终促使大洋板片脱离后部的大陆岩石圈,从而发生断离以及板片沉降(图1)。

大洋板片断离过程中,地幔对流产生的热量会导致板片上覆交代的岩石圈地幔发生部分熔融,产生钙碱性玄武岩。这些岩浆上升到地壳中,由于其携带相对大的热量,会导致地壳熔融而出现双峰式的火山岩组合,并出现大量组分不均一的岩浆活动,往往造成一次岩浆大爆发事件(magmatic ‘flare up’)(Ferrari, 2004; Lee *et al.*, 2009)。软流圈的上涌总是沿着大洋板片撕裂的裂隙,因此板片断离所产生的岩浆活动总是呈线性分布(Davies and von Blanckenburg, 1995; Altunkaynak, 2007)。

在板片断离之前,俯冲的洋壳或陆壳会因为其温度升高而变得脆弱,陆壳物质可能会增生到逆冲上盘的板块之上(van den Beukel, 1992)。当板片俯冲到深部地幔时,这些逆冲增生物质会脱离增生的岩石圈,由于它们的密度比周围地幔物质小得多,它们可能会沿着原本俯冲的方向迅速上升到地壳中,并导致地壳一系列断层和褶皱出现,同时伴随着一系列高压和超高压大陆变质岩石(如榴辉岩)的出现(Davies and von Blanckenburg, 1995)。许多学者对大陆碰撞过程中的大洋板片断离过程进行了概念模型的描述,如 Isacks and Molnar (1969) 推测地幔地震分布异常可能是由板片断离导致,同碰撞及后碰撞岩浆岩可能也涉及到板片断离过程(Ferrari, 2004; Chung *et al.*, 2005),软流圈通过打开的板片窗与上覆的岩石圈

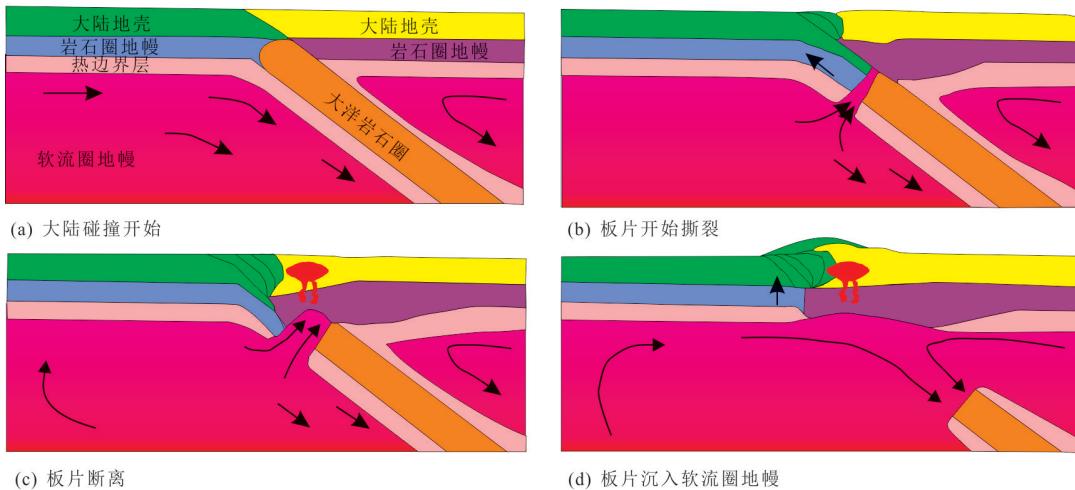


图1 板片断离过程的简单图示

Fig. 1 Schematic breakoff processes

据 Davies and von Blanckenburg(1995). a. 大陆碰撞开始,俯冲的大洋岩石圈诱发了周围软流圈地流动;b. 板片的撕裂开始,软流圈上涌到断裂带中,俯冲一侧的大陆壳底垫到活动大陆边缘的大陆岩石圈之下;c. 窄的岩石圈断裂带持续发展为板片断离,热的软流圈冲击之前交代的岩石圈底部会形成岩浆作用,大陆岩石圈之下板片断离后应力和势能地释放会导致地表的初步抬升;d. 大洋板片沉入地幔深部,伴随着地表的进一步抬升,软流圈的深部对流使岩石圈底部遭受高温作用,大陆缝合带变得陡峭,向被动大陆边缘一侧迁移的逆冲断层导致在两侧大陆内部均会出现侵入岩石

直接接触,部分熔融形成一系列岩浆作用。沉积物从复理石到磨拉石的转变,可能也是板片断离的直接结果(Sinclair, 1997)。

Davies and von Blanckenburg (1995)的研究结果表明,对俯冲角度统一为 $20^{\circ}$ 、移动速度为 $1 \text{ cm/a}$ 的板片来说,板片可能在 $50\sim120 \text{ km}$ 的深度发生断离。对于俯冲速率为 $0.2 \text{ cm/a}$ 的板片来说,断离发生在更浅部,而对于俯冲速率为 $5 \text{ cm/a}$ 的板片则在更深处发生断离。利用沉积盆地的扩张事件估计板片断离的持续时间为 $25 \text{ Ma}$ 到 $5\sim10 \text{ Ma}$ (Houseman and England, 1986),如果板片的应变局部化确实由应变速率控制,通过模拟计算得到板片断离的时间可能发生在 $5\sim10 \text{ Ma}$ 之间(Davies and von Blanckenburg, 1995). Li *et al.* (2002) 计算了板片所承受的浮力大小和相对承受的综合力,板片断离时推算大洋板片和大陆岩石圈的应力为相反方向,因此构建方程式计算确定板片断离的深度和开始时间:在较大的汇聚速率下( $>5 \text{ cm/a}$ ),不论板片俯冲的角度,板片断离均发生在较深的地幔(通常 $>100 \text{ km}$ )、在大陆碰撞后 $3 \text{ Ma}$ 之内发生;当大陆汇聚速率较低( $2.5 \text{ cm/a}$ )时,板片断离可能发生在较浅的位置( $\sim65 \text{ km}$ )、在大陆碰撞后 $4\sim6 \text{ Ma}$ 之内发生.van Hunen and Allen (2011)认为古老的大洋岩石圈会在大陆碰撞之后 $\sim20 \text{ Ma}$ 发生断离,而新的

大洋岩石圈可能在大陆碰撞后 $10 \text{ Ma}$ 开始断离,然而这种对板片断离发生时间的估计仍然很笼统。

大量研究表明,板片断离在大陆碰撞过程中扮演了重要的角色,进而影响造山带中的岩浆活动与构造机制;然而具体的造山带中由于大洋和大陆岩石圈环境各不相同,需要详细的岩石学和地球化学研究才能更好地确定其时代与地质背景。大洋俯冲—大陆碰撞—大洋板片断离,已成为碰撞造山带必然经历的一个过程。然而目前对板片断离与大陆碰撞发生的时间关系、板片断离发生的地幔深度以及对壳幔的影响还存在争议。综合研究区域大地构造、地球物理和岩浆活动资料,有利于进一步了解大洋俯冲向大陆碰撞转变过程中的深部动力学过程,探明板片断离过程中可能发生的一系列岩浆事件和深部动力学机制,以期建立更加完备的碰撞造山过程。青藏高原是现今世界上海拔最高的高原,也是最重要的碰撞造山带(Yin and Harrison, 2000; Pan *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2017).拉萨地块代表了印度和亚洲大陆碰撞的前锋地带,出现了大量的岩浆作用(图2)(Wen *et al.*, 2008; Chung *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2017).因此,从岩浆作用的角度,拉萨地块是一个检验板片断离假说的理想研究区域。

## 1 对新特提斯洋板片断离的限制和存在问题

随着印度—欧亚大陆碰撞的发生,新特提斯洋俯冲至亚洲大陆深部,现今的地质资料显示印度岩石圈已俯冲至班公湖—怒江缝合带之下(Owens and Zandt, 1997; Guo *et al.*, 2018)。因此,新特提斯洋岩石圈必然发生断离,van der Voo *et al.* (1999)通过对青藏高原深部地幔地震波探测证实了断离的新特提斯洋岩石圈板片依旧停留在地幔深部。截至目前,新特提斯洋板片断离的时间、岩浆响应及其对青藏高原南部的影响仍存在极大争议,对新特提斯洋板片断离的研究主要集中在以下几个方面。

### 1.1 变质事件

基于喜马拉雅地块中变质岩的岩石学研究,Kohn and Parkinson (2002)提出大洋岩石圈的断离发生时间不晚于45~55 Ma。

### 1.2 中酸性火山岩及侵入体

通过对冈底斯弧岩浆作用的研究,Chung *et al.* (2005)认为岛弧火山岩停止出现的时间代表了大洋板片断离的时间(~45 Ma).Lee *et al.* (2009) 和 Chung *et al.* (2009)通过对拉萨地块上广泛分布的林子宗群火山岩和渐新—中新世埃达克岩详细的年代学和地球化学研究,将板片断离时间修正为50 Ma.Wen *et al.* (2008) 和 Ji *et al.* (2009)通过对拉萨地块冈底斯岩基详细的地质年代学和地球化学研究,指出冈底斯带出现的50 Ma的岩浆大爆发作用可能为新特提斯洋岩石圈与印度大陆解耦的结果.Zhu *et al.* (2015)整合分析了拉萨地块上80~40 Ma岩浆活动的区域和地球化学性质,提出印度板块在51 Ma的减速俯冲是由于~53 Ma大洋板片断离的结果,该结论得到了旁多地区帕那组火山岩研究结果的支持(Liu *et al.*, 2018)。

### 1.3 镁铁质火山岩和侵入体

岳雅慧和丁林(2006)对位于林周地区的钾玄基性岩脉进行了年代学和地球化学分析,认为其可能具有煌斑岩的地球化学特征,代表了典型伸展环境的产物,其动力学机制可能为新特提斯洋板片断离,由此推断板片断离发生的时间为55~50 Ma.高永丰等(2006)和Gao *et al.* (2008)首次报导了拉萨地块南部来自软流圈的岩浆活动,这些软流圈熔体中斜长石Ar-Ar定年结果(38~42 Ma)可能代表大洋板片断离的时间.早期对新特提斯洋板片断离的研究均集中在

拉萨地块南部或其东南延伸带,赵志丹等(2011)对位于中拉萨地块的当雄辉长岩—花岗岩杂岩的研究表明,其形成很可能与发生在~52 Ma的新特提斯洋板片断离有关.念青唐古拉中基性侵入岩的年代学研究表明,板片断离事件可能发生在50 Ma(陈晓锋等,2012).目前北拉萨地块上出露的新生代中基性岩石均集中在西段,中东段与新特提斯洋板片断离相关的镁铁质岩石的报道较少.最近,Ji *et al.* (2016)发现了位于雅鲁藏布江缝合带南侧一套OIB型辉长岩,据此提出新特提斯洋板片断离发生在~45 Ma.

新特提斯洋的北向俯冲,在欧亚大陆南缘形成了具有典型挤压特征的构造形式,随着印度—亚欧大陆的碰撞新特提斯洋板片断离,活动大陆边缘由挤压环境转变为伸展环境(岳雅慧和丁林,2006).对青藏高原早新生代火山岩进行详细研究,可以获取地幔深部动力学信息,从而厘定高原内部活动过程,对研究高原的形成具有重要意义.目前对青藏高原碰撞相关的火山岩和侵入体研究已经取得了长足的进步,然而大多数工作局限于通过对高质量的同位素年代学和地球化学数据的分析,获得青藏高原碰撞造山的活动框架,对于更加精细的深部动力学演化与浅部岩浆活动之间的关系如对板片断离的研究还明显不够,还存在以下问题:

(1)新特提斯洋板片断离发生的时代存在争议.前人通过研究拉萨地块上镁铁质岩浆活动的时代,限定了板片断离活动时限(高永丰等,2006;岳雅慧和丁林,2006;Wen *et al.*, 2008;Lee *et al.*, 2009).然而,这些对镁铁质岩浆活动的年代学限制往往源自单矿物或全岩的Ar-Ar激光定年结果,由于青藏高原上大量新生代岩浆均发生了强烈的风化和蚀变作用,可能影响其K-Ar体系,从而产生不精确的定年结果.定年结果显示其存在2个明显不同的阶段,即38~42 Ma和~53 Ma.随着高精度锆石U-Pb定年技术的发展,最新的研究表明,镁铁质岩脉形成时代为50~55 Ma,可能代表板片断离时间(赵志丹等,2011;陈晓锋等,2012;Ma *et al.*, 2016;Shu *et al.*, 2018;Wang *et al.* 2019a).尽管这些镁铁质岩脉能否代表板片断离活动的产物仍值得商榷,但是目前的研究揭示板片断离可能存在2个时间段,即45~40 Ma和55~50 Ma.

(2)板片断离过程指示的岩浆活动定义并不明确.前人往往通过大区域上岩浆事件活动的年代学综合分析,得出岩浆事件集中发生的时间(Wen et

al., 2008; Ji et al., 2009; Lee et al., 2009; Zhu et al., 2015),推断其可能与新特提斯洋岩石圈断离相关。研究表明,岩石圈的伸展作用同样可以导致岩浆大爆发作用(‘flare up’)(DeCelles et al., 2009; Ducea et al., 2015),这种岩石圈伸展不一定与大洋板片的拆离相关,因此笼统地认为岩浆大爆发事件与板片断离相关可能并不可取。部分学者认为发生在新生代早期的镁铁质岩浆活动更可能指示板片断离活动过程(高永丰等,2006;岳雅慧和丁林,2006;Gao et al., 2008;赵志丹等,2011;陈晓锋等,2012),然而大多数研究表明这些镁铁质岩脉来自岩石圈地幔,并遭受了不同程度的地壳混染或结晶分异过程,因而并不能指示板片断离过程中软流圈上涌的过程。

(3)还没有建立完整的对应大陆碰撞过程中大洋岩石圈板片断离后的大地构造活动情况。国内外的研究表明,板片断离在大陆碰撞造山过程中是一个必然发生的过程(Keskin, 2003; Schoonmaker et al., 2005),然而对青藏高原内部新特提斯洋板片断离过程的研究主要来自对拉萨地块内新生代岩浆和变质作用的指示(Kohn and Parkinson, 2002; Chung et al., 2005; Wen et al., 2008; Ji et al., 2009),对于其可能引起的大地动力学过程研究甚少。国外学者指出,源自于地幔深部的大洋板片断离可能导致岩石圈的伸展运动,在地表形成沉积盆地或大型断裂构造(Sevin et al., 2014),从而造成不同的侵蚀带(Fox et al., 2015),甚至造成地表抬升(Schildgen et al., 2014)。而目前对于青藏高原内部存在的沉积—构造事件主要针对印度—欧亚大陆碰撞过程或后碰撞伸展运动,对大洋板片断离后相关的构造痕迹和沉积古地理的研究明显不足。

鉴于青藏高原南部在研究早新生代新特提斯板片断离过程中的优势和问题,本文通过分析整合目前对拉萨地块南部早新生代镁铁质岩浆的研究,试图厘定新特提斯洋板片断离对应的岩浆作用,确定壳幔深部物理化学组成,反演拉萨地块新生代早期岩浆—构造演化历史。

## 2 地质背景

青藏高原由一系列东西向延伸的地块组成,从北向南包括松潘—甘孜复理石杂岩体、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块(Yin and Harrison, 2000; Pan et al., 2012)。拉萨地块位于藏南,通常被称为冈底斯带,夹持于班公湖—怒江缝合带(BNS)和雅鲁藏布江缝

合带(IYZS)之间(Yin and Harrison, 2000)。一般认为班公湖—怒江缝合带代表了羌塘和拉萨地块在晚侏罗—早白垩世碰撞闭合后的缝合带(Wang et al., 2016)。雅鲁藏布江缝合带属于晚白垩世—早古新世新特提斯洋闭合的产物(Xu and Castillo, 2004; Zhu et al., 2013),位于东西向延伸的安第斯弧型钙碱性岩浆带的南部边界(Yin and Harrison, 2000; Zhu et al., 2013)。根据沉积覆盖和地壳基底的不同,拉萨地块可被分成北、中、南三个部分,分界线分别为狮泉河—纳木措混杂岩带(SMNZ)和洛巴堆—米拉山断裂带(LMF)(图2)(Zhu et al., 2011)。中生代岩浆岩和沉积岩广泛分布在中北拉萨地块之上(Zhu et al., 2011, 2013)。南拉萨地块主要由晚三叠世—中新世冈底斯岩基和古新世—始新世林子宗群火山岩组成(Mo et al., 2008; Ji et al., 2009; Lee et al., 2009; Kang et al., 2014; Huang et al., 2016, 2019a; 邹洁琼等, 2018; 张丽莹等, 2019),林子宗群包括下部的典中组、中部的年波组和上部的帕那组。南拉萨地块的沉积覆盖较少,主要形成时代为晚三叠世—白垩纪(Zhu et al., 2013)。印度和亚洲大陆碰撞后,在25~10 Ma拉萨地块内发育两类后碰撞岩石:埃达克质侵入岩和钾质—超钾质火山岩(Chung et al., 2005, 2009; Huang et al., 2015)。超钾质岩可能形成于交代岩石圈地幔的低程度部分熔融(Zhao et al., 2009; Huang et al., 2015),埃达克质岩广泛分布于整个南拉萨地块之上(Chung et al., 2005; Chen et al., 2011)。

本文系统总结了南拉萨地块上所有已发表的早新生代镁铁质岩石的年代学和地球化学数据(表1),它们主体形成于64~44 Ma之间,镁铁质岩石的SiO<sub>2</sub>含量均在58%以下。根据地理位置不同,将拉萨地块上目前出露的所有早新生代镁铁质岩石划分为中拉萨地块、南拉萨地块中部(87°~94°E)、南拉萨地块东部(94°E以东)3个次级单元(图3)。本文重点关注新特提斯洋板片断离的关键阶段对应的岩浆产物,即~57 Ma板内玄武岩型镁铁质岩石和~50 Ma富闪深成岩(见下文详述),它们均分布在南拉萨地块中部西段地区,分别位于昂仁县达居乡和拉孜县彭措林乡。达居镁铁质岩石为脉状出露,位于昂仁县东部约50 km处,达居地区出露地层的时代主要为侏罗纪、白垩纪、始新世和第四纪。区域内断层横切沉积地层和火山岩。区域内强烈的岩浆活动形成了侏罗—白垩纪麻木下组火山—沉积岩、林子宗群火山岩和花岗质侵入体(Chung et al.,

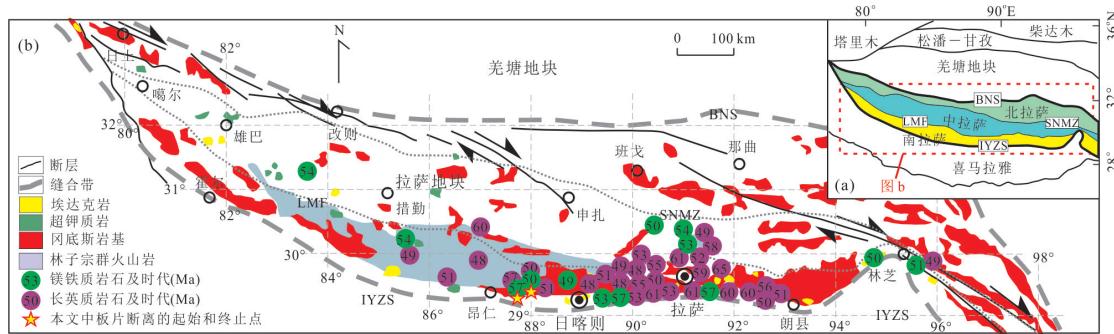


图 2 青藏高原和拉萨地块简图

Fig.2 Sketch maps of the Tibetan Plateau and the Lhasa Terrane

修改自 Zhu *et al.* (2011). 早新生代岩浆岩数据来源:岳雅慧和丁林(2006), Mo *et al.* (2008), Wen *et al.* (2008), Ji *et al.* (2009, 2012), Lee *et al.* (2009), 赵志丹等(2011), 陈晓峰等(2012), 黄丰(2015), Zhu *et al.* (2015), Huang *et al.* (2016, 2017, 2019a, 2019b), Pan *et al.* (2016), Liu *et al.* (2018), Shu *et al.* (2018), Guo *et al.* (2019), Wang *et al.* (2019b), Zhang *et al.* (2019)

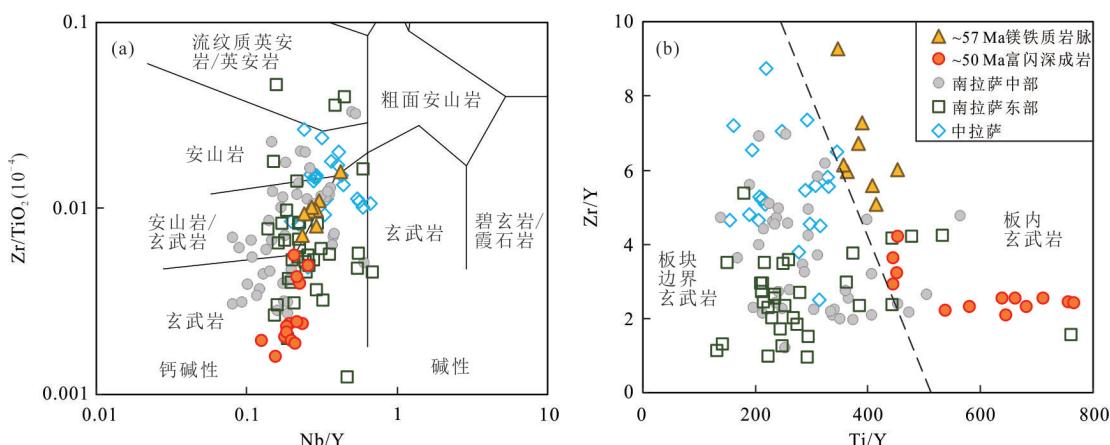
图 3 拉萨地块早新生代镁铁质岩石的  $Zr/TiO_2$ - $Nb/Y$ (a) 和  $Zr/Y$ - $Ti/Y$ (b) 图解Fig.3  $Zr/TiO_2$ - $Nb/Y$  (a) and  $Zr/Y$ - $Ti/Y$  (b) diagrams for the Early Cenozoic mafic rocks in the Lhasa Terrane

图 a 据 Winchester and Floyd (1977); 图 b 据 Pearce and Gale (1977)

2009). 达居镁铁质岩脉大小不一,但是均为东西向延伸,相互之间呈现平行关系,与雅鲁藏布江缝合带平行;它们与拉萨地块其他区域(如达孜、林周地区)出露的镁铁质岩脉延伸方向一致(岳雅慧和丁林, 2006; Huang *et al.*, 2016, 2017). 镁铁质岩脉主要侵入至花岗质和闪长质侵入体中,它们的分布和围岩成分没有关系,一般类似岩墙群分布. 这些镁铁质岩脉的宽度从几十厘米到 5 m,最大的镁铁质岩脉长达 500 m. 镁铁质岩脉样品矿物颗粒较细,为典型的辉长和辉绿结构. 达居地区同时出露大量与镁铁质岩石同时代的侵入岩体,其岩性为花岗岩、花岗闪长岩及少量的闪长岩(Huang *et al.*, 2017).

彭措林镁铁质岩石为一套富闪深成岩(角闪石>60%),地理位置在彭措林乡北部约 5 km 处,区域上广泛发育白垩纪侵入体和沉积地层. 林子宗群火山岩零星出现在研究区北部,区域内断层发育并切

过沉积地层和岩浆岩. 彭措林富闪深成岩以长约 500 m 的脉状侵入体出露地表,沿东西向倾斜延伸,其宽度为 5~20 m. 岩席主要成分为镁铁质,周围被花岗质岩体环绕,因此出现了明显的双峰式化学组成,镁铁质富闪深成岩与花岗岩为截然的接触关系(Huang *et al.*, 2019b).

在具体分析上述两套镁铁质岩石年代学、岩石成因及构造动力学的基础上,结合目前拉萨地块所有新生代早期镁铁质岩石的年代学和地球化学数据,本文初步厘定了新特提斯洋从俯冲至与印度大陆岩石圈完全脱离的构造—演化历史,重建了板片断离过程中拉萨地块下部岩石圈的物理化学结构.

### 3 喜马拉雅中段印度—亚洲大陆初始碰撞时间

大洋板块的断离过程通常发生在大陆碰撞之

表1 南拉萨地块中部早新生代镁铁质岩石数据

Table 1 The Early Cenozoic mafic magmatism in the central part of southern Lhasa Terrane

样品号	位置	岩性	年龄(Ma)	SiO <sub>2</sub> (%)	Mg <sup>#</sup>	数据来源
13DJ-04	达居	辉长岩脉	57.1±1.7	51.15	47.9	Huang <i>et al.</i> (2017)
13DJ-05	达居	辉长岩脉	57.4±0.9	53.42	46.7	Huang <i>et al.</i> (2017)
15DJ-07	达居	辉长岩脉	55.9±0.9	50.70	54.0	Huang <i>et al.</i> (2017)
16PCL-13	彭措林	富闪深成岩	50.8±0.4	46.57	52.5	Huang <i>et al.</i> (2019b)
16PCL-07	彭措林	富闪深成岩	51.1±0.5	44.83	43.5	Huang <i>et al.</i> (2019b)
15XTM53	仁钦则	闪长岩包体	50.4±0.4	56.23	47.5	Shu <i>et al.</i> (2018)
T041F	日喀则	玄武安山岩	49.3±1.2	52.25	41.8	Lee <i>et al.</i> (2009)
T044C	南木林	石英闪长岩	48.3±1.2	52.10	48.2	Wen <i>et al.</i> (2008)
T047	南木林	玄武岩	44.0±0.8	50.87	42.0	Lee <i>et al.</i> (2009)
06FW175	Karu	闪长岩	52.6±1.2	57.57	45.6	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW174	Karu	闪长岩	50.2±1.5	56.45	43.6	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW152-2	Qulin	闪长岩	57.3±0.9	53.49	46.8	Ji <i>et al.</i> (2012)
ST147A	尼木	石英闪长岩	50.6±0.7	53.87	48.4	Wen <i>et al.</i> (2008)
T1031	尼木	苏长岩	57.3±0.9	54.00	62.8	Wang <i>et al.</i> (2019b)
06FW176	尼木	闪长岩	53.6±1.0	54.48	42.0	Ji <i>et al.</i> (2012)
T1034	尼木	辉长岩	57.3±0.9	49.82	63.2	Wang <i>et al.</i> (2019b)
ST152A	曲水	石英辉长岩	52.7±1.4	49.75	53.9	Wen <i>et al.</i> (2008)
06FW151	曲水	闪长岩	55.5±1.2	56.09	45.1	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW146	曲水	二长闪长岩	56.9±1.4	52.88	47.8	Ji <i>et al.</i> (2012)
T0594	曲水	辉长岩	54.2±1.7	50.54	67.9	Wang <i>et al.</i> (2019b)
16TB-33	曲水	辉长苏长岩	50.3±2.0	51.15	53.0	Wang <i>et al.</i> (2019a)
16TB-46	曲水	辉长苏长岩	51.6±1.2	52.80	51.6	Wang <i>et al.</i> (2019a)
16TB-42	曲水	石英闪长岩	53.0±1.9	55.13	48.2	Wang <i>et al.</i> (2019a)
T083C	拉萨西	玄武岩	43.2±1.6	50.85	37.5	Lee <i>et al.</i> (2009)
06FW126	南木电站	花岗闪长岩	55.3±1.0	56.62	43.2	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW128	南木电站	闪长岩脉	49.9±1.0	54.99	49.9	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW129	南木	花岗闪长岩	52.9±0.7	57.43	42.4	Ji <i>et al.</i> (2012)
06FW120	聂当	闪长质包体	50.3±0.6	51.94	42.3	Ji <i>et al.</i> (2012)
ET021E	驱龙	石英辉长岩	64.0±1.4	55.05	50.9	Wen <i>et al.</i> (2008)
11DZ-21	达孜	辉长岩脉	56.8±1.7	53.23	43.7	黄丰(2015)
12DZ-07	达孜	辉长岩脉	57.6±1.2	58.44	50.2	黄丰(2015)
13DZ-10	达孜	辉长岩脉	57.4±1.2	49.21	54.3	黄丰(2015)

后,在讨论新特提斯大洋板片俯冲消亡之前首先要厘定印度—亚洲大陆的初始碰撞时间,以期对新特提斯洋岩石圈的俯冲至断离历史进行时代反演。新特提斯洋俯冲至亚洲西南的拉萨地块下部始于中生代早期(Kang *et al.*, 2014; 黄丰等, 2015),逐渐导致大洋关闭和印度—欧亚大陆之间的碰撞(Yin and Harrison, 2000; Zhu *et al.*, 2013),形成了现今广袤的青藏高原。从新特提斯洋俯冲至印度—亚洲大陆碰撞过程,拉萨地块及其南侧的喜马拉雅地块保存了大量岩浆—沉积物质记录,为探索大陆碰撞—大洋板片断离过程提供了天然的岩石样品。20世纪八十年代国外学者对喜马拉雅西侧的沉积岩石系

列进行了较为细致的研究,提出喜马拉雅西侧记录了印度—亚洲大陆碰撞的最早时间,可能发生在始新世早期(Garzanti *et al.*, 1987; Rowley, 1996),随后逐步向西迁移,整个碰撞过程持续了约15 Ma,因此是明显的穿时碰撞。早期的研究主要集中于喜马拉雅西侧,对岩浆广泛出露的喜马拉雅中东部地区碰撞时间的研究尤为不足。

21世纪以来,随着分析技术的提高和野外考察更加深入,对印度—亚洲初始碰撞时间的研究逐渐清晰,尤其是对便于抵达的喜马拉雅中段地区,岩浆活动—沉积物源和古地磁给出了非常精确的大陆初始碰撞年龄限制。林子宗群火山岩序列一直

被认为代表了印度—亚洲同碰撞过程的产物,其形成时代为 65~45 Ma,表明印度—亚洲大陆碰撞开始于新生代早期,可能包括了早期的“软碰撞”(70~65 Ma)和晚期的“硬碰撞”(45~40 Ma)2 个阶段(Mo *et al.*, 2007). Cai *et al.* (2011) 对特提斯喜马拉雅晚白垩世沉积物源的分析揭示了印度—亚洲碰撞的起始阶段在 70~65 Ma. Yi *et al.* (2011) 对特提斯喜马拉雅古新世大洋沉积物的古地磁研究结果显示,特提斯喜马拉雅中部与拉萨地体的初次接触发生 60.5 Ma 之前. 日喀则弧前盆地沉积岩中的碎屑锆石记录揭示了亚洲大陆碎屑沉积物在 ~60 Ma 开始进入印度大陆边缘,暗示印度—亚洲大陆在拉萨地块中部的碰撞发生在 ~60 Ma (Wu *et al.*, 2014). 此外,在海沟环境中记录到的从印度到亚洲沉积物来源的突变记录也显示印度和亚洲在 ~60 Ma 已经有物质交换,表明此时 2 个大陆已经开始碰撞(DeCelles *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015). Hu *et al.* (2016) 研究认为,从喜马拉雅西部到中东部,海相到河流相的沉积演化和物源变化是同步的,由此提出印度—亚洲大陆碰撞可能发生在 ~60 Ma,且不存在所谓的穿时性.

有学者提出,印度与亚洲大陆的碰撞时间可能较晚,如 ~35 Ma (Aitchison *et al.*, 2007), 这很难解释为什么在 ~60 Ma 印度和亚洲大陆已经发生了物质交换. 也有部分学者指出,高原是由亚洲大陆与喜马拉雅微地块或洋内弧先进行碰撞,然后与印度大陆进行二次碰撞后形成的(van Hinsbergen *et al.*, 2012; Bouilhol *et al.*, 2013);但是目前在广泛发育新生代早期岩浆活动的南拉萨地块中部地区,还未发现明显的洋内弧碰撞痕迹,同时对于喜马拉雅地块的属性仍然存在争议,二阶段碰撞模式可能仅限于局部地区.Ding *et al.* (2017) 总结了目前关于印度—亚洲大陆碰撞时间的研究,确定了印度—亚洲大陆碰撞首先发生在喜马拉雅中段,而后向东西两侧迁移. 本文认为印度和亚洲大陆在喜马拉雅中段的碰撞发生在 65~60 Ma.

#### 4 板内岩浆记录最早的新特提斯洋板片断离过程

什么类型的岩浆作用代表了新特提斯洋板片断离的开始仍不清楚,新特提斯洋的北向俯冲及随后的印度—亚洲大陆碰撞导致高原南部长期处于挤压的动力学背景下. 当板内玄武岩开始出现时,可能代表

了构造体制的转换. 前人采用 Zr—Zr/Y 图解对拉萨地块内的板内玄武岩组成进行区分,发现了位于林周盆地 52.9 Ma(岳雅慧和丁林, 2006) 和当雄地区 54 Ma 的镁铁质岩石(赵志丹等, 2011), 它们被解释为代表了碰撞后伸展、新特提斯洋板片断离的产物. 本文统计了拉萨地块上所有早新生代镁铁质岩石数据( $\text{SiO}_2 < 58\%$ ), 采用 Zr/Y—Ti/Y 双微量元素比值可能比 Zr—Zr/Y 图解对板内玄武岩的区分更好. 从图 3 中可以看出,尽管它们绝大多数都落在钙碱性区域,但是在固定 Ti/Y 比值的情况下,达居镁铁质岩石显示了更高的 Zr/Y 比值,更加符合板内玄武岩的特征. 同时,达居镁铁质岩石具有更高且稳定的 Th/U 比值(4.2±0.4),这也与弧玄武岩不同(2.4±0.8; Wang *et al.*, 2007). 对达居镁铁质岩脉的研究揭示它们形成于 ~57 Ma, 显示了明显不同于板块边界玄武岩的微量元素特征(图 3, 图 4), 这也是目前在拉萨地块上发现的最早的新生代板内玄武岩,可能代表了印度—亚洲大陆碰撞以来最早与伸展有关的幔源岩浆记录.

达居镁铁质样品显示了亏损至稍微富集的 Nd 同位素组成(图 5), 却显示了非放射性和放射产生的 Hf 同位素组成, 其最低和最高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为 -5.5 和 10.1(图 6), 表明达居地区存在富集和亏损两类地幔物质组成. Ji *et al.* (2009) 和 Chu *et al.* (2011) 认为在 50 Ma 左右  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值迅速从正值变为负值是由于印度大陆地壳的俯冲作用,但是达居镁铁质岩石的这种地球化学特征不可能是由印度大陆俯冲造成的. 首先,现今横跨喜马拉雅至拉萨地块的地震反射剖面显示,印度地壳进入雅鲁藏布江缝合带北部的厚度最多 15 km (Gao *et al.*, 2016); 如果这个估计是正确的,印度大陆物质不可能在 57 Ma 时影响亚洲大陆. 其次, Huang *et al.* (2015) 基于对后碰撞超钾质岩石的 Re-Os 同位素分析, 提出印度大陆物质直到中新世之前还未俯冲到亚洲岩石圈地幔之下. 最后,印度大陆基底的 Sr 和 Nd 同位素组成高度富集( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.73 \sim 0.78$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -14 \sim -19$ ) (Ahmad *et al.*, 2000), 混入来自印度大陆的物质后会使达居镁铁质岩浆具有高度富集的 Sr-Nd 同位素组成,而不是实际显示的亏损同位素特征. 因此,笔者推测南拉萨地块达居地区下部长期存在着古老的岩石圈地幔物质组成. 镁铁质样品中含有较多古老的继承锆石,它们均显示了负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和元古代的 Hf 亏损地幔模式年龄,与后碰撞过程中钾质—超钾质岩揭示的同位素模式年龄类似(Zhao *et*

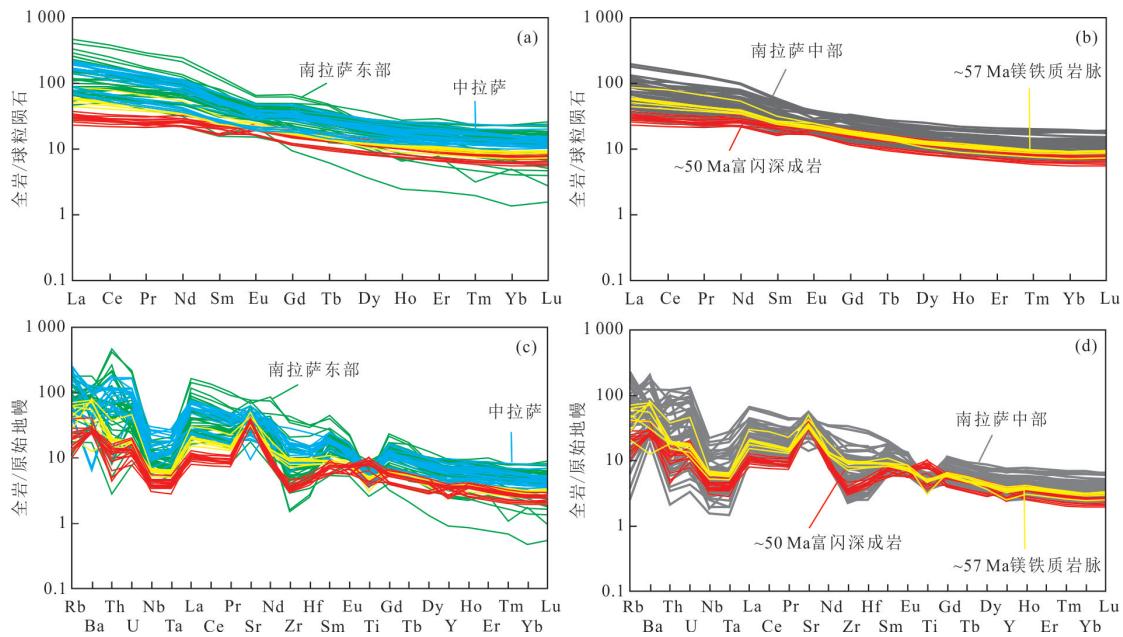


图4 拉萨地块早新生代镁铁质岩石的球粒陨石标准化REE分配模式(a、b)和原始地幔标准化多元素图解(c、d)

Fig.4 Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns (a, b) and primitive-mantle-normalized multi-element patterns (c, d) for the Early Cenozoic mafic rocks in the Lhasa Terrane

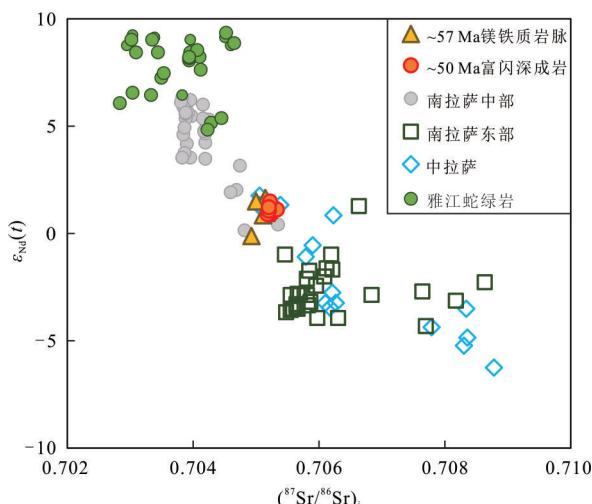


图5 拉萨地块早新生代镁铁质岩石的Sr-Nd同位素组成

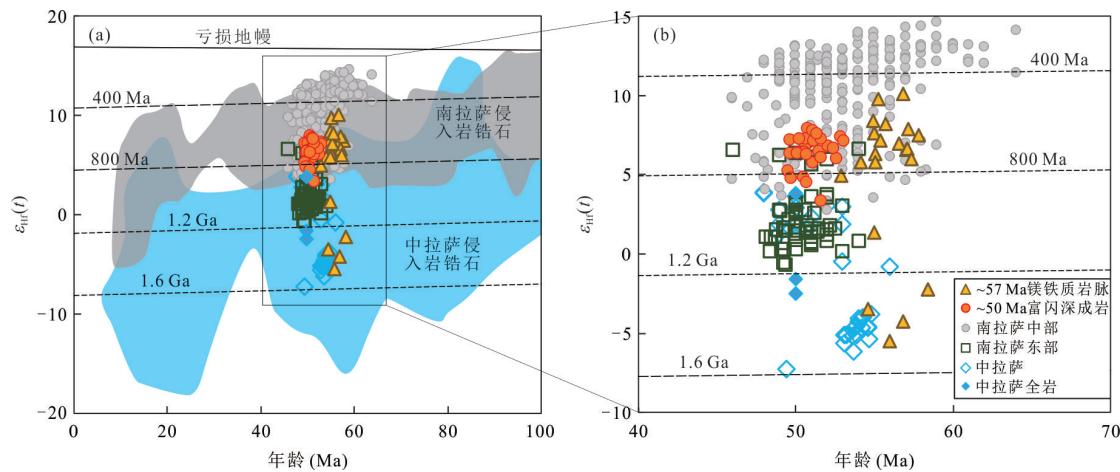
Fig. 5  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  for the Early Cenozoic mafic rocks in the Lhasa Terrane

雅江蛇绿岩数据引自 Mahoney *et al.* (1998) 和 Xu and Castillo (2004)

*al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2015), 它们也揭示了南拉萨地块下部存在古老的岩石圈物质。

达居镁铁质岩脉大多数样品显示了明显亏损的锆石 Hf 同位素 (图 6), 具有亏损的 Sr 同位素组成和年轻的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄 ( $T_{\text{DM}} < 1.0 \text{ Ga}$ ), 表明它们主体源自于一个新生的地幔源区。因

此, 单独的古老而富集的岩石圈地幔不可能形成目前所看到的这些达居岩脉的成分, 暗示它们的形成还有来自亏损软流圈地幔源区的贡献。达居镁铁质岩脉显示了板内玄武岩类似的地球化学特征, 板内镁铁质岩浆通常被认为源自上涌的软流圈地幔和岩石圈地幔 (Chung *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2015)。上涌的软流圈地幔是诱发上覆岩石圈发生部分熔融作用的关键, 由此形成具有亏损 Sr-Nd-Hf 同位素组成的达居镁铁质岩脉和伴生的长英质侵入体。软流圈地幔的降压部分熔融而形成的岩浆在上升后很可能与上部的岩石圈地幔发生相互作用 (Gao *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2015), 而达居地区下覆的大陆岩石圈地幔也很可能被板片相关的流体或熔体交代改造。因此, 达居镁铁质岩脉复杂的地球化学组成是多源区混合的产物, 包括了软流圈和之前被俯冲交代改造过的岩石圈地幔的相互作用。在拉萨东部的达孜和联乡地区, 甚至出现了代表亏损软流圈部分熔融的直接产物——MORB 型镁铁质岩石 (Gao *et al.*, 2008; Tian *et al.*, 2020), 这也说明软流圈在新生代早期发生过上涌事件。达居镁铁质岩石大多表现出略微富集的 LREE 模式 (图 4), 表明部分熔融的深度较浅。Huang *et al.* (2017) 采用  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$  与  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  的关系确定了这些镁铁质岩石的源区主要为较浅的尖晶石相地幔源区, 含有少量石榴石贡献。简单的二元混合过程模拟结果显示, 10%~20% 的古老岩石圈地幔物质混入至

图 6 拉萨地块早新生代镁铁质岩石的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — $t$  图解Fig.6 Plots of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — $t$  for Early Cenozoic mafic rocks in the Lhasa Terrane

南拉萨和中拉萨地块侵入岩锆石 Hf 同位素数据引自 Zhang et al. (2019)

亏损地幔源区,便会展开类似达居镁铁质岩脉的 Sr–Nd 同位素组成 (Huang et al., 2017).

大量新生代早期镁铁质岩脉在地表出露为东西向延伸,可能反映了伸展环境下的深部地幔物质上涌,类似于藏南林周、达孜地区的镁铁质岩脉 (岳雅慧和丁林, 2006; Huang et al., 2016). 只有岩石圈足够薄 (约 80 km) 时干的软流圈才会发生部分熔融 (McKenzie and Bickle, 1988). 因此,板内型镁铁质岩浆的出现以及软流圈与岩石圈地幔的相互作用表明,藏南岩石圈局部已经发生减薄,促进了软流圈地幔的减压熔融. 这就需要一种能够解释大陆碰撞环境中产生岩石圈减薄和伸展的动力机制. 在新生代早期印度和亚洲大陆碰撞后不久,达居地区的镁铁质岩脉和伴生的花岗岩类岩石的形成和侵位可能源自初始的板片断离过程 (图 7). 板片断离通常发生在大陆碰撞的早期阶段,由于大洋板片拖拽的大陆岩石圈具有高的浮力导致俯冲速率的降低,二者的密度差导致大洋和大陆岩石圈发生脱离. 印度和亚洲大陆的汇聚速率从 170 mm/a 迅速下降到 100 mm/a (Lee and Lawver, 1995),这几乎与板片断离事件同时. 在俯冲大洋岩石圈板片撕裂的初始阶段,热的软流圈地幔会顺着板片窗上涌,导致上覆的岩石圈地幔出现暂时性的热异常,诱发软流圈和交代岩石圈地幔的部分熔融作用,从而形成了具有板内岩浆特征的瞬时性岩浆作用 (van de Zedde and Wortel, 2001; Ferrari, 2004). 随后,随着大洋岩石圈板片的裂隙逐渐增大,分离的板片下沉增多,上覆的大陆岩石圈会因为浮力向上反弹. 最后,板片下沉速度加快,上覆岩石圈持续向上回升 (Gvirtzman, 2002). 本文的镁铁质岩脉具有较短的

岩浆形成时间,同时具有板内型玄武岩的地球化学特征,表明板片断离很可能在 57 Ma 开始. 尽管在该时期内只有少量的镁铁质岩浆作用被报道,相似的岩浆也发育在中、南拉萨地块,如林周和达孜地区 (岳雅慧和丁林, 2006; Gao et al., 2008; 贾黎黎等, 2013; Zhu et al., 2015; Huang et al., 2016). 同时期内与板片断离事件相关的花岗岩类岩石的广泛发育,表明地幔上涌过程非常普遍,可能也代表了板片断离作用的开始 (图 2). 当新特提斯洋板片完全断离后,上涌的软流圈带来了大量的热异常,促进了急剧的上覆岩石圈地幔和地壳的部分熔融,由此诱发了大约发生在 55~50 Ma 的岩浆大爆发作用 (Wen et al., 2008; Ji et al., 2009; Lee et al., 2009; Zhu et al., 2015).

大洋板片断离通常伴随着显著的地壳抬升,由此导致地表沉积环境的转变 (Sinclair, 1997; Ferrari, 2004; Schildgen et al., 2014; Sevin et al., 2014). 最近, Zhu et al. (2017) 在综合岩石地球化学分析重建冈底斯弧的基础上,根据地壳均衡计算结果提出藏南在 55~45 Ma 便已经达到了 >4 000 m 的海拔. 该假说与通过对 60~50 Ma 的 C–O 同位素研究获得的 4 000 ± 500 m 的海拔结果基本一致 (Ding et al., 2014). 随着地壳抬升,在藏南也出现了大量东西向延伸的火山—沉积盆地 (如林周和南木林盆地) (Ding et al., 2014; Huang et al., 2016). 此外, 日喀则弧前沉积的停止时间为 58~54 Ma (Orme et al., 2015). 上述证据均表明新特提斯洋板片断离发生在新生代早期. ~57 Ma 的板内镁铁质岩石代表了目前在拉萨地块内发现的最早的挤压向伸展体制转变的岩浆产物,很可能是新特提斯洋板片初始断离过程的岩浆响应.

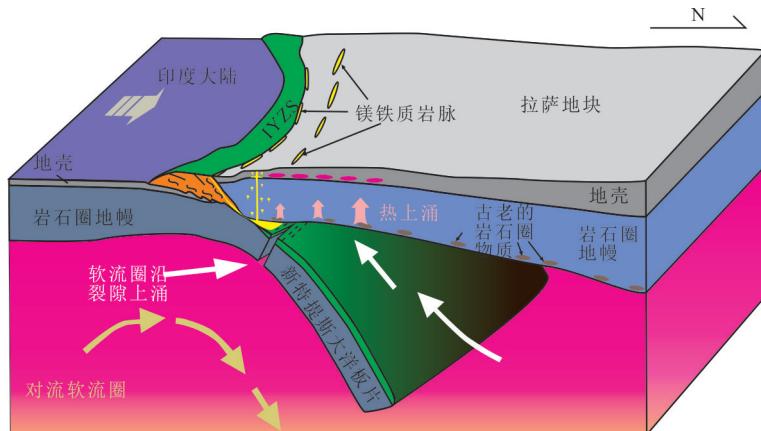
图7 拉萨地块早新生代( $\sim 57$  Ma)新特提斯洋板片初始断离及岩浆活动的概念图

Fig.7 A conceptual diagram illustrating the tectonic position of magmatic rocks in the Lhasa Terrane during the Early Cenozoic ( $\sim 57$  Ma)

据 Huang et al. (2017) 修改

## 5 新特提斯洋板片断离后深部持续脱水的岩浆响应

虽然新特提斯洋板片初始断离发生在 $\sim 57$  Ma,但是岩浆大爆发处于 $55\sim 50$  Ma,这之间存在明显的滞后.而拉萨地块中段地区的大陆碰撞则主要发生在 $65\sim 60$  Ma,这些广泛分布于拉萨地块的新生代岩浆岩的成因机制是否与大洋俯冲阶段的岛弧岩浆具有一致性仍是一个值得商榷的问题.目前对于大陆同碰撞时期的岩浆形成机制未能达成统一意见,部分学者认为它们主要源自大洋地壳在角闪岩相下的脱水熔融(Mo et al., 2008),另一部分学者认为它们是大陆碰撞和随后板片断离过程的自然结果(Wen et al., 2008; Ji et al., 2009; Lee et al., 2009; Zhu et al., 2015),但是对于其具体形成过程尚未进行详细讨论.迄今为止,对印度—亚洲大陆碰撞过程中的拉萨地块下覆岩石圈地幔熔融的物理化学条件的研究仍然非常有限.主要因为拉萨地块内新生代广泛分布的是中酸性火成岩,而镁铁质火成岩较罕见;另外的原因是缺少合适的研究载体对岩浆过程进行深入探讨,从而解码深部地幔组成.

南拉萨地块彭措林地区的富闪深成岩与周边花岗岩均形成于 $\sim 50$  Ma,斜长石—角闪石矿物的平衡温压计结果显示它们具有两组不同的压力和温度条件: $\sim 500$  MPa、 $800$  °C以及 $\sim 300$  MPa、 $730$  °C,对应中地壳( $\sim 16$  km)和上地壳( $\sim 10$  km)两个深度结晶.这些富闪深成岩中不同类型的角闪石和斜长石为深入探索岩石圈内部的物理化学条件提供了很好的机会.基性岩浆中结晶的斜长石常伴有橄榄石、斜方辉石和单斜辉石等镁铁质矿物,但是彭措林富闪深成岩中没有发现橄榄石和辉石,可能是由于橄榄石和辉石在富水熔体中转变成角闪石(Murphy, 2013).相平衡实验表明,当温度低于 $1000$  °C时,随着水压( $P_{H_2O}$ )的增加,角闪石的稳定性会比橄榄石和辉石更大(Murphy, 2013).与彭措林富闪深成岩中的基性斜长石平衡的熔体含有 $2\% \sim 4\%$ 的水含量(Sisson and Grove, 1993),这与水饱和的镁铁质弧岩浆的水含量类似.富水环境还可能抑制斜长石结晶和促进橄榄石、单斜辉石分离的作用.另一种可能性是,当亏损的地幔熔体从源区上升至侵位处的过程中,矿物的密度不同会导致熔体中的橄榄石、辉石与斜长石分离.采用矿物密度计算公式获得的与富闪深成岩岩浆平衡的橄榄石和辉石均比其中斜长石的密度大(Huang et al., 2019a, 2019b).橄榄石和单斜辉石在岩浆演化过程中很可能沉入到岩浆底部而堆积,并停留在堆晶体中,斜长石开始结晶后随着熔体被带到较浅的深度.

彭措林富闪深成岩与岛弧玄武岩的地球化学特征相似(图4),表明它们的源区很可能为交代富集的岩石圈地幔.这些富闪深成岩形成在印度—亚洲大陆碰撞之后,南拉萨地块下部的地幔楔是最可能的源区.彭措林富闪深成岩的Th/Ce和Th/Yb比值较为固定,而Sr/Th和Ba/La比值变化较大,可能反映了大洋板片流体而非熔体的加入.与世界上许多基性弧岩浆显示出与板片脱水有关的高含水量一样,镁铁质富闪深成岩岩浆需要足够的水来稳定角闪石

彭措林富闪深成岩与岛弧玄武岩的地球化学特征相似(图4),表明它们的源区很可能为交代富集的岩石圈地幔.这些富闪深成岩形成在印度—亚洲大陆碰撞之后,南拉萨地块下部的地幔楔是最可能的源区.彭措林富闪深成岩的Th/Ce和Th/Yb比值较为固定,而Sr/Th和Ba/La比值变化较大,可能反映了大洋板片流体而非熔体的加入.与世界上许多基性弧岩浆显示出与板片脱水有关的高含水量一样,镁铁质富闪深成岩岩浆需要足够的水来稳定角闪石

存在,使其成为主要的铁镁质矿物(Pichavant, 2002; Murphy, 2013).富闪深成岩源自受到俯冲流体交代后的含水地幔(Zhang *et al.*, 2012; Murphy, 2013).此外,彭措林富闪深成岩中的全岩 Sr-Nd 及锆石 Hf 同位素组成相对亏损且均一(图 3, 图 7),类似拉萨地块内部其他地区的早新生代镁铁质岩石(图 5, 图 6),这表明板片流体交代地幔在区域内广泛发育.

为了更好地约束地幔源区环境,笔者重建了彭措林富闪深成岩的原始岩浆成分,再使用 ABS5 的正向模拟方法模拟岩浆形成过程(Kimura, 2017).模拟计算结果表明,彭措林富闪深成岩源于地幔橄榄岩在 2.7 GPa 压力下的部分熔融(图 8),形成于石榴石稳定域.熔体模拟结果进一步表明,板片流体中的水含量极高(16%),在 3.6 GPa 和 804 °C 的温压条件下从板片中释放出来(图 8),这与通过微量元素成分获得的结论一致.在高温高压(1 329 °C, 2.7 GPa; 图 8)条件下,较低比例的板片流体(2.5%)渗透入岩石圈地幔,发生了中等程度(9.1%)的部分熔融作用.ABS5 模型获得的初始熔体含有 4.16% 的水含量,也与全球弧玄武岩浆(Murphy, 2013)和彭措林富闪深成岩的水含量相吻合(Huang *et al.*, 2019b).因此彭措林富闪深成岩的原始岩浆是在板片流体交代后的地幔楔环境下形成的,大洋板片温度较低而地幔楔的温度较高.这表明板片断离产生了足够的热量促使富水的交代岩石圈地幔发生部分熔融,如果岩石圈下地幔已经被一些古老的俯冲作用改造,那么可能会产生更广泛的镁铁质岩浆作用.然而,在拉萨南

部地区只发现了一套富闪深成岩,与之对应的镁铁质火山岩在拉萨地区也十分罕见(岳雅慧和丁林, 2006; Mo *et al.*, 2008; 贾黎黎等, 2013; Huang *et al.*, 2017),与冈底斯带出现大量中酸性岩浆形成了鲜明的对比(Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009).此外,本文的富闪深成岩显示出均一而亏损的放射性 Sr、Nd 和 Hf 同位素组成,这与古老交代事件相矛盾,因为其将导致高 Rb/Sr、低 Sm/Nd 比值,促进富集的同位素组成(Zhang *et al.*, 2012).因此,根据地球化学模拟结果,岩石圈地幔的流体交代作用可能与新特提斯洋板片断离同时发生.

大洋板片断离往往导致岩石圈的伸展和应力释放,伴随着断裂带的形成(Atherton and Ghani, 2002).富闪深成岩的一个普遍特征是其与主要剪切带或断裂带有关,伸展环境不仅为岩浆的快速上升提供了有效的通道,而且为深成岩体的侵入创造了足够的空间(Murphy, 2013).彭措林地区断层广泛发育,这有利于新特提斯板片断离后富闪深成岩侵位至浅部地壳中.彭措林富闪深成岩记录了原始岩浆的形成、岩浆通过地壳的逐渐上升过程以及地壳内 2 个不同的岩浆结晶深度.尽管镁铁质富闪深成岩岩浆的温度和水含量相对较低,它们的底侵仍然不可避免地提供水和热能促进了大陆地壳的部分熔融(图 8).彭措林地区富闪深成岩以及其他来自于深部地幔并与板片断离相关的镁铁质岩石(图 2),由于厚的大陆地壳的存在及其高的熔体密度,往往无法上升至地表,导致了拉萨地块出露的主要为花岗岩类岩体.

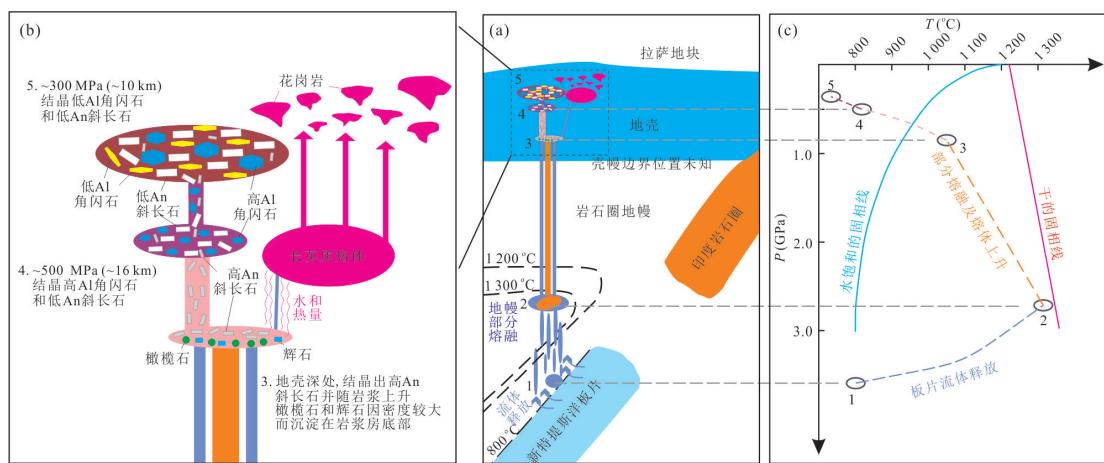


图 8 拉萨地块早新生代(~50 Ma)构造—岩浆事件的概念图

Fig.8 Conceptual diagrams illustrating the tectonic and magmatic processes in the Lhasa Terrane during the Early Cenozoic (~50 Ma)

据 Huang *et al.* (2019b) 修改

## 6 新特提斯洋板片断离的新模式

拉萨地块内部早新生代镁铁质岩脉的年龄和纬度数据显示,自~57 Ma持续到~45 Ma,南拉萨地块内部一直存在镁铁质岩浆活动(表1).对于中拉萨地块而言,镁铁质岩浆在~57 Ma开始出现后逐渐向北迁移,在55~50 Ma中拉萨地块内也爆发了大量镁铁质岩浆活动.之后随着镁铁质岩浆时代的年轻化,岩浆逐步向南迁移(图9).一般认为新特提斯洋板片回转会导至岩浆活动的完全迁移, Ma *et al.* (2013) 提出~90 Ma的紫苏花岗岩为新特提斯洋板片回转后软流圈上涌的结果,部分证据就是岩浆活动从南向北然后再向南的迁移.Zhu *et al.* (2015) 综合了拉萨地块上~80 Ma以来的中酸性岩浆数据,提出>72 Ma的岩浆活动仅集中在拉萨地块南部的少数地区,并呈现一条极窄的带状分布,在71~65 Ma向北迁移,然后在64~48 Ma重新迁移回南部,这种迁移趋势可能与印度—亚洲大陆碰撞过程中新特提斯洋的板片回转有关.本文对拉萨地块早新生代镁铁质岩石的研究结果显示,至少在57~45 Ma,南拉萨地块上广泛存在幔源岩浆活动,迁移规律仅适用于中拉萨地块,这种趋势与一般认为的新特提斯洋先发生板片回转然后断离的过程相悖.结合板内岩浆活动和富闪深成岩揭示的源区组成特征,笔者将新特提斯洋板片断离简单归纳为3个部分.

首先,俯冲的新特提斯洋在印度—亚洲大陆碰撞后,其与大陆岩石圈的密度差导致在新特提斯洋

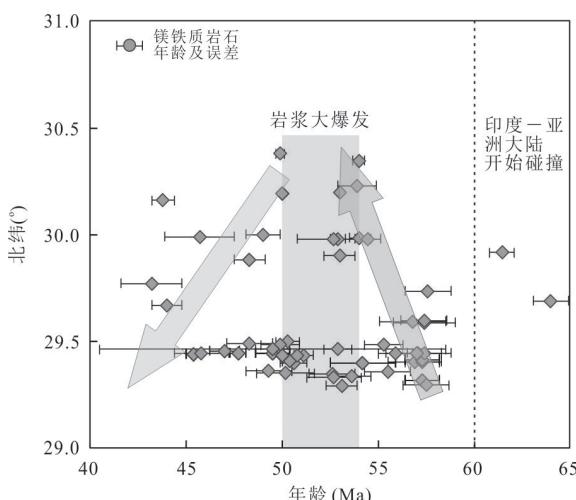


图9 拉萨地块早新生代镁铁质岩浆岩的形成时代与其分布纬度的关系

Fig. 9 The relations of ages and latitude of Early Cenozoic mafic rocks in the Lhasa Terrane

岩石圈相对薄弱带出现了板片撕裂的窗口,部分上涌的软流圈物质透过板片窗发生部分熔融或诱发了上部岩石圈地幔部分熔融,分别形成了南拉萨地块南部联乡~57 Ma N-MORB型辉长岩(Tian *et al.*, 2020)和达居~57 Ma镁铁质岩脉(Huang *et al.*, 2017),这些岩石代表了拉萨地块南部岩石圈由俯冲作用的挤压过程转变为同碰撞的伸展过程.由于发生在大陆碰撞后不久,新特提斯洋板片还未俯冲至很深的深度,因此出现的镁铁质岩石主要源自较浅的地幔源区,轻重稀土分异程度不大(图4).同一时期在南拉萨地块中东部地区,可能仍存在新特提斯洋的俯冲作用或大洋板片在角闪岩相变下脱水发生部分熔融形成林子宗群岩浆(Mo *et al.*, 2008).

其次,随着板片的继续俯冲和撕裂作用的进一步加强,上涌软流圈程度逐渐增加,幔源岩浆除在南拉萨地块出现外,逐渐在北拉萨地块开始出现,直至板片完全断离,中拉萨地块和南拉萨地块内出现同时代的镁铁质岩浆作用(图9).新特提斯洋板片断离带来的热扰动,促进了拉萨地块岩石圈发生广泛的部分熔融作用,导致了岩浆温度的升高和同位素的亏损,并出现了55~50 Ma的中酸性岩浆大爆发(Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2015).

最后,当板片完全与印度大陆岩石圈脱离后,中拉萨地块镁铁质岩浆作用减弱至消失(图9),这可能暗示新特提斯洋板片在断离之前是以高角度俯冲,因此软流圈上涌并没有持续影响到整个中拉萨地块.板片沉入深部地幔过程中,拉萨地块上出现的~50 Ma富闪深成岩表明大洋板片仍在持续脱水(Huang *et al.*, 2019b),这一过程促进了上覆岩石圈的部分熔融,可能与俯冲阶段的板片脱水类似,因此在大陆同碰撞时期形成的岩浆作用与岛弧岩浆具有相似的地球化学特征(图4).因此,大陆碰撞并不一定代表俯冲型岩浆作用的终止,大洋板片断离过程中很可能伴随与俯冲作用相关的岩石地球化学特征.

## 7 拉萨地块新生代早期的壳幔结构、组成和演化

在详细了解青藏高原南部拉萨地块的区域构造—岩浆演化历史之前,需要确定拉萨地块下部是否存在古老岩石圈组成.后碰撞钾质—超钾质岩石的Nd-Pb-Hf同位素模式年龄表明拉萨地块下存在古老岩石圈组成(Turner *et al.*, 1996; Hou *et al.*, 2015).Zhu *et al.* (2011) 提出中拉萨地块存在元古代和太古

宙的古老基底,其南北缘发育较年轻的显生宙新生地壳。Hou *et al.* (2015) 对拉萨地块进行了系统的 Hf 同位素填图,揭示了拉萨地块具有更复杂的同位素组成,不仅在中拉萨地块具有古老的物质基底,在北拉萨地块东部和南拉萨地块西部地区可能同样存在古老物质记录。新生代南拉萨地块中部主要为新生地壳组成的物质,这一事件代表了显生宙重要的地壳生长事件。这些新生地壳物质广泛的部分熔融作用需要大量的热输入,这些热可能源自底侵的镁铁质岩浆(Mo *et al.*, 2007),很可能与新特提斯洋盆板片断离后诱发的深部软流圈物质上涌有关。

值得注意的是,Ji *et al.* (2009) 和 Chu *et al.* (2011) 对青藏高原南部中酸性岩石的锆石 Hf 同位素研究显示在~50 Ma 出现了突然的富集,他们将其解释为印度大陆物质开始进入高原南部岩石圈的标志。但是 Ma *et al.* (2017) 研究认为最早可能代表印度大陆俯冲改造拉萨岩石圈组成的镁铁质岩石形成于~35 Ma,与中酸性岩石中锆石 Hf 同位素揭示的印度大陆俯冲存在约 15 Ma 的时间差,造成这一差别的原因还不得而知。Zhang *et al.* (2019) 重新统计了中拉萨和南拉萨地块侵入岩的 Hf 同位素组成,结果显示南拉萨地块在~50 Ma 并没有出现 Hf 同位素的大规模富集现象,相对而言中拉萨地块的 Hf 同位素富集表现得更加明显(图 6)。这种 Hf 同位素变化可能与新特提斯洋板片断离后引起的热扰动促进了壳幔同时发生部分熔融有关,而与印度大陆俯冲没有必然联系。南拉萨地块中部部分镁铁质样品的 Sr-Nd 落在雅江蛇绿岩范围内(图 5),表明其可能有更多的幔源物质参与。从南拉萨地块中部的镁铁质岩石的锆石 Hf 同位素组成可以看出,这些镁铁质岩石尽管具有较大的 Hf 同位素变化范围,但是呈现了一致的 Hf 同位素组成(图 6);总体而言,南拉萨地块中部具有明显亏损的地幔同位素组成特征,与中酸性岩石的 Hf 同位素填图揭示的结果一致。达居地区位于南拉萨地块中部的最西端,显示了富集的物质组成,暗示区域内可能存在被忽视的古老岩石圈组成物质;但是目前对南拉萨地块西端的早新生代镁铁质岩浆的研究还很缺乏,需要进一步研究才能限制南拉萨地块西段是否存在古老岩石圈物质组成。基于后碰撞钾质岩中斑晶单斜辉石的 Sr 同位素组成和高分辨率地震层析成像图像,Xu *et al.* (2017) 提出藏南下部地幔域中存在 2 个明显不同的岩石圈地幔域(富集和亏损)。拉萨地块东部为新生且亏损的岩石圈,西部为古老而富集岩石圈。如

果这是正确的,那么达居地区可能位于 2 个不同岩石圈地幔域的边界上,很可能保存了古老岩石圈的组成和演化信息。南拉萨地块中部达居镁铁质岩石中最富集的锆石 Hf 同位素显示了与中拉萨地块类似的组成,是否表明南拉萨地块西端局部地区与中拉萨地块具有同样的富集岩石圈地幔还需要进一步探索。

无论是中拉萨地块还是南拉萨地块东段的镁铁质岩石,均显示高的微量元素组成(图 4)和富集的 Sr-Nd 同位素组成(图 5)。中拉萨地块具有更低的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素组成(图 5, 图 6),暗示其内部存在古老的岩石圈物质组成,这些与中拉萨地块内部广泛出露的林子宗群火山岩的富集放射性同位素组成相一致。研究显示,南拉萨地块东部很可能存在古老的岩石圈物质组成(Guo *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2019),它们可能造成了新生代早期镁铁质岩石的 Sr-Nd 同位素富集现象。Wang *et al.* (2019b) 对比了南拉萨地块东部 90~30 Ma 镁铁质岩石的 Sr-Nd 同位素组成,认为南拉萨地块东部~50 Ma 镁铁质岩石的富集现象很可能与印度大陆物质加入有关。Guo *et al.* (2019) 通过对藏东大拐弯地区~50 Ma 的辉长岩和花岗岩中长石的 Pb 同位素研究,揭示了它们的源区不仅有被剥蚀的拉萨地块地壳物质贡献,同时也有印度大陆俯冲加入的印记。南拉萨地块东部新生代镁铁质岩石的锆石 Hf 同位素在富集与亏损之间浮动,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 0 左右(图 6),其源区可能涉及多个物质端元。

整个拉萨地块新生代早期的镁铁质岩石的地球化学组成和分布存在极大的不均一性,但是都出现了具有亏损同位素组成的物质端元,显示板片断离之后深部亏损地幔物质的上涌对拉萨地块上先存的岩石圈地幔进行了一定程度的改造。板片断离自~57 Ma 开始后软流圈上涌带来的热和物质逐渐增加,诱发了 55~50 Ma 的岩浆大爆发作用,破坏了现存的古老岩石圈地幔和地壳组成,促进了新生地壳的形成和保存,能够较好地解释南拉萨地块的地壳生长过程。

## 8 结论

本文通过整合分析青藏高原南部拉萨地块上出露的早新生代镁铁质岩石的年代学,元素地球化学及 Hf-Nd-Sr 同位素研究,重现了在拉萨地块中部印度—亚洲大陆发生初始碰撞后,新特提斯洋板片从~57 Ma 初始撕裂至~50 Ma 断离后持续脱水的全过

程. 大陆碰撞早期, 新特提斯洋板片的初始断离(撕裂)形成的撕裂诱发了软流圈物质上涌, 在拉萨地块南部出现代表伸展环境的板内岩浆作用. 新特提斯洋板片断离并沉入深部地幔过程中, 板片持续释放流体渗透上覆岩石圈, 岩石圈地幔和地壳的部分熔融形成了拉萨地块早新生代镁铁质和长英质岩浆岩, 一定程度上促进了大陆碰撞造山带的地壳生长.

拉萨地块内部岩石圈地幔地球化学组成在新生代早期存在极大的不均一性, 南拉萨地块中部具有新生的岩石圈地幔组成, Sr-Nd-Hf同位素组成主要表现为亏损特征. 中拉萨地块和南拉萨地块东部局部地区存在古老岩石圈物质组分, 显示了富集的Sr-Nd-Hf同位素特征. 在新特提斯洋板片断离期间, 深部地幔物质的上涌可能破坏了拉萨地块原有的岩石圈组成和结构, 局部存在古老岩石圈物质的地区可能逐步被新生岩石圈取代.

南拉萨地块西部目前并没有早新生代镁铁质岩浆岩地球化学数据报导, 难以准确限制其岩石圈组成, 从已有的中酸性岩浆岩组成来看, 其显示了富集的放射性同位素组成, 暗示很可能存在古老富集的岩石圈物质. 需要在后续的研究中加强对南拉萨地块西段镁铁质岩浆作用的研究, 进一步限制拉萨地块内部的岩石圈地幔不均一性, 确定新特提斯洋板片的俯冲和断离过程对拉萨地块西段的影响. 结合拉萨地块上已有的新生代幔源岩浆作用, 精确限制新生代时期拉萨地块下覆岩石圈地球化学组成随时空演变特征, 构建青藏高原南部深部动力学—岩浆过程的耦合关系.

致谢: 感谢许继峰教授团队的老师和研究生们, 感谢审稿人和编辑提出了宝贵意见.

## References

- Ahmad, T., Harris, N., Bickle, M. J., et al., 2000. Isotopic Constraints on the Structural Relationships between the Lesser Himalayan Series and the High Himalayan Crystalline Series, Garhwal Himalaya. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 467–477. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<0467:icotsr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<0467:icotsr>2.0.co;2)
- Aitchison, J. C., Ali, J. R., Davis, A. M., 2007. When and Where did India and Asia Collide? *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(B5): B05423. <https://doi.org/10.1029/2006jb004706>
- Altunkaynak, S., 2007. Collision-Driven Slab Breakoff Magmatism in Northwestern Anatolia, Turkey. *The Journal of Geology*, 115(1): 63–82. <https://doi.org/10.1086/509268>
- Atherton, M. P., Ghani, A. A., 2002. Slab Breakoff: A Model for Caledonian, Late Granite Syn-Collisional Magmatism in the Orthotectonic (Metamorphic) Zone of Scotland and Donegal, Ireland. *Lithos*, 62(3–4): 65–85. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00111-1](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00111-1)
- Bouilhol, P., Jagoutz, O., Hanchar, J. M., et al., 2013. Dating the India-Eurasia Collision through Arc Magmatic Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 366: 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.01.023>
- Cai, F. L., Ding, L., Yue, Y. H., 2011. Provenance Analysis of Upper Cretaceous Strata in the Tethys Himalaya, Southern Tibet: Implications for Timing of India-Asia Collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(1–2): 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.055>
- 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>
- Chen, J. L., Xu, J. F., Zhao, W. X., et al., 2011. Geochemical Variations in Miocene Adakitic Rocks from the Western and Eastern Lhasa Terrane: Implications for Lower Crustal Flow beneath the Southern Tibetan Plateau. *Lithos*, 125(3–4): 928–939. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.006>
- Chen, X. F., Zhu, L. X., Ma, S. M., et al., 2012. Chronology, Geochemistry and Petrogenesis for Nyainqntanglha Intermediate-Basic Intrusive Rocks. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(1): 112–125 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(3–4): 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.020>
- Chung, S. L., Chu, M. F., Ji, J. Q., et al., 2009. The Nature and Timing of Crustal Thickening in Southern Tibet: Geochemical and Zircon Hf Isotopic Constraints from Postcollisional Adakites. *Tectonophysics*, 477(1–2): 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.008>
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan Tectonic Evolution Inferred from Spatial and Temporal Variations in Post-Collisional Magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3–4): 173–196. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.05.001>

- Davies, J.H., von Blanckenburg, F., 1995. Slab Breakoff: A Model of Lithosphere Detachment and Its Test in the Magmatism and Deformation of Collisional Orogenes. *Earth and Planetary Science Letters*, 129(1–4): 85–102. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)00237-s](https://doi.org/10.1016/0012-821x(94)00237-s)
- DeCelles, P. G., Ducea, M. N., Kapp, P., et al., 2009. Cyclicity in Cordilleran Orogenic Systems. *Nature Geoscience*, 2(4): 251–257. <https://doi.org/10.1038/ngeo469>
- DeCelles, P. G., Kapp, P., Gehrels, G. E., et al., 2014. Paleocene–Eocene Foreland Basin Evolution in the Himalaya of Southern Tibet and Nepal: Implications for the Age of Initial India–Asia Collision. *Tectonics*, 33(5): 824–849. <https://doi.org/10.1002/2014tc003522>
- Ding, L., Maksatbek, S., Cai, F. L., et al., 2017. Processes of Initial Collision and Suturing between India and Asia. *Science China Earth Sciences*, 60(4): 635–651. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5244-x>
- Ding, L., Xu, Q., Yue, Y. H., et al., 2014. The Andean-Type Gangdese Mountains: Paleoelevation Record from the Paleocene–Eocene Linzhou Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 392: 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.01.045>
- Ducea, M. N., Paterson, S. R., DeCelles, P. G., 2015. High-Volume Magmatic Events in Subduction Systems. *Elements*, 11(2): 99–104. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.99>
- Ferrari, L., 2004. Slab Detachment Control on Mafic Volcanic Pulse and Mantle Heterogeneity in Central Mexico. *Geology*, 32(1): 77–80. <https://doi.org/10.1130/g19887.1>
- Fox, M., Herman, F., Kissling, E., et al., 2015. Rapid Exhumation in the Western Alps Driven by Slab Detachment and Glacial Erosion. *Geology*, 43(5): 379–382. <https://doi.org/10.1130/g36411.1>
- Gao, R., Lu, Z. W., Klemperer, S. L., et al., 2016. Crustal-Scale Duplexing beneath the Yarlung Zangbo Suture in the Western Himalaya. *Nature Geoscience*, 9(7): 555. <https://doi.org/10.1038/ngeo2730>
- Gao, Y.F., Hou, Z.Q., Wei, R.H., et al., 2006. The Geochemistry and Sr–Nd–Pb Isotopes of Basaltic Subvolcanics from the Gangdese: Constraints on Depleted Mantle Source for Post-Collisional Volcanisms in the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 547–557 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. F., Wei, R. H., Hou, Z. Q., et al., 2008. Eocene High-MgO Volcanism in Southern Tibet: New Constraints for Mantle Source Characteristics and Deep Processes. *Lithos*, 105(1–2): 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.02.008>
- Garzanti, E., Baud, A., Mascle, G., 1987. Sedimentary Record of the Northward Flight of India and Its Collision with Eurasia (Ladakh Himalaya, India). *Geodinamica Acta*, 1(4–5): 297–312. <https://doi.org/10.1080/09853111.1987.11105147>
- Guo, L., Zhang, H. F., Harris, N., et al., 2016. Late Devonian–Early Carboniferous Magmatism in the Lhasa Terrane and Its Tectonic Implications: Evidences from Detrital Zircons in the Nyingchi Complex. *Lithos*, 245: 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.018>
- Guo, L., Zhang, H. F., Harris, N., et al., 2019. Tectonic Erosion and Crustal Relamination during the India–Asian Continental Collision: Insights from Eocene Magmatism in the Southeastern Gangdese Belt. *Lithos*, 346–347: 105161. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105161>
- Guo, X. Y., Gao, R., Zhao, J. M., et al., 2018. Deep-seated Lithospheric Geometry in Revealing Collapse of the Tibetan Plateau. *Earth–Science Reviews*, 185: 751–762. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.013>
- Gvirtzman, Z., 2002. Partial Detachment of a Lithospheric Root under the Southeast Carpathians: Toward a Better Definition of the Detachment Concept. *Geology*, 30(1): 51–54. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0051:PDOALR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0051:PDOALR>2.0.CO;2)
- Hou, Z.Q., Duan, L.F., Lu, Y.J., et al., 2015. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan–Tibetan Orogen. *Economic Geology*, 110(6): 1541–1575. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.6.1541>
- Houseman, G., England, P., 1986. A Dynamical Model of Lithosphere Extension and Sedimentary Basin Formation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 91(B1): 719–729. <https://doi.org/10.1029/jb091ib01p00719>
- Hu, X., Garzanti, E., Moore, T. C., et al., 2015. Direct Stratigraphic Dating of India–Asia Collision Onset at the Selandian (Middle Paleocene,  $59 \pm 1$  Ma). *Geology*, 43(10): 859–862. <https://doi.org/10.1130/g36872.1>
- Hu, X. M., Garzanti, E., Wang, J. G., et al., 2016. The Timing of India–Asia Collision Onset—Facts, Theories, Controversies. *Earth–Science Reviews*, 160: 264–299. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.014>
- Huang, F., 2015. From Continental Collision to Intracontinental Extension: The Cenozoic Magmatism and the Geodynamics Evolution of Lhasa Terrane (Dissertation). The University of Chinese Academy of Sciences,

- Beijing (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2015. Os-Nd-Sr Isotopes in Miocene Ultrapotassic Rocks of Southern Tibet: Partial Melting of a Pyroxenite-bearing Lithospheric Mantle? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 163: 279–298. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.053>
- Huang, F., Xu, J.F., Chen, J.L., et al., 2015. Early Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of Continental Marginal Arc and Intra-oceanic Arc during the Subduction of Neo-Tethys Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2089–2100 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2016. Two Cenozoic Tectonic Events of N-S and E-W Extension in the Lhasa Terrane: Evidence from Geology and Geochronology. *Lithos*, 245: 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.014>
- Huang, F., Xu, J. F., Zeng, Y. C., et al., 2017. Slab Breakoff of the Neo-Tethys Ocean in the Lhasa Terrane Inferred from Contemporaneous Melting of the Mantle and Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 4074–4095. <https://doi.org/10.1002/2017gc007039>
- Huang, F., Li, M. J., Xu, J. F., et al., 2019a. Geodynamic Transition from Subduction to Extension: Evidence from the Geochronology and Geochemistry of Granitoids in the Sangsang Area, Southern Lhasa Terrane, Tibet. *International Journal of Earth Sciences*, 108(5): 1663–1681. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01729-3>
- Huang, F., Zhang, Z., Xu, J. F., et al., 2019b. Fluid Flux in the Lithosphere beneath Southern Tibet during Neo-Tethyan Slab Breakoff: Evidence from an Appinite-Granite Suite. *Lithos*, 344–345: 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.07.004>
- Isacks, B., Molnar, P., 1969. Mantle Earthquake Mechanisms and the Sinking of the Lithosphere. *Nature*, 223(5211): 1121–1124. <https://doi.org/10.1038/2231121a0>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3–4): 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.020>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2016. Eocene Neo-Tethyan Slab Breakoff Constrained by 45 Ma Oceanic Island Basalt-Type Magmatism in Southern Tibet. *Geology*, 44(4): 283–286. <https://doi.org/10.1130/g37612.1>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Liu, C. Z., et al., 2012. Early Eocene Crustal Thickening in Southern Tibet: New Age and Geochemical Constraints from the Gangdese Batholith. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.08.020>
- Jia, L. L., Wang, Q., Zhu, D. C., et al., 2013. Rethinking the Geodynamical Implications of the Basic Rocks from Linzhou Basin, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3671–3680 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Wilde, S. A., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Sangri Group Volcanic Rocks, Southern Lhasa Terrane: Implications for the Early Subduction History of the Neo-Tethys and Gangdese Magmatic Arc. *Lithos*, 200–201: 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.04.019>
- Keskin, M., 2003. Magma Generation by Slab Steepening and Breakoff beneath a Subduction-Accretion Complex: An Alternative Model for Collision-Related Volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 8046. <https://doi.org/10.1029/2003gl018019>
- Kimura, J. I., 2017. Modeling Chemical Geodynamics of Subduction Zones Using the Arc Basalt Simulator Version 5. *Geosphere*, 13(4): 992–1025. <https://doi.org/10.1130/ges01468.1>
- Kohn, M. J., Parkinson, C. D., 2002. Petrologic Case for Eocene Slab Breakoff during the Indo-Asian Collision. *Geology*, 30(7): 591–594. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0300591:pcfesb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0300591:pcfesb>2.0.co;2)
- 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. *Tectonophysics*, 477(1–2): 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.031>
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic Plate Reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 251(1–4): 85–138. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00023-2)
- Li, L. G., Liao, X. H., Fu, R. S., 2002. Slab Breakoff Depth: A Slowdown Subduction Model. *Geophysical Research Letters*, 29(3): 1041. <https://doi.org/10.1029/2001gl013420>
- Liu, A. L., Wang, Q., Zhu, D. C., et al., 2018. Origin of the ca. 50 Ma Linzizong Shoshonitic Volcanic Rocks in the Eastern Gangdese Arc, Southern Tibet. *Lithos*, 304–307: 374–387. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.017>
- Ma, L., Kerr, A. C., Wang, Q., et al., 2019. Nature and

- Evolution of Crust in Southern Lhasa, Tibet: Transformation from Microcontinent to Juvenile Terrane. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7): 6452–6474. <https://doi.org/10.1029/2018jb017106>
- Ma, L., Wang, Q., Li, Z. X., et al., 2017. Subduction of Indian Continent beneath Southern Tibet in the Latest Eocene (~35 Ma): Insights from the Quuguosha Gabbros in Southern Lhasa Block. *Gondwana Research*, 41: 77–92. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.02.005>
- Ma, L., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2013. Late Cretaceous (100–89 Ma) Magnesian Charnockites with Adakitic Affinities in the Milin Area, Eastern Gangdese: Partial Melting of Subducted Oceanic Crust and Implications for Crustal Growth in Southern Tibet. *Lithos*, 175–176: 315–332. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.006>
- Ma, L., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2015. Late Cretaceous Back-Arc Extension and Arc System Evolution in the Gangdese Area, Southern Tibet: Geochronological, Petrological, and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Evidence from Dagze Diabases. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9): 6159–6181. <https://doi.org/10.1002/2015jb011966>
- Ma, X., Xu, Z., Meert, J. G., 2016. Eocene Slab Breakoff of Neotethys as Suggested by Dioritic Dykes in the Gangdese Magmatic Belt, Southern Tibet. *Lithos*, 248–251: 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.008>
- Mahoney, J. J., Frei, R., Tejada, M. L. G., et al., 1998. Tracing the Indian Ocean Mantle Domain through Time: Isotopic Results from Old West Indian, East Tethyan, and South Pacific Seafloor. *Journal of Petrology*, 39(7): 1285–1306. <https://doi.org/10.1093/petrology/39.7.1285>
- McKenzie, D., Bickle, M. J., 1988. The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere. *Journal of Petrology*, 29(3): 625–679. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.625>
- 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. *Lithos*, 96(1–2): 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.005>
- Mo, X. X., Niu, Y. L., Dong, G. C., et al., 2008. Contribution of Syncollisional Felsic Magmatism to Continental Crust Growth: A Case Study of the Paleogene Linzizong Volcanic Succession in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1–4): 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.003>
- Murphy, J. B., 2013. Appinite Suites: A Record of the Role of Water in the Genesis, Transport, Emplacement and Crystallization of Magma. *Earth-Science Reviews*, 119: 35–59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.002>
- Orme, D. A., Carrapa, B., Kapp, P. A., 2015. Sedimentology, Provenance and Geochronology of the Upper Cretaceous–Lower Eocene Western Xigaze Forearc Basin, Southern Tibet. *Basin Research*, 27(4): 387–411. <https://doi.org/10.1111/bre.12080>
- Owens, T. J., Zandt, G., 1997. Implications of Crustal Property Variations for Models of Tibetan Plateau Evolution. *Nature*, 387(6628): 37–43. <https://doi.org/10.1038/387037a0>
- Pan, F. B., Zhang, H. F., Xu, W. C., et al., 2016. U-Pb Zircon Dating, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of Mafic Intrusive Rocks in the Motuo, SE Tibet Constrain on Their Petrogenesis and Tectonic Implication. *Lithos*, 245: 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.011>
- 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.jseas.2011.12.018>
- Pearce, J. A., Gale, G. H., 1977. Identification of Ore-Deposition Environment from Trace-Element Geochemistry of Associated Igneous Host Rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 7(1): 14–24. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1977.007.01.03>
- Pichavant, M., 2002. Physical Conditions, Structure, and Dynamics of a Zoned Magma Chamber: Mount Pelée (Martinique, Lesser Antilles Arc). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(B5): 2093. <https://doi.org/10.1029/2001jb000315>
- Rowley, D. B., 1996. Age of Initiation of Collision between India and Asia: A Review of Stratigraphic Data. *Earth and Planetary Science Letters*, 145(1–4): 1–13. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(96\)00201-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(96)00201-4)
- Schildgen, T. F., Yıldırım, C., Cosentino, D., et al., 2014. Linking Slab Break-Off, Hellenic Trench Retreat, and Uplift of the Central and Eastern Anatolian Plateaus. *Earth-Science Reviews*, 128: 147–168. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.11.006>
- Schoonmaker, A., Kidd, W. S. F., Bradley, D. C., 2005. Foreland–Forearc Collisional Granitoid and Mafic Magmatism Caused by Lower-Plate Lithospheric Slab Break-off: The Acadian of Maine, and Other Orogens. *Geology*,

- 33(12): 961—964. <https://doi.org/10.1130/g21832.1>
- Sevin, B., Cluzel, D., Maurizot, P., et al., 2014. A Drastic Lower Miocene Regolith Evolution Triggered by Post Obduction Slab Break-Off and Uplift in New Caledonia. *Tectonics*, 33(9): 1787—1801. <https://doi.org/10.1002/2014tc003588>
- Shu, C. T., Long, X. P., Yin, C. Q., et al., 2018. Continental Crust Growth Induced by Slab Breakoff in Collisional Orogenes: Evidence from the Eocene Gangdese Granitoids and Their Mafic Enclaves, South Tibet. *Gondwana Research*, 64: 35—49. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.004>
- Sinclair, H. D., 1997. Flysch to Molasse Transition in Peripheral Foreland Basins: The Role of the Passive Margin versus Slab Breakoff. *Geology*, 25(12): 1123—1126. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)0251123:ftm-tip>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)0251123:ftm-tip>2.3.co;2)
- Sisson, T. W., Grove, T. L., 1993. Experimental Investigations of the Role of  $H_2O$  in Calc-Alkaline Differentiation and Subduction Zone Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143—166. <https://doi.org/10.1007/bf00283225>
- Tian, Y., Huang, F., Xu, J., et al., 2020. Neo-Tethyan Slab Tearing Constrained by Paleocene N-MORB-Like Magmatism in the Southern Tibet. *Geological Journal*, <http://doi.org/10.1002/gj.3937>
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., et al., 1996. Post-Collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts. *Journal of Petrology*, 37(1): 45—71. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.1.45>
- van de Zedde, D. M. A., Wortel, M. J. R., 2001. Shallow Slab Detachment as a Transient Source of Heat at Midlithospheric Depths. *Tectonics*, 20(6): 868—882. <https://doi.org/10.1029/2001tc900018>
- van den Beukel, J., 1992. Some Thermomechanical Aspects of the Subduction of Continental Lithosphere. *Tectonics*, 11(2): 316—329. <https://doi.org/10.1029/91tc01039>
- van der Voo, R., Spakman, W., Bijwaard, H., 1999. Tethyan Subducted Slabs under India. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(1): 7—20. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00131-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00131-4)
- van Hinsbergen, D. J. J., Lippert, P. C., Dupont-Nivet, G., et al., 2012. Greater India Basin Hypothesis and a Two-Stage Cenozoic Collision between India and Asia. *PNAS*, 109(20): 7659—7664. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117262109>
- van Hunen, J., Allen, M. B., 2011. Continental Collision and Slab Break-Off: A Comparison of 3-D Numerical Models with Observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1—2): 27—37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.035>
- Wang, B., Wang, L., Chung, S., et al., 2016. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Insights from the Geochronology and Geochemistry of Mafic Rocks within Ophiolites. *Lithos*, 245: 18—33. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.016>
- Wang, R. Q., Qiu, J. S., Yu, S. B., et al., 2019a. Magma Mixing Origin for the Quxu Intrusive Complex in Southern Tibet: Insights into the Early Eocene Magmatism and Geodynamics of the Southern Lhasa Subterrane. *Lithos*, 328: 14—32. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.019>
- Wang, Y. F., Zeng, L. S., Gao, J. H., et al., 2019b. Along-Arc Variations in Isotope and Trace Element Compositions of Paleogene Gabbroic Rocks in the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Lithos*, 324—325: 877—892. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.11.036>
- Wang, X. C., Li, X. H., Li, W. X., et al., 2007. ca. 825 Ma Komatiitic Basalts in South China: First Evidence for  $>1\,500\,^{\circ}\text{C}$  Mantle Melts by a Rodonian Mantle Plume. *Geology*, 35(12): 1103—1106. <https://doi.org/10.1130/g23878a.1>
- Wen, D. R., Liu, D., Chung, S., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Gangdese Batholith and Implications for Neotethyan Subduction in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 252(3—4): 191—201. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.003>
- 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., Ji, W. Q., Wang, J. G., et al., 2014. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints on the Onset Time of India-Asia Collision. *American Journal of Science*, 314 (2): 548—579. <https://doi.org/10.2475/02.2014.04>
- Xu, B., Griffin, W. L., Xiong, Q., et al., 2017. Ultrapotassic Rocks and Xenoliths from South Tibet: Contrasting Styles of Interaction between Lithospheric Mantle and Asthenosphere during Continental Collision. *Geology*, 45(1): 51—54. <https://doi.org/10.1130/g38466.1>
- Xu, J. F., Castillo, P. R., 2004. Geochemical and Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Tethyan Asthenosphere: Implications for the Origin of the Indian Ocean Mantle

- Domain. *Tectonophysics*, 393(1–4): 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.028>
- Yi, Z. Y., Huang, B. C., Chen, J. S., et al., 2011. Paleomagnetism of Early Paleogene Marine Sediments in Southern Tibet, China: Implications to Onset of the India–Asia Collision and Size of Greater India. *Earth and Planetary Science Letters*, 309(1–2): 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.07.001>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan–Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yue, Y.H., Ding, L., 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology, Geochemical Characteristics and Genesis of the Linzhou Basic Dikes, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 855–866 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.Y., Huang, F., Xu, J.F., et al., 2019. Petrogenesis and Geochemistry of Meso-Cenozoic Granitic Rocks and Implication of Crustal Structure Changes in Shannan Area, Southern Tibet. *Earth Science*, 44(6): 1822–1833 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Xue, F.H., Yuan, L.L., et al., 2012. Late Permian Appinite–Granite Complex from Northwestern Liaoning, North China Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 155: 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.09.002>
- Zhang, Y. H., Cao, H. W., Hollis, S. P., et al., 2019. Geochronology, Geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf Isotopes of the Early Paleogene Gabbro and Granite from Central Lhasa, Southern Tibet: Petrogenesis and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 61(7): 868–894. <https://doi.org/10.1080/00206814.2018.1476187>
- Zhao, Z.D., Mo, X.X., Dilek, Y., et al., 2009. Geochemical and Sr–Nd–Pb–O Isotopic Compositions of the Post-Collisional Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and Implications for India Intra-Continental Subduction beneath Southern Tibet. *Lithos*, 113(1–2): 190–212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.004>
- Zhao, Z.D., Zhu, D.C., Dong, G.C., et al., 2011. The ~54 Ma Gabbro–Granite Intrusive in Southern Dangxung Area, Tibet: Petrogenesis and Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3513–3524 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Wang, Q., Cawood, P. A., et al., 2017. Raising the Gangdese Mountains in Southern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 214–223. <https://doi.org/10.1002/2016jb013508>
- Zhu, D. C., Wang, Q., Zhao, Z. D., et al., 2015. Magmatic Record of India–Asia Collision. *Scientific Reports*, 5(1): 14289. <https://doi.org/10.1038/srep14289>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429–1454. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.002>
- Zou, J.Q., Yu, H.X., Wang, B.D., et al., 2018. Petrogenesis and Geological Implications of Early Jurassic Grano-diorites in Renqinze Area, Central Part of Southern Lhasa Subterrane. *Earth Science*, 43(8): 2795–2810 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈晓锋, 朱立新, 马生明, 等, 2012. 念青唐古拉中基性侵入岩年代学、地球化学及岩石成因. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(1): 112–125.
- 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 等, 2006. 冈底斯基性次火山岩地球化学和Sr–Nd–Pb同位素: 碰撞后火山作用亏损地幔源区的约束. *岩石学报*, 22(3): 547–557.
- 黄丰, 2015. 从大陆碰撞到陆内伸展: 拉萨地块新生代岩浆活动及其构造演化(博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 黄丰, 许继峰, 陈建林, 等, 2015. 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩: 特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧? *岩石学报*, 31(7): 2089–2100.
- 贾黎黎, 王青, 朱弟成, 等, 2013. 重新认识西藏林周盆地基性岩石的地球动力学含义. *岩石学报*, 29(11): 3671–3680.
- 岳雅慧, 丁林, 2006. 西藏林周基性岩脉的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学、地球化学及其成因. *岩石学报*, 22(4): 855–866.
- 张丽莹, 黄丰, 许继峰, 等, 2019. 西藏山南地区花岗质岩石成因及其对地壳结构变化的记录. *地球科学*, 44(6): 1822–1833.
- 赵志丹, 朱弟成, 董国臣, 等, 2011. 西藏当雄南部约 54 Ma 辉长岩—花岗岩杂岩的岩石成因及意义. *岩石学报*, 27(12): 3513–3524.
- 邹洁琼, 余红霞, 王保弟, 等, 2018. 南拉萨地块中部早侏罗世仁钦则花岗闪长岩成因及其地质意义. *地球科学*, 43(8): 2795–2810.