中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 6 期: 657 ~ 673
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 印度与欧亚大陆初始碰撞事件专题

岩浆岩定量限定陆-陆碰撞时间和过程的方法和实例

朱弟成[1,2*], 王青[1], 赵志丹[1]

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学科学研究院, 北京 100083;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越研究中心, 北京 100101

* E-mail: dchengzhu@163.com

收稿日期: 2016-11-28; 接受日期: 2017-04-11; 网络版发表日期: 2017-05-05
中国科学院战略性先导科技专项项目(B类)(编号: XDB03010301)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600304)和国家杰出青年科学基金项目(编号: 41225006)资助

摘要 基于板块运动的主要驱动力(俯冲带大洋板片下沉引起的板片拖拉力)和岩浆产生的三种主要机制(加流体、升温和减压), 将陆-陆碰撞过程定义为初始碰撞、正在进行的碰撞和构造转换三个阶段, 分别以正常钙碱性安山质岩浆(洋壳脱水释放流体)、向海沟方向迁移的钙碱性岩浆(洋壳脱水释放流体或升温)或小规模壳源过铝质岩浆(壳内剪切热)、板片断离诱导的大规模成分多样性岩浆作用(升温和减压)为特征. 在准确限定板片断离时间的基础上, 结合汇聚速率、板片断离深度和俯冲角度, 就可以反推陆-陆初始碰撞的时间. 拉萨地体南部冈底斯岩基岩浆活动的时空迁移规律, 及其与林子宗帕那组火山岩记录到的52~51Ma岩浆大爆发和岩浆温度增高的现象, 很可能是雅鲁藏布新特提斯大洋板片在约53Ma开始断离的结果, 由此限定的印度-亚洲初始碰撞时间为约55~54Ma, 接近于各种地质现象限定的印度-亚洲初始碰撞时间(60~55Ma). 将这一方法应用于阿拉伯-欧亚大陆碰撞带的土耳其南部Bitlis造山带, 获得的阿拉伯-欧洲大陆初始碰撞时间为约29~22Ma, 与最近根据磷灰石裂变径迹年龄(约20Ma)和区域构造缩短量(约27Ma)提出的初始碰撞时间接近. 南部拉萨地体上白垩统强烈褶皱及其与上覆林子宗火山岩之间的角度不整合事件(90~69Ma), 可能是新特提斯扩张脊南侧热且年轻的俯冲洋壳与上覆岩石圈强烈耦合或新特提斯洋底高原或海山俯冲作用的结果, 与印度-亚洲大陆的初始碰撞无关. 林子宗典中组和年波组之间的角度不整合事件持续了约3Ma, 很可能标志了印度-亚洲大陆的初始碰撞. 雅鲁藏布新特提斯大洋板片断离引起的俯冲带拖拉力消失可能是导致印度大陆在约51Ma明显减速的主要原因, 现今的印度大陆北向漂移的驱动力主要来自榴辉岩化印度大陆下地壳的下沉. 印度-亚洲大陆初始碰撞后与雅鲁藏布新特提斯大洋岩石圈回转有关的高角度俯冲、拉萨地体南缘大的地壳厚度和高的海拔以及印度大陆中上地壳与下地壳、下地壳与岩石圈地幔的解耦, 可能是造成印度-亚洲碰撞带上盘岩石圈板块在60~40Ma期间发生弱变形的主要原因.

关键词 岩浆岩, 板片断离, 初始碰撞时间, 印度-亚洲碰撞, 特提斯造山带

中文引用格式: 朱弟成, 王青, 赵志丹. 2017. 岩浆岩定量限定陆-陆碰撞时间和过程的方法和实例. 中国科学: 地球科学, 47: 657–673, doi: 10.1360/N072016-00243
英文引用格式: Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D. 2017. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples. Science China Earth Sciences, 60: 1040–1056, doi: 10.1007/s11430-016-9041-x

© 2017 《中国科学》杂志社

1 引言

陆-陆碰撞标志了大陆演化过程中威尔逊旋回的结束(Wilson, 1965; Frisch等, 2011), 是控制超大陆形成和塑造全球地形-地貌的关键地质过程(Molnar和Tapponnier, 1975; Buck和Toksöz, 1983; Allen和Armstrong, 2008; van Hunen和Miller, 2015). 因此, 陆-陆碰撞的时间和过程受到了国际学术界的广泛关注. 古地磁学、沉积学和古生物学、变质岩石学和构造地质学等多学科资料被广泛地应用于限定陆-陆初始碰撞的时间(吴福元等, 2008; Najman等, 2010; Hu等, 2016a). 由于岩浆岩岩石学和地球化学资料在恢复岩浆形成的构造背景方面常具有多解性, 它们能否被有效地用来限定陆-陆碰撞的时间和过程, 目前仍然处于探索阶段(例如, Bouilhol等, 2013; Shellnutt等, 2014).

陆-陆碰撞是板块运动在汇聚板块边缘的自然结果, 陆-陆碰撞过程在本质上受控于板块运动的驱动力, 涉及洋中脊扩张、大洋板片俯冲、回转和断离等地幔动力学过程, 伴随着各具特色的岩浆活动(Davies和von Blanckenburg, 1995; Coulon等, 2002; Ferrari, 2004; van Hunen和Miller, 2015). 实验岩石学研究表明, 源区物质发生部分熔融产生岩浆的过程, 实际上就是源区物质在压力降低、温度升高和流体加入等条件下穿过固相线的过程(Wyllie, 1981; Davies和Stevenson, 1992; Furukawa, 1993; Schmidt和Poli, 1998; Gill, 2010). 因此, 在陆-陆碰撞带, 要从岩浆岩角度限定陆-陆碰撞过程, 关键在于分析不同碰撞阶段具有哪种或哪些岩浆产生的基本条件. 最近的研究从分析板块运动的驱动力和岩浆产生的基本条件入手, 通过综合印度-亚洲碰撞带上盘冈底斯岩基已有锆石U-Pb年龄、全岩地球化学数据以及林周盆地林子宗火山岩新的高质量年代学数据, 初步构建了通过岩浆岩限定印度-亚洲初始碰撞时间和过程的方法(Zhu等, 2015). 本文目的是: (1) 通过综述已有相关认识进一步完善该方法; (2) 展示印度-亚洲大陆初始碰撞时间的已有多学科(尤其是岩浆岩)研究认识; (3) 应用该方法限定青藏高原南部印度-亚洲大陆、土耳其南部Bitlis造山带阿拉伯-欧亚大陆的初始碰撞时间; (4) 尝试解释印度-亚洲大陆碰撞带晚白垩世以来的几个重要地质现象.

2 板块运动的驱动力

在大陆漂移和海底扩张研究基础上提出的板块构造理论, 现今已经得到国际地学界的普遍接受. 一般认为, 板块运动的驱动力包括洋脊推动力(ridge push; 占总驱动力的10%)和俯冲带大洋板片下沉产生的拖拉力(slab pull; 占总驱动力的90%), 后者包括直接给下沉板块施加的牵引力和夹带周围地幔与之一起下沉的吸引力(Forsyth和Uyeda, 1975; Conrad和Lithgow-Bertelloni, 2002; Stern, 2007; Faccenna等, 2013). 此外, 一些学者还认为地幔柱活动是板块运动第三种可能的驱动力, 这是由于地幔柱活动弱化了岩石圈底部并且降低了软流圈粘度, 从而促进岩石圈板块运动(Gurnis和Torsvik, 1994; Kumar等, 2007; van Hinsbergen等, 2011; Faccenna等, 2013). 考虑到地质历史上地幔柱活动的非普遍性和非连续性, 密度大的俯冲大洋板片下沉(板片拖拉力)被普遍认为是板块运动最重要的驱动力(Forsyth和Uyeda, 1975; Patriat和Achache, 1984; Conrad和Lithgow-Bertelloni, 2002; Stern, 2007).

俯冲板片的拖拉力大小受控于多种因素, 大的俯冲角度、大的下沉俯冲板片长度、老的俯冲板片(Schellart, 2004)、俯冲板片在410km(橄榄石-尖晶石过渡区)发生的橄榄石-wadleyite吸热反应(Zlotnik等, 2008)和俯冲板片榴辉岩化(Baumann等, 2010)等, 均将增大板片拖拉力.

3 陆-陆碰撞带俯冲板块的运动学行为和板片断离

在陆-陆碰撞带, 被动陆缘的大陆岩石圈板块到达海沟后, 有三种可能的运动学行为: 一是在下地壳粘度较小时, 大陆岩石圈地幔将与大陆地壳解耦并持续俯冲, 海沟后撤, 在上覆板块形成伸展背景(Magni等, 2013); 二是在下地壳粘度较大时, 大陆岩石圈地幔将与下地壳耦合在一起, 被先期俯冲的大洋板片牵引俯冲到不同深度(可到上地幔)(Chopin, 1984; Ye等, 2000; Wu等, 2009; 郑永飞等, 2015), 并因大陆岩石圈板块(密度低上浮)和大洋板片(密度大下沉)之间的不同运动学行为而发生拆离(slab detachment)或断离(slab breakoff), 导致俯冲大陆岩石圈物质折返, 海沟前进, 上覆板块水平挤压并明显缩短(Davies和von Blanckenburg, 1995; Duretz等, 2011; van Hunen和Allen, 2011; Magni等, 2012, 2013; van Hunen和Miller, 2015); 三是在下地壳粘度介于上述二者之间时, 大陆岩石

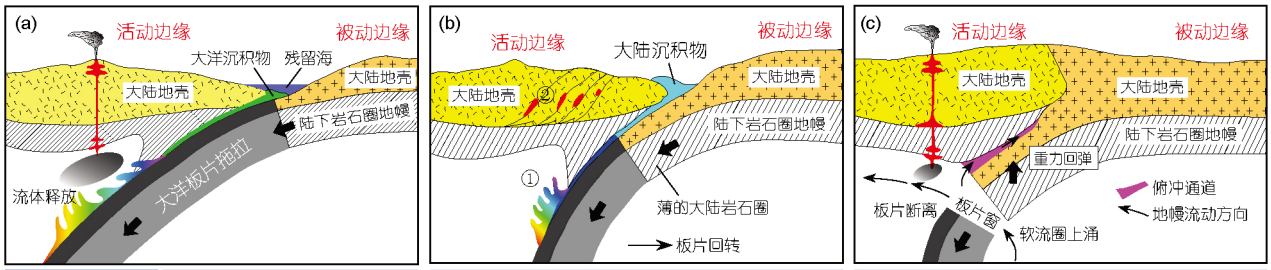
圈地幔的拆沉作用和大洋板片的断离均有可能发生(Magni等, 2013).

俯冲大陆岩石圈的流变学性质(包括温度、应力、应变和含水量等)是影响板片断离深度的重要因素, 高的流变强度和/或低的板片表面热流值将导致板片断离深度增大(Wong A Ton和Wortel, 1997; van de Zedde和Wortel, 2001; Magni等, 2013). 另外, 老的(因而冷的和流变强度高的)俯冲板片和高的汇聚速率也将增大板片断离的深度(Davies和von Blanckenburg, 1995; Baumann等, 2010). 在时间尺度上, 板片断离是一个短暂的地质过程, 从板片开始颈化到完全分离的持续时间小于4Ma, 但如果断离深度在35~200km, 持续时间将小于2Ma(Duretz等, 2012).

板片断离将导致高压-超高压岩石的剥露, 并引发上覆岩石圈板块的区域变质、伸展和快速抬升以及邻近盆地中剥蚀产物的沉积作用等(von Blanckenburg和Davies, 1995). 板片断离将形成板片窗, 板片下的软流圈物质通过板片窗发生减压熔融, 形成具有软流圈熔体性质的玄武质岩浆(Davies和von Blanckenburg, 1995; Coulon等, 2002; Ferrari, 2004; Xu等, 2008; Ji等, 2016); 同时热的软流圈物质上涌也将加热上覆地幔楔和岩石圈地幔, 引起它们部分熔融形成成分复杂的钙碱性熔体、碱性熔体和超钾质熔体(Davies和von Blanckenburg, 1995; van de Zedde和Wortel, 2001; Coulon等, 2002). 这些幔源玄武质岩浆底侵到下地壳, 导致地壳重熔形成长英质(包括A2型)熔体, 最终发育双峰式岩浆作用(Davies和von Blanckenburg, 1995; von Blanckenburg和Davies, 1995; van de Zedde和Wortel, 2001; Sui等, 2013; Chen等, 2014). 因此, 大规模具成分多样性的同期岩浆作用(包括双峰式岩浆作用、碱性岩浆作用、A2型长英质岩浆作用和具有板内玄武岩特征的镁铁质岩浆作用等)是鉴别板片断离的岩石学标志. 热力学模拟结果表明, 如果板片断离深度不超过上覆岩石圈底界面, 上涌软流圈物质将强烈地影响上覆岩石圈热结构(可使温度升高500℃), 形成的幔源岩浆作用将持续几个百万年, 地壳重熔和壳源岩浆作用将持续更长的时间(van de Zedde和Wortel, 2001).

4 岩浆岩定量限定陆-陆碰撞时间和过程的新方法

在洋-陆汇聚带, 随着大洋板片的持续俯冲, 被动陆缘岩石圈到达海沟, 并与活动陆缘的陆壳接触, 两大陆发生初始碰撞. 初始碰撞之后, 仍然存在残留海, 大洋板片仍然在俯冲. 考虑到板块运动的主要驱动力(即俯冲大洋板片下沉引起的板片拖拉力)和岩浆产生的三种主要机制(即加流体、升温和降压), Zhu等(2015)定义了陆-陆碰撞过程和岩浆响应之间的关系: (1) 初始碰撞, 岩浆作用以俯冲大洋板片脱水诱导的正常钙碱性安山质岩浆为主(图1a); (2) 正在进行的碰撞, 包



碰撞过程	初始碰撞	正在进行的碰撞	构造转换
岩浆响应	以正常钙碱性安山质岩浆作用为主	向海沟方向迁移的钙碱性岩浆活动 或 仅出现小规模壳源过铝质岩浆	a. 强烈的岩浆作用伴随成分的多样性 b. 具有板内玄武岩特征的镁铁质岩浆作用 c. 双峰式岩浆作用 d. A2型酸性岩浆作用
岩浆产生主要机制	通过俯冲的大洋岩石圈脱水产生流体	俯冲大洋岩石圈脱水产生流体 或 剪切热、小规模地幔流产生的对流热	岩石圈温度增加和软流圈压力降低

图 1 陆-陆碰撞过程与岩浆响应之间的关系

(b)中的①和②分别代表正在进行的碰撞(同碰撞)过程中岩浆产生的两种可能机制: ①, 板片回转, 楔形地幔区的地幔对流增强, 板片脱水带向海沟方向扩展, 岩浆作用强度增大并向海沟迁移; ②, 受地壳剪切热和小规模地幔对流热影响, 仅发育小规模壳源过铝质岩浆作用. 修改自Zhu等(2015)

括两种情况: 一是由于大洋板片拖拉力仍然存在, 板片持续下沉, 引起板片回转(Niu, 2014), 导致楔形地幔区的地幔对流增强(图1b中的①), 板片脱水带向海沟方向扩展, 岩浆作用强度增大并向海沟迁移, 二是在挤压条件下, 受地壳剪切热(Harris等, 1986)和小规模地幔对流热(Magni等, 2012)影响, 仅发育小规模壳源过铝质岩浆作用(图1b中的②); (3) 构造转换, 以板片断离为标志, 发育成分多样性的大规模岩浆活动(图1c). 板片断离后, 由于俯冲大洋板片拖拉力的部分或完全消失(Duretz等, 2012), 俯冲作用急剧减弱甚至停止, 汇聚速率急剧降低, 陆-陆碰撞带转入陆内演化阶段.

根据上述定义, 如果能够可靠限定大洋板片断离的时间, 那么结合汇聚速率、板片断离深度和俯冲角度, 就可以计算初始碰撞时间. 已有研究一般利用超高压变质作用的时间、超高压变质作用的深度、汇聚速率和俯冲角度等参数, 来计算初始碰撞的时间(Leech等, 2005; Donaldson等, 2013). 但问题在于, 这些超高压岩石并不一定代表了大陆俯冲到最深处的岩片, 因为俯冲最浅的岩片一般最先折返, 俯冲最深的岩片一般最后折返(郑永飞等, 2015). 因此, 利用超高压变质作用的时间和深度计算出的碰撞时间, 很可能小于真实的初始碰撞时间. 相反, 由于板片断离一般优先发生在洋陆过渡带密度差最大的位置, 代表了大陆岩石圈俯冲到了最深部, 利用板片断离的时间和深度计算获得的碰撞时间, 可能更接近真实的初始碰撞时间. 为此, Zhu等(2015)用板片断离的时间和深度, 替换原有方法中(Leech等, 2005; Donaldson等, 2013)的超高压变质作用的时间和深度, 提出了修改后的初始碰撞时间计算式(1), 从而提供了利用岩浆岩岩石学和地球化学资料定量研究陆-陆碰撞时间和过程的新方法.

$$\text{初始碰撞时间} = \frac{\text{板片断离深度}}{\text{汇聚速率} \times \text{Sin(俯冲角度)}} + \text{板片断离时间} \cdots\cdots \quad (1)$$

5 岩浆岩对印度-亚洲碰撞时间和过程的限定

5.1 印度-亚洲碰撞时间和过程的不同观点

在初始碰撞时间上, 过去40年来(尤其是2010年以来), 不同学科(包括古地磁学、沉积学和地层古生物学、变质岩石学、构造地质学和岩浆岩岩石学等)(图2)均进行了大量研究(见: Hu等, 2016a综述). 古地磁研究提出了非常宽泛的碰撞时间(65~20Ma)(图2a)和碰撞位置(5°~32°N)(图2b)(Molnar和Tapponnier, 1975; Besse等, 1984; Patriat和Achache, 1984; Klootwijk等, 1992; Lee和Lawver, 1995; Patzelt等, 1996; Aitchison等, 2007; Tan等, 2010; Yi等, 2011; van Hinsbergen等, 2012; Lippert等, 2014; Yang等, 2015a, 2015b), 沉积学和地层古生物学认为碰撞发生在70~50Ma(多数集中在60~50Ma)(图2a)(Garzanti等, 1987; Rowley, 1996; Zhu等, 2005; Clementz等, 2011; Zhang等, 2012; Hu等, 2015, 2016a和该文参考文献), 构造地质学提出的碰撞时代为65~50Ma(图2a)(Beck等, 1996; Ding等, 2005), 变质岩石学认为碰撞发生在60~50Ma(图2a)(Leech等, 2005, 2014; Donaldson等, 2013; Smit等, 2014; Ding等, 2016), 少数学者从岩浆岩岩石学角度提出印度与亚洲大陆碰撞直到约30Ma还没有发生(图2a)(St-Onge等, 2010; White等, 2012). 需要指出, 由于不同学科的研究方法和研究对象不同, 对初始碰撞的定义也有差别, 导致获得的初始碰撞时间, 要么代表了碰撞上限, 要么代表了碰撞下限(丁林等, 2017), 还可能指示了碰撞的穿时性. 因此, 对每一个获得的初始碰撞年龄数据, 都需要小心评估. 最近对不同学科研究成果的综合评估(Hu等, 2016a)表明, 与各种地质现象相符的印度-亚洲初始碰撞很可能发生在60~55Ma.

在碰撞方式上, Lee和Lawver(1995)将印度大陆运动速率在约58、44Ma的两次减小归因于印度大陆与亚洲大陆发生了软碰撞和硬碰撞. 在碰撞过程的空间序列上, 一种观点认为印度与亚洲大陆之间发生了穿时碰撞, 即碰撞先在喜马拉雅带西部Ladakh地区(约52Ma; Rowley, 1996)或中部藏南地区发生(约65Ma; Ding等, 2005), 然后再向东或向东西两端扩展; 另外一种观点认为碰撞是近于同时发生的, 即沿整个印度大陆北缘, 碰撞几乎同时发生在约56~51Ma(Zhu等, 2005; Zhang等, 2012)或59~56Ma(Hu等, 2015).

在碰撞过程的时间序列上, 虽然绝大多数学者主张印度与亚洲大陆之间仅仅发生了单次俯冲碰撞(Cai等, 2012; Zhuang等, 2015), 但2000年以来也有部分学者提出了两阶段碰撞过程(图2a), 包括印度大陆首先与新特提斯洋内弧碰撞(约55或50Ma), 然后洋内弧和印度大陆一起, 在约34或40Ma再与亚洲大陆南缘碰撞(Aitchison等, 2000, 2007; Bouilhol等, 2013), 或, 首先是特提斯喜马拉雅先与亚洲大陆碰撞(约50或55Ma), 然

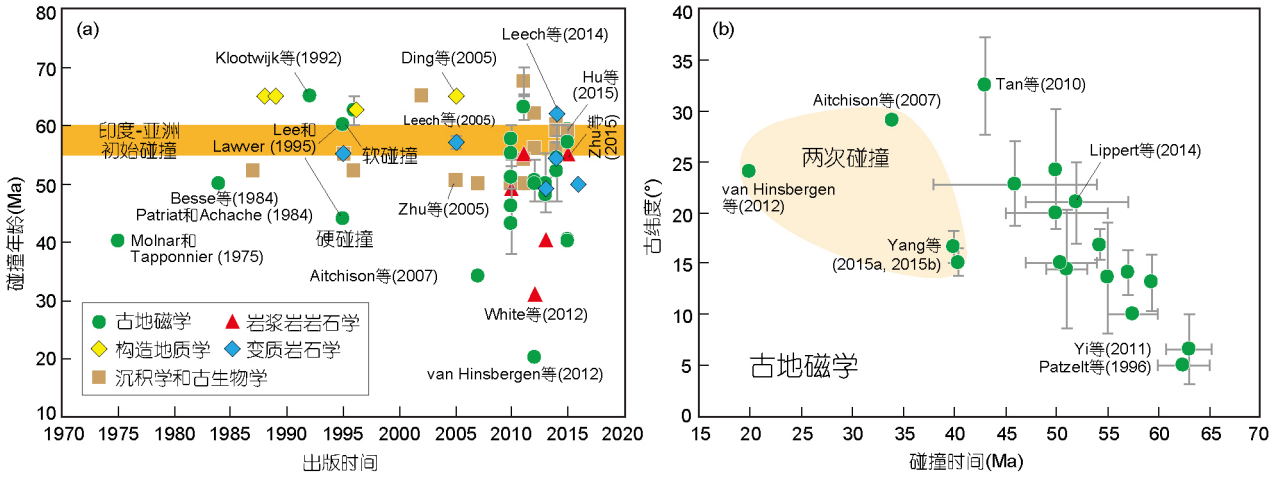


图 2　多学科提出的印度-亚洲大陆初始碰撞时间

后在约20或40Ma印度大陆再与亚洲大陆碰撞(van Hinsbergen等, 2012; Yang等, 2015a, 2015b). 但印度大陆约50Ma的沉积物并未显示正的$\varepsilon_{Nd}(0)$值和物源区在50~40Ma期间的改变, 并不支持Kohistan-Ladakh洋内弧在约50Ma首先与印度大陆发生碰撞和随后在约40Ma再与亚洲大陆发生碰撞的认识(Zhuang等, 2015). 同时约50~45Ma时喜马拉雅以南的印度大陆记录到的亚洲来源沉积物(DeCelles等, 2014; Zhuang等, 2015), 也不支持特提斯喜马拉雅和印度大陆之间存在直到40或25~20Ma才关闭的大印度盆地这一认识(van Hinsbergen等, 2012; Yang等, 2015a, 2015b).

5.2　已有岩浆岩资料限定的印度-亚洲初始碰撞时间

从岩浆岩角度, 已有研究采用了三种方法来限定印度-亚洲大陆初始碰撞的时间.

(1) "弧型"钙碱性岩浆作用的结束: 一些早期研究根据冈底斯岩基中最年轻的钙碱性岩浆岩时代(约40Ma), 认为印度-亚洲大陆碰撞直到40Ma都没有发生(Allégre等, 1984; Aitchison等, 2007). 实际上, 新的年代学和地球化学数据表明, 冈底斯岩基的钙碱性岩浆作用一直持续到21~9Ma(图3a), 并且这些钙碱性花岗岩类(如21~9Ma)在常用构造环境判别图解上仍然位于火山弧区(图3b). 这些"弧型"钙碱性岩浆作用晚于目前提出的最年轻印度-亚洲大陆碰撞时间(20Ma; van Hinsbergen等, 2012)(图3), 显然不能用来约束印度-亚洲大陆的碰撞时间(Harrison等, 2000; Chung等, 2005; Ji等, 2009a; 纪伟强等, 2009).

(2) I型向S型岩浆作用的转变: St-Onge等(2010)根据在Ladakh岩基中发现的I型花岗闪长岩(约57.7Ma)被S型淡色花岗岩(即Chumatang岩墙; 约47.1Ma)侵入的现象, 提出碰撞发生在始新世早期(约49Ma). 但White等(2011)认为, Chumatang淡色花岗岩中存在指示其为I型花岗岩的角闪石和磁铁矿, 不能用来代表俯冲型岩浆作用的结束. White等(2012)利用在喀喇昆仑岩基中发现的从I型含角闪石花岗闪长岩(约31.4Ma)向S型花岗岩(约18Ma)转换的时间, 认为雅鲁藏布新特提斯大洋岩石圈的俯冲作用一直持续到31Ma, 印度与亚洲大陆的碰撞直到31Ma都没有发生(White等, 2012). 然而, 花岗岩中的角闪石主要与熔融条件(如水含量)和岩浆过程有关, 其存在与否不能用来有效地鉴别构造环境, 如冈底斯基中一些21~9Ma花岗岩(如约17Ma的花岗闪长岩; Xu等, 2016; Yang等, 2016), 仍然含有常被认为是I型花岗岩的标志性矿物角闪石.

(3) 岩浆成分的突然变化: 岩浆产生和演化是地幔动力学和壳幔相互作用的直接结果. 因此, 如果碰撞带上覆板块(如新生和亏损的)和下伏俯冲板块(古老和富集的)同位素成分差别很大, 那么可以通过限定上覆板块岩浆成分从新生变化为古老的时间, 来反推碰撞时间(Elburg和Foden, 1998; Elburg等, 2002). 基于这种认识, 在青藏高原南部的冈底斯岩基, 一些研究者提出锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值在约55Ma倾向负的变化是由印度大陆地壳物质的卷入引起, 因而提出两大陆碰撞发生在约55Ma之前(Ji等, 2009b; Chu等, 2011), 但这一解释

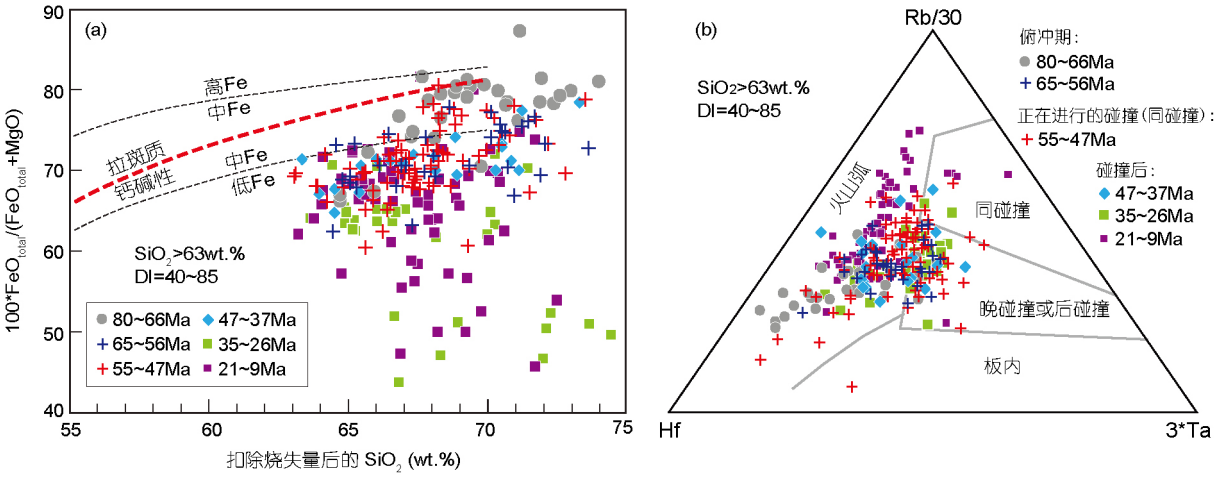


图 3　冈底斯岩基80Ma以来花岗质岩石(SiO_2>63wt.%)的岩石系列和形成环境

(a) SiO_2-FeO_{total}/(FeO_{total}+MgO)散点图(Gill, 2010), 显示几乎所有样品均属钙碱性系列岩石; (b) Rb/30-Hf-3×Ta图解(Harris等, 1986), 显示同碰撞(55~47Ma)和碰撞后(21~9Ma)样品仍然位于火山弧区域, 表明该图解至少在冈底斯岩基构造环境鉴别中是失败的. 图中已排除了经岩浆分异(分异指数DI>85)和堆晶作用(分异指数DI<40)形成的不能用来代表原生岩浆成分的样品. 图中数据参考文献同Zhu等(2017)

忽略了中部拉萨地体自身古老基底物质(Zhu等, 2009b, 2011, 2013)输入对同位素成分变化带来的影响. 在Kohistan-Ladakh岩基, 也记录到全岩$\varepsilon_{Nd}(t)$值和锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值在(50.2±1.5)Ma倾向负的变化, 被解释为指示了Kohistan-Ladakh洋内弧与印度大陆在约50Ma发生了碰撞(Bouilhol等, 2013). 但这种倾向负的变化仅仅来自一件花岗闪长岩样品(K08-13), 能否代表最早的成分变化记录尚需更多样品的进一步检验. 另外, 印度大陆地壳物质从海沟进入岛弧岩浆的源区也将持续一段时间(具体主要取决于汇聚速率), 但这一时间过程却被作者认为在定年样品的分析误差范围内(1.5Ma)而未给予考虑(Bouilhol等, 2013).

5.3　新方法对印度-亚洲初始碰撞时间的限定

现今重力和远源地震数据表明印度大陆岩石圈边缘并不存在大洋岩石圈板片(Jin等, 1996), 这意味着新特提斯大洋板片在某个时间已经从印度大陆板片断离出来. 横过西构造结帕米尔-兴都库什一线的地震层析成像观测结果, 也支持这种可能性(van der Voo等, 1999). 很早就有研究推测雅鲁藏布新特提斯大洋板片的断离发生在50~40Ma(Davies和von Blanckenburg, 1998), 并推测林子宗火山岩和冈底斯岩基同期岩浆作用可能是大洋板片断离的产物(Davies和von Blanckenburg, 1998; Yin和Harrison, 2000). 最近十多年来, 随着越来越多数据的积累, 雅鲁藏布新特提斯大洋板片发生断离的时间得到了更为细致的讨论, 并形成了三种不同观点.

(1) 约45Ma: Kohn和Parkinson(2002)根据西喜马拉雅榴辉岩的年龄(约45Ma)、高喜马拉雅淡色花岗岩的侵位时间(22~18Ma)和西藏南东部始新世富钾岩浆作用(这些作者推测为约40Ma, 但实为白垩纪-早第三纪岩浆作用; Chung等, 2003), 推测雅鲁藏布新特提斯大洋板片在约45Ma发生了断离. Chung等(2005)根据喜马拉雅带的变质记录(Kohn和Parkinson, 2002)和印度-亚洲大陆"硬碰撞"开始的时间(约44Ma; Lee和Lawver, 1995), 也赞成雅鲁藏布新特提斯大洋板片的断离时间为约45Ma. Negredo等(2007)通过测量地震层析成像结果推测的兴都库什地区印度大陆岩石圈板片的长度和通过与古地磁重建结果的比较, 估计在西喜马拉雅地区雅鲁藏布新特提斯大洋板片的断离可能发生在约48~44Ma. 最近, Ji等(2016)利用在特提斯喜马拉雅中部北缘朗山地区发现的约45Ma的OIB型辉长岩(榍石U-Pb年龄), 提出雅鲁藏布新特提斯大洋板片断离发生在约45Ma. 但需要指出: (1) 相对于锆石, 榍石的封闭温度低, 其U-Pb年龄比锆石U-Pb年龄更年轻, 常用于描述区域冷却样式和评价变质地体的*P-T-t*轨迹和冷却速率(Corfu和Stone, 1998); (2) 板片断离引起的幔源镁铁质岩浆将持续几个百万年(van de Zedde和Wortel, 2001). 因此, 朗山OIB型辉长岩的存在

很可能并非指示板片断离发生在约45Ma, 而应该是在此之前.

(2) 约50Ma: 根据Coulon等(1986)推测的白垩纪时期雅鲁藏布洋壳低角度俯冲和系统的全岩Ar-Ar定年结果, 一些研究认为新生代早期岩浆活动发生了南向迁移, 提出约50Ma发生的大规模具有成分多样性的岩浆活动是雅鲁藏布新特提斯大洋板片在约50Ma断离的结果(岳雅慧和丁林, 2006; Lee等, 2009, 2012). 后来的其他研究也提出冈底斯岩基51~46Ma的大规模岩浆作用是雅鲁藏布新特提斯大洋板片断离的产物(Ma等, 2014).

(3) 约53Ma: 最近对冈底斯岩基大量锆石U-Pb年龄数据的综合分析表明(Zhu等, 2015), 冈底斯岩基在约51Ma发生了岩浆大爆发和显著增强的镁铁质岩浆活动, 略晚于林周盆地厚约2km林子宗帕那组火山岩(52.6~52.3Ma)和具有高锆饱和温度(高达950℃)的帕那组熔结凝灰岩((52.6±0.4)Ma)的喷溢时间. 显然, 如果没有特殊的深部过程导致岩浆产生机制(即加流体、升温和降压)的改变, 雅鲁藏布新特提斯大洋板片的稳定态俯冲很难解释冈底斯岩基和林子宗帕那组火山岩记录到的52~51Ma岩浆大爆发和岩浆温度增高的现象. 考虑到冈底斯岩基岩浆活动具有从南(>72Ma)向北(71~65Ma)再向南(64~48Ma)并最后(47~38Ma)集中分布在岩基最南缘的时空迁移特点, 这种52~51Ma的岩浆大爆发和岩浆温度升高的现象被认为是板片断离的结果(Zhu等, 2015). 这与近期其他独立研究对在冈底斯岩基观察到的53~50Ma出现岩浆温度升高和岩浆成分不均一现象的解释类似(Wang等, 2015). 由于板片断离持续时间将小于2Ma(在断离深度介于35~200km时; Duretz等, 2012), 因此雅鲁藏布新特提斯大洋板片开始断离的时间很可能发生在约53Ma(Zhu等, 2015).

地球化学参数计算表明, 60~45Ma时冈底斯地壳很可能因岩浆底侵已增厚至接近60km(Zhu等, 2017), 与这种榴辉岩化地壳均衡的岩石圈地幔也必定发生了增厚(Lustrino, 2005; McKenzie和Priestley, 2008). 因此, 板片断离深度(130km; Leech等, 2005)可能未明显超过岩石圈底界面, 这就为板片断离后产生大规模岩浆作用提供了可能(van de Zedde和Wortel, 2001). 显然, 上述第一、第二种观点均无法解释冈底斯岩基和林子宗火山岩52~51Ma的岩浆大爆发和增高的岩浆温度, 因此本文采用板片断离开始发生在约53Ma这一观点反推印度-亚洲大陆的初始碰撞时间. 由于拉萨地体南缘在110~50Ma期间的古纬度可能一直未发生变化(21°±4°N)(Lippert等, 2014), 因此印度-亚洲大陆在60~50Ma期间的汇聚速率(110mm/年, Molnar和Stock, 2009; 150mm/年, van Hinsbergen等, 2011)可直接地理解为新特提斯大洋岩石圈的俯冲速率. 在这种快速俯冲条件下, 板片断离的深度将加大(Davies和von Blanckenburg, 1995; Baumann等, 2010). 采用不超过岩石圈底界面的板片断离深度(130km; Leech等, 2005)、变化的俯冲角度(60°~30°; 类似于俯冲角度变大的板片回转)和高的汇聚速率(150mm/年; van Hinsbergen等, 2011), 利用式(1)计算得到的印度-亚洲大陆的初始碰撞时间为54.7~54.0Ma. 这一初始碰撞时间与多学科约束的印度-亚洲大陆初始碰撞时间(60~55Ma)接近, 表明利用新提出的岩浆岩方法来定量限定印度-亚洲大陆初始碰撞时间是可行的. 这种结果显示, 雅鲁藏布新特提斯大洋板片可能在印度-亚洲初始碰撞之后不到2Ma就发生了板片断离, 这明显不同于地球动力学模拟提出的更长的时间间隔(30~5Ma; 见: van Hunen和Allen, 2011和该文参考文献), 造成这种不一致性的关键原因在于印度大陆北向漂移的速率太快.

6 应用新方法对阿拉伯-欧亚大陆初始碰撞时间的限定

横亘于地球中低纬度地区的特提斯造山带是地球上典型的陆-陆碰撞造山带(图4), 它是南部的印度、阿拉伯、非洲大陆北向漂移, 在不同时期与北部的亚洲-欧洲大陆发生碰撞导致介于其间的新特提斯大洋北向俯冲消亡的结果(Sengör, 1987). 与印度-亚洲大陆初始碰撞时间受到广泛关注一样, 阿拉伯何时与欧洲大陆碰撞也是长期讨论的主题. 目前提出的阿拉伯-欧亚大陆的初始碰撞时间变化于晚白垩世到上新世之间, 多数认为发生在35~20Ma (见: Okay等, 2010; McQuarrie和van Hinsbergen, 2013). 在作为阿拉伯-欧亚碰撞带一部分的土耳其南部Bitlis造山带(图4), 岩浆作用(Keskin, 2003)和地震层析成像(Zor, 2008)研究已揭示北向俯冲的新特提斯大洋板片很可能在13~11Ma发生了断离. 如果采用阿拉伯-欧亚在20~11Ma低的汇聚速率(24mm/年; McQuarrie等, 2003)、大的板片断离深度(200km; Sengör等, 2003)和变化的俯冲角度(60°~

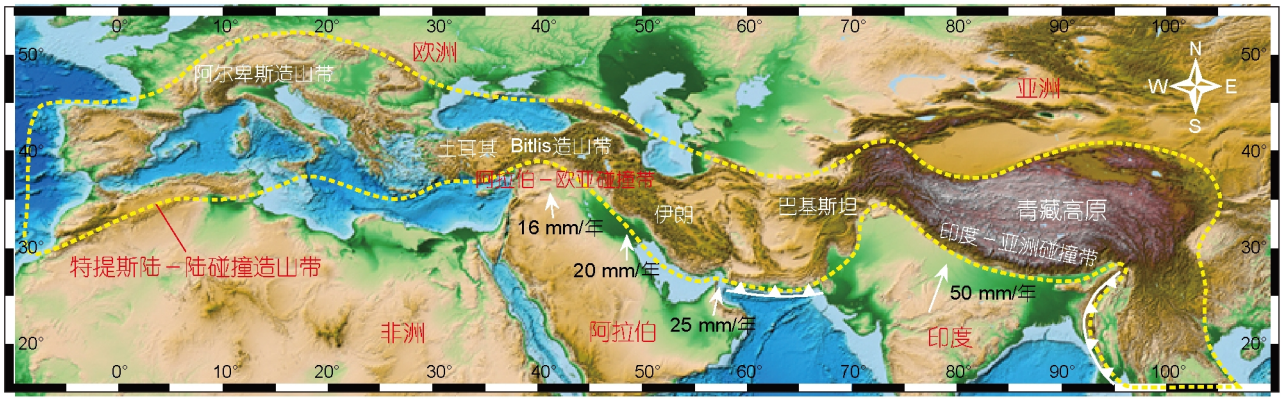


图 4　特提斯陆-陆碰撞造山带的地理位置

显示了印度-亚洲碰撞带和阿拉伯-欧亚碰撞带的位置(底图据https://www.nesdis.noaa.gov/)、印度相对于亚洲大陆的汇聚速率(Frisch等, 2011)和阿拉伯板块相对于欧亚大陆的汇聚速率(Austermann和Iaffaldano, 2013)

30°), 利用前面提出的式(1), 计算获得阿拉伯-欧亚大陆的初始碰撞时间为约28.7~21.6Ma. 这一碰撞时间与根据磷灰石裂变径迹年龄(约20Ma; Okay等, 2010)和区域构造缩短量(约27Ma; McQuarrie和van Hinsbergen, 2013)提出的初始碰撞时间接近, 表明通过板片断离反推初始碰撞时间的有效性.

7　印度-亚洲碰撞带上盘上白垩统强烈褶皱变形和林子宗火山岩的构造解释

印度-亚洲大陆初始碰撞发生在约55Ma这种解释, 面临的问题是如何理解南部拉萨地体上白垩统强烈褶皱及其与上覆林子宗火山岩之间区域性角度不整合的形成机制. 林子宗火山岩(从下到上包括典中组、年波组和帕那组)呈带状大面积分布于南部拉萨地体, 区域性角度不整合覆盖在强烈变形的上白垩统或更老地层之上(Yin和Harrison, 2000; 莫宣学等, 2003; 潘桂棠等, 2006). 对林子宗火山岩最经典的年代学和构造地质学研究集中在东部林周盆地(图5a)(莫宣学等, 2003; 周肃等, 2004; 董国臣等, 2005; He等, 2007). 早期研究根据林周盆地林子宗典中组底部安山岩(样品D-3)含过剩氩的斜长石$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄((64.4±0.6)Ma)、年波组玄武安山岩斜长石$^{40}Ar/^{39}Ar$等时线年龄((54.1±0.3)Ma)和帕那组上部钾玄质岩石(样品BD-114)的全岩$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄((43.9±0.4)Ma), 将林子宗典中组、年波组和帕那组火山岩的时代分别限定为64~60、54和50~44Ma(周肃等, 2004). 随后报道的林周盆地典中组底部流纹岩(样品SH530022)分散的LA ICP-MS锆石U-Pb年龄((68.7±2.4)Ma; He等, 2007), 一直被作为林子宗火山岩的最老时代给予引用(如: van Hinsbergen等, 2011; Huang等, 2013, 2015). 但最近对这些样品采集地更精确的SIMS锆石U-Pb定年研究表明(图5a), 林周盆地典中组最底部安山岩和流纹质角砾岩的年龄分别为(60.2±0.7)Ma和(60.2±0.8)Ma, 帕那组最顶部流纹质火山角砾岩的年龄为(52.3±0.6)Ma; 结合其他地层界线年龄数据, 林周盆地林子宗典中组、年波组和帕那组火山岩的时代被精确地标定为60.2~58.3、55.4~52.6和52.6~52.3Ma(Zhu等, 2015). 这一高精度年代学标定, 不同于最近在典中组(66~59Ma)、年波组(56~54Ma)和帕那组(54~50Ma)火山岩中获得的LA ICP-MS锆石U-Pb定年结果(图5a)(陈贝贝等, 2016). 然而, 这两项研究均从锆石U-Pb年代学上揭示出年波组与典中组之间的角度不整合的时间间隔约3Ma, 而年波组和帕那组之间的不整合在分析误差范围内不存在时间间隔, 为连续的喷发不整合(董国臣等, 2005), 不具备构造含义.

林周盆地角度不整合面之下设兴组顶部砂岩最年轻一组碎屑锆石的U-Pb年龄(约90Ma; 王建刚, 私人交流)和设兴组顶部玄武岩的$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄数据(图5a)((90.6±1.8)Ma; 李晓雄等, 2015), 将林周盆地设兴组褶皱作用和角度不整合的发育时间限定在90~60Ma. 向西约45km, 马乡角度不整合面之上的典中组底部(29°53.631′N, 90°43.449′E)安山岩SIMS锆石U-Pb年龄数据((68.9±0.6)Ma; 图5b)却将这一构造事件的时间限定在90~69Ma. 早期研究推测这一构造事件可能与一

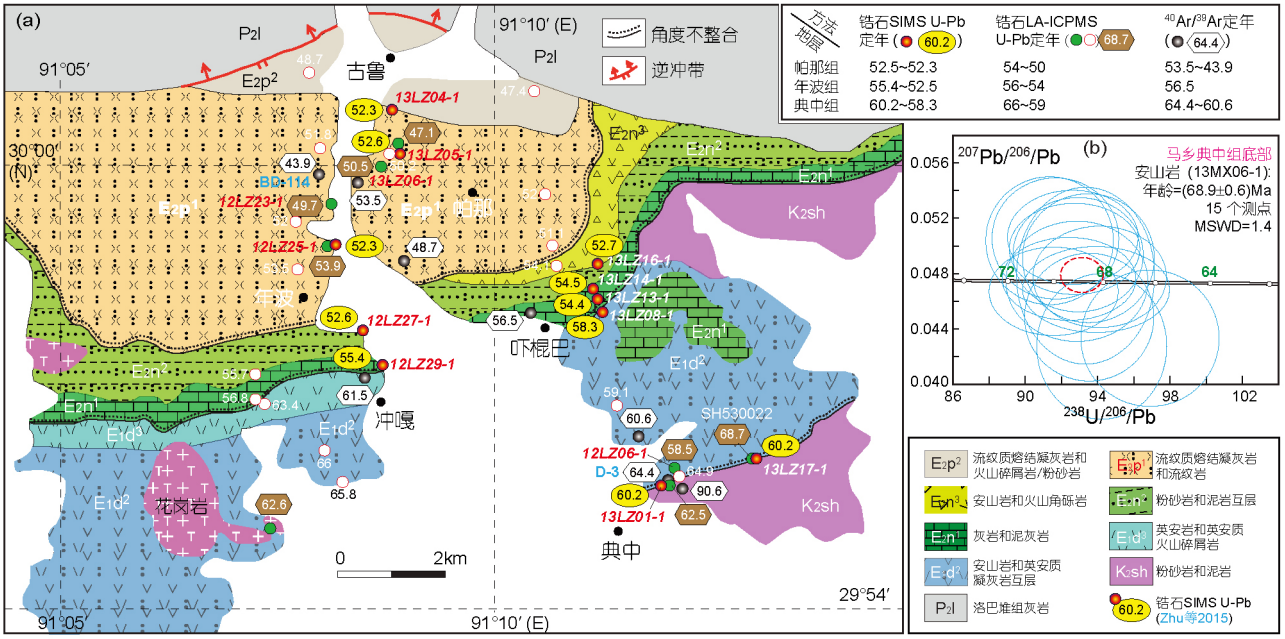


图 5　林周盆地地质图和林子宗火山岩的年代学格架

(a) 不同定年方法获得的林周盆地林子宗火山岩年龄(修改自董国臣等, 2005; Zhu等, 2015; 陈贝贝等, 2016), 其中设兴组玄武岩的$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄((90.6±1.8)Ma)据李晓雄等(2015); (b) 马乡典中组底部(29°53.631′N, 90°43.449′E)安山岩SIMS锆石U-Pb年龄

个已完全消失的岛弧向亚洲南缘的拼贴或与安第斯型俯冲造山过程有关(Allégre等, 1984), 或指示了印度-亚洲大陆的初始碰撞(莫宣学等, 2003). 但目前很少有证据显示印度-亚洲大陆的初始碰撞发生在69Ma以前(图2a), 也没有线索显示在此时发生了未知岛弧与拉萨地体的碰撞. 相反, 这一构造事件紧随着冈底斯岩基在95~90Ma的岩浆大爆发, 而这一岩浆大爆发事件近年被解释为雅鲁藏布新特提斯洋脊俯冲(Zhang等, 2010, 2011; Zhu等, 2011)或板片回转(Ma等, 2013)的结果. 本文认为, 由于冈底斯岩基岩浆作用在100~80Ma期间并未显示板片回转预期的从北向南的空间迁移趋势(Zhu等, 2015), 因此洋脊俯冲可能是更合理的一种解释. 假定新特提斯扩张脊近似平行于海沟(Seton等, 2012), 洋脊俯冲之后北侧洋壳将继续下沉, 靠近扩张脊的南侧洋壳热且年轻因而具有浮力, 俯冲角度变缓, 与上覆南部拉萨地体岩石圈之间的耦合作用(Martinod等, 2010)增强, 导致上覆岩石圈在此时期发生强烈褶皱和变形, 发育冈底斯弧后逆冲带(Kapp等, 2007). 当然, 新特提斯洋底高原或海山的俯冲也将增强其与上覆岩石圈底部的耦合作用, 导致上覆南部拉萨地体90~69Ma强烈褶皱和角度不整合的形成(即林子宗典中组与下伏地层之间的角度不整合), 但这一可能性还需要深入研究.

迄今对林子宗火山岩有三种不同的构造解释, 包括: (1) 印度-亚洲大陆初始碰撞发生在40Ma或更晚的活动大陆边缘弧型岩浆作用(Allégre等, 1984; Xu等, 1985; Coulon等, 1986; Harris等, 1988; Pearce和Mei, 1988; Aitchison等, 2007); (2) 印度-亚洲大陆初始碰撞发生在约70~65Ma的同碰撞型岩浆作用(莫宣学等, 2003; Mo等, 2008); (3) 约70~50Ma雅鲁藏布洋壳岩石圈俯冲角度变陡和约50Ma板片断离的产物(Ding等, 2003; Chung等, 2005, 2009; Lee等, 2009, 2012; 岳雅慧和丁林, 2006). 显然, 对林子宗火山岩构造含义的不同理解, 强烈地依赖于印度-亚洲大陆初始碰撞的时间. 本文注意到, 利用岩浆岩新方法获得的印度-亚洲大陆初始碰撞时间(约55Ma; Zhu等, 2015)与林周盆地年波组和下伏典中组之间的角度不整合(刘鸿飞, 1993; 董国臣等, 2005; Huang等, 2015)发育时间(58~55Ma; Zhu等, 2015)、日喀则弧前沉积结束的时间(58~54Ma; Orme等, 2015)完全一致, 因此, 典中组和年波组之间持续时间约3Ma的角度不整合(尽管规模不大)很可能才是印度-亚洲大陆初始碰撞的构造标志. 所以, 对林

子宗火山岩构造含义的新解释为: 典中组火山岩可能形成于雅鲁藏布江新特提斯大洋岩石圈俯冲晚期到印度-亚洲初始碰撞阶段, 以陆相沉积物为主的年波组下部形成于印度-亚洲大陆之间正在进行的(同)碰撞阶段, 年波组晚期和帕那组火山岩是板片断离的结果(Zhu等, 2015).

8 印度大陆在约50Ma减速的原因和现今的驱动力

无论是早期的古地磁研究(Besse等, 1984; Patriat和Achache, 1984), 还是近年基于印度大陆的应力分析(Copley等, 2010)以及大西洋和印度洋地球物理数据的数值模拟(van Hinsbergen等, 2011)结果, 均显示北向漂移的印度大陆在约51~50Ma时明显减速了. 这种减速长期以来被认为是印度-亚洲大陆碰撞的结果(Besse等, 1984; Patriat和Achache, 1984). 但众所周知, 大陆碰撞将会产生一种挤压背景, 这种背景很难满足岩浆产生的主要条件(加流体、升温和减压), 因此无法合理地解释冈底斯岩基和林子宗火山岩记录到的52~51Ma岩浆大爆发和岩浆温度增高的现象. 相反, 由于板片断离将会导致俯冲带板片拖拉力的全部或部分消失(Duretz等, 2012), 因此印度大陆在51~50Ma时的明显减速很可能是板片完全断离而不是印度-亚洲大陆发生初始碰撞的结果(Zhu等, 2015). 当然, 其他因素, 如中部和东南印度洋脊扩张速率的降低(Cande等, 2010)和印度大陆偏离德干(Deccan)地幔柱头部(van Hinsbergen等, 2011), 也可能导致此时期的印度大陆减速. 但考虑到俯冲带大洋岩石圈下沉产生的板片拖拉力是板块运动的主要驱动力(Forsyth和Uyeda, 1975; Patriat和Achache, 1984; Conrad和Lithgow-Bertelloni, 2002; Stern, 2007), 板片断离引起拖拉力的消失可能才是导致印度大陆在51~50Ma明显减速的主要原因.

通常, 在陆-陆碰撞带, 板片断离之后由于板片拖拉力的消失, 两大陆因密度低很难下沉到地幔, 相向运动将会停止(Müller, 2010). 但印度-亚洲大陆碰撞带却极为特殊, 即使在51Ma由于板片断离导致了板片拖拉力的消失, 印度大陆在50~20Ma仍然以较快速率(每年90~70mm)并在20~0Ma维持每年50~40mm的速率(图4)(van Hinsbergen等, 2011)北向漂移. 这可能有三个方面的驱动力: (1) 中部和东南印度洋脊扩张产生的洋脊推力(Cande等, 2010); (2) 印度-澳大利亚大洋岩石圈在印度大陆东侧沿印度尼西亚边缘和在印度大陆西侧沿莫克兰(Makran)边缘下沉产生的拖拉力(Li等, 2008)(图4); (3) 当大印度上地壳物质被刮擦下来形成喜马拉雅山脉之后, 高密度的大印度下地壳(密度可能高于下伏地幔)俯冲下沉产生的负浮力(Capitanio等, 2010).

本文认为第三种驱动力可能是主要的, 这是因为: (1) 中部和东南印度洋脊的扩张速率在50Ma以来每年仅有60~50mm(略高于印度大陆北向漂移的速率), 并且其扩张方向与印度大陆北向漂移的方向不一致(Cande等, 2010), 由此施加给印度大陆的洋脊推力可能较小; (2) 印度大陆东侧印度-澳大利亚大洋岩石圈沿印度尼西亚边缘的东向俯冲和西侧沿莫克兰边缘的北向俯冲(Frisch等, 2011), 与50Ma以来印度大陆的北向运动方向不一致, 将会抵消部分印度大陆北向漂移的驱动力; (3) 在54~45Ma时印度大陆北缘的中上地壳(Aikman等, 2008; Smit等, 2014)和下地壳(Zeng等, 2011)可能均已不同程度地增厚, 密度变大的榴辉岩化下地壳可能与中上地壳解耦(Gao等, 2016)而下沉, 驱动现今的印度大陆北向漂移.

9 拉萨地体南部在印度-亚洲碰撞早期(60~40Ma)没有强烈变形的原因

如前所述, 大量地质证据均显示印度-亚洲碰撞很可能发生在60~55Ma. 但拉萨地体南部同期的林子宗火山岩(60~52Ma)和日喀则弧前盆地沉积物仅发生了轻微变形(England和Searle, 1986; Yin和Harrison, 2000; 莫宣学等, 2003; 董国臣等, 2005; Mo等, 2008; Hu等, 2016b), 也没有直接证据显示69~53Ma期间拉萨地体南部的冈底斯弧(包括冈底斯岩基和林子宗火山岩)经历了明显的挤压作用. 即使冈底斯岩基内部存在推测的逆冲带, 在此时期其引起的地壳缩短规模也是有限的(Harrison等, 1992; Kapp等, 2007). 印度-亚洲碰撞带上盘岩石圈板块这种弱变形特征, 与将会导致上覆岩石圈板块水平挤压并明显缩短的海沟前进型大陆碰撞(Magni等, 2012, 2013)不同, 但与拉萨地体南缘的古地理位置在110~50Ma期间未发生明显改变的古地磁研究结果(保持在21°±4°N; Lippert等, 2014)一致. 这可能有三个方面的原因:

(1) 初始碰撞后, 雅鲁藏布大洋岩石圈持续下沉并回转(Ding等, 2003; Zhu等, 2015), 在板片拖拉力驱动下发生高角度俯冲, 在活动陆缘一侧形成伸展而非挤压背景(Cawood等, 2009), 地壳无明显缩短.

(2) 在60~53Ma时, 拉萨地体南部冈底斯弧地壳厚度大并具有高的海拔(Ding等, 2014; Zhu等, 2017), 应变速率低, 厚地壳和高海拔引起的重力位能不利于地壳缩短(England和Searle, 1986; Kapp等, 2007).

(3) 在53~40Ma时, 印度大陆中上地壳与下地壳、下地壳与岩石圈地幔均可能发生了解耦, 导致少部分中上地壳物质俯冲到拉萨地体之下(Ding等, 2016; Gao等, 2016), 大部分中上地壳物质被刮擦下来发生强烈缩短增厚形成喜马拉雅造山带(Ratschbacher等, 1994; Aikman等, 2008; Smit等, 2014; Li等, 2015), 同时增厚的下地壳和岩石圈地幔虽解耦但均继续俯冲沉入地幔(Ingalls等, 2016). 这是因为与新特提斯大洋板片连接的大印度位于古老印度大陆的北缘, 其下地壳应该具有较高的粘度, 但其经历的早白垩世大规模地幔柱型玄武岩浆的底侵(Zhu等, 2009a)很可能会降低其粘度, 导致印度大陆北缘的下地壳粘度具有过渡性质, 使得雅鲁藏布新特提斯大洋板片的断离、印度大陆岩石圈地幔从下地壳的拆离(解耦)出来并持续俯冲成为可能(Magni等, 2013). 这种拆离为幔源物质注入提供了空间, 提供的热量促使印度大陆北缘榴辉岩化下地壳发生部分熔融产生约43Ma埃达克质岩石(Zeng等, 2011), 这反过来成为支持印度下地壳与大陆岩石圈地幔可能发生拆离的岩石学证据.

10 结语

基于板块运动的主要驱动力(俯冲带大洋板片下沉引起的板片拖拉力)和岩浆产生的三种主要机制(加流体、升温和减压), 可将陆-陆碰撞过程定义为初始碰撞、正在进行的碰撞、构造转换三个阶段, 伴随着各具特色的岩浆活动. 以板片断离为标志, 陆-陆碰撞带的动力学体制发生构造转换, 进入陆内演化阶段. 利用大洋板片断离的时间、汇聚速率、板片断离深度和俯冲角度等参数, 可以定量地反推陆-陆初始碰撞的时间. 印度-亚洲碰撞带和阿拉伯-欧洲碰撞带大洋板片的断离时间很可能分别发生在约53和13~11Ma, 由此计算获得的初始碰撞时间分别为约55~54和约29~22Ma(假定俯冲角度60°~30°). 南部拉萨地体上白垩统90~69Ma强烈褶皱及其与上覆林子宗火山岩之间的角度不整合可能起因于雅鲁藏布新特提斯洋脊俯冲之后靠近扩张脊南侧热且年轻的洋壳俯冲或新特提斯洋底高原或海山的俯冲, 典中组和年波组之间的角度不整合(持续时间约3Ma)很可能标志了印度-亚洲大陆的初始碰撞, 年波组和帕那组之间的不整合为喷发不整合, 不具有构造含义. 印度大陆在51~50Ma的明显减速可能是板片断离而不是印度-亚洲大陆初始碰撞的结果, 现今的印度大陆北向漂移的驱动力主要来自榴辉岩化印度大陆下地壳的下沉. 南部拉萨地体在60~45Ma期间发生弱变形的主要原因是初始碰撞后雅鲁藏布新特提斯大洋岩石圈的高角度俯冲、拉萨地体南缘地壳厚度大海拔高以及印度大陆中上地壳与下地壳、下地壳与岩石圈地幔的解耦.

通过岩浆岩方法在印度-亚洲碰撞带和阿拉伯-欧亚碰撞带获得的陆-陆初始碰撞时间与其他学科的结果一致. 但正如利用其他学科方法限定陆-陆初始碰撞时间所具有的局限性一样(Hu等, 2016a), 岩浆岩方法也有其自身的局限性. 具体而言, 岩浆岩方法能否成功应用的关键, 在于能否确认陆-陆碰撞带发生了板片断离并准确限定板片断离的时间. 这需要: (1) 查明陆-陆碰撞带的岩浆活动是否具有指示板片回转并随后断离的空间迁移规律; (2) 地震层析成像结果是否检测到已经断离的洋壳; (3) 基于大量区域性年代学、地球化学数据约束的板片断离时间. 在这种情况下, 如果沿碰撞带活动陆缘的不同位置都能够有效地限定俯冲大洋板片断离的时间, 那么结合不同位置的汇聚速率和板片断离的深度等参数, 通过岩浆岩方法就能够定量约束碰撞是否具有穿时性.

致谢 本文研究思路的形成, 得益于与钟孙霖、Peter A. Cawood、牛耀龄和吴福元等合作者的多次讨论与交流. 感谢陈凌和胡修棉在论文撰写过程中提供的建议和帮助. 感谢两位审稿人提出的大量建设性意见. 特别感谢吴福元研究员的邀稿.

参考文献

陈贝贝, 丁林, 许强, 岳雅惠, 谢静. 2016. 西藏林周盆地林子宗群火山岩的精细年代框架. 第四纪研究, 36: 1037–1054

丁林, 蔡福龙, 王厚起, 宋培平, 纪伟强, 许强, 张利云. 2017. 印度与欧亚大陆碰撞的时限、方式和过程. 中国科学: 地球科学, 47:

293–309
董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 王亮, 周肃. 2005. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议. 地质通报, 24: 549–557
纪伟强, 吴福元, 锺孙霖, 刘传周. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 849–871
李晓雄, 江万, 梁锦海, 赵志丹, 刘栋, 莫宣学. 2015. 西藏林周盆地设兴组玄武岩地球化学特征及意义. 岩石学报, 31: 1285–1297
刘鸿飞. 1993. 拉萨地区林子宗群火山岩系的划分和时代归属. 西藏地质, 2: 15–24
莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10: 135–148
潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22: 521–533
吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. 岩石学报, 24: 1–30
郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 赵子福. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. 中国科学: 地球科学, 45: 711–735
周肃, 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 邱瑞照, 王亮亮, 郭铁鹰. 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩$^{40}Ar/^{39}Ar$年代格架. 科学通报, 49: 2095–2103
岳雅慧, 丁林. 2006. 西藏林周基性岩脉的$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学、地球化学及其成因. 岩石学报, 22: 855–866
Aikman A B, Harrison T M, Ding L. 2008. Evidence for early (>44 Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 274: 14–23
Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. 2007. When and where did India and Asia collide? J Geophys Res, 112: B05423
Aitchison J C, Badengzhu J C, Davis A M, Liu J B, Luo H, Malpas J G, McDermid I R C, Wu H Y, Ziabrev S V, Zhou M F. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). Earth Planet Sci Lett, 183: 231–244
Allégre C J, Courtillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, Schärer U, Marcoux J, Burg J P, Girardeau J, Armijo R, Gariépy C, Göpel C, Li T D, Xiao X H, Chang C F, Li G Q, Lin B Y, Teng J W, Wang N W, Chen G M, Han T L, Wang X H, Den W M, Sheng H B, Cao Y G, Zhou J, Qiu H R, Bao P S, Wang S C, Wang B X, Zhou Y X, Xu R H. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. Nature, 307: 17–22
Allen M B, Armstrong H A. 2008. Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 265: 52–58
Austermann J, Iaffaldano G. 2013. The role of the Zagros orogeny in slowing down Arabia-Eurasia convergence since ~5 Ma. Tectonics, 32: 351–363
Baumann C, Gerya T V, Connolly J A D. 2010. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff dynamics during continental collision. In: Spalla M I, Marotta A M, Gosso G, eds. Advances in Interpretation of Geological Processes: Refinement of Multi-Scale Data and Integration in Numerical Modelling. London Geol Soc Spec Publ, 322: 99–114
Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, Khan A M, Lawrence R D. 1996. Late Cretaceous ophiolite obduction and Paleocene India-Asia collision in the westernmost Himalaya. Geodin Acta, 9: 114–144
Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, Westphal M, Zhou Y X. 1984. Palaeomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture. Nature, 311: 621–626
Bouilhol P, Jagoutz O, Hanchar J M, Dudas F O. 2013. Dating the India-Eurasia collision through arc magmatic records. Earth Planet Sci Lett, 366: 163–175
Buck W R, Toksöz M N. 1983. Thermal effects of continental collisions: Thickening a variable viscosity lithosphere. Tectonophysics, 100: 53–69
Cai F L, Ding L, Leary R J, Wang H Q, Xu Q, Zhang L Y, Yue Y H. 2012. Tectonostratigraphy and provenance of an accretionary complex within the Yarlung-Zangpo suture zone, southern Tibet: Insights into subduction-accretion processes in the Neo-Tethys. Tectonophysics, 574-575: 181–192
Cande S C, Patriat P, Dyment J. 2010. Motion between the Indian, Antarctic and African plates in the early Cenozoic. Geophys J Int, 183: 127–149
Capitanio F A, Morra G, Goes S, Weinberg R F, Moresi L. 2010. India-Asia convergence driven by the subduction of the Greater Indian continent. Nat Geosci, 3: 136–139
Cawood P A, Kroner A, Collins W J, Kusky T M, Mooney W D, Windley B F. 2009. Accretionary orogens through Earth history. Geol Soc Lond Spec Publ, 318: 1–36
Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, Meng F Y, Wang Q, Santosh M, Wang L Q, Dong G C, Mo X X. 2014. Slab breakoff triggered ca. 113 Ma magmatism around Xainza area of the Lhasa Terrane, Tibet. Gondwana Res, 26: 449–463
Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences. Contrib Mineral Petrol, 86: 107–118
Chu M F, Chung S L, O'Reilly S Y, Pearson N J, Wu F Y, Li X H, Liu D Y, Ji J Q, Chu C H, Lee H Y. 2011. India's hidden inputs to Tibetan orogeny revealed by Hf isotopes of Transhimalayan zircons and host rocks. Earth Planet Sci Lett, 307: 479–486
Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, Xie Y W, Lo C H, Lee T Y, Lan C Y, Li X H, Zhang Q, Wang Y Z. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Sci Rev, 68: 173–196

Chung S L, Liu D, Ji J, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q, Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. Geology, 31: 1021–1024

Clementz M, Bajpai S, Ravikant V, Thewissen J G M, Saravanan N, Singh I B, Prasad V. 2011. Early Eocene warming events and the timing of terrestrial faunal exchange between India and Asia. Geology, 39: 15–18

Conrad C P, Lithgow-Bertelloni C. 2002. How mantle slabs drive plate tectonics. Science, 298: 207–209

Copley A, Avouac J P, Royer J Y. 2010. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate: Implications for the forces driving plate motions. J Geophys Res, 115: B03410

Corfu F, Stone D. 1998. The significance of titanite and apatite U-Pb ages: Constraints for the post-magmatic thermal-hydrothermal evolution of a batholithic complex, Berens River area, northwestern Superior Province, Canada. Geochim Cosmochim Acta, 62: 2979–2995

Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. 1986. Mesozoic and cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar-^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. Earth Planet Sci Lett, 79: 281–302

Coulon C, Megartsi M, Fourcade S, Maury R C, Bellon H, Louni-Hacini A, Cotten J, Coutelle A, Hermitte D. 2002. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline volcanism during the Neogene in Oranie (Algeria): Magmatic expression of a slab breakoff. Lithos, 62: 87–110

Davies J H, Stevenson D J. 1992. Physical model of source region of subduction zone volcanics. J Geophys Res, 97: 2037–2070

Davies J H, von Blanckenburg F. 1995. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. Earth Planet Sci Lett, 129: 85–102

Davies J H, von Blanckenburg F. 1998. Thermal controls on slab breakoff and the rise of high-pressure rocks during continental collisions. In: Hacker B R, Liou J G, eds. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Springer Science+Business Media Dordrecht. 97–115

DeCelles P G, Kapp P, Gehrels G E, Ding L. 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: 824–849

Ding H X, Zhang Z M, Dong X, Tian Z L, Xiang H, Mu H C, Gou Z B, Shui X F, Li W C, Mao L J. 2016. Early Eocene (c. 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: Constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 435: 64–73

Ding L, Kapp P, Deng W M. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. J Petrol, 44: 1833–1865

Ding L, Kapp P, Wan X Q. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. Tectonics, 24: TC3001

Ding L, Xu Q, Yue Y H, Wang H Q, Cai F L, Li S. 2014. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene-Eocene Linzhou Basin. Earth Planet Sci Lett, 392: 250–264

Donaldson D G, Webb A A G, Menold C A, Kylander-Clark A R C, Hacker B R. 2013. Petrochronology of Himalayan ultrahigh-pressure eclogite. Geology, 41: 835–838

Duretz T, Gerya T V, May D A. 2011. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response. Tectonophysics, 502: 244–256

Duretz T, Schmalholz S M, Gerya T V. 2012. Dynamics of slab detachment. Geochem Geophys Geosyst, 13: Q03020

England P, Searle M. 1986. The Cretaceous-tertiary deformation of the Lhasa Block and its implications for crustal thickening in Tibet. Tectonics, 5: 1–14

Elburg M, Foden J. 1998. Temporal changes in arc magma geochemistry, northern Sulawesi, Indonesia. Earth Planet Sci Lett, 163: 381–398

Elburg M A, van Leeuwen T, Foden J Muhardjo. 2002. Origin of geochemical variability by arc-continent collision in the Biru Area, Southern Sulawesi (Indonesia). J Petrol, 43: 581–606

Faccenna C, Becker T W, Conrad C P, Husson L. 2013. Mountain building and mantle dynamics. Tectonics, 32: 80–93

Ferrari L. 2004. Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. Geology, 32: 77–80

Forsyth D, Uyedaf S. 1975. On the relative importance of the driving forces of plate motion. Geophys J Int, 43: 163–200

Frisch W, Meschede M, Blakey R C. 2011. Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building. Heidelberg: Springer. 207

Furukawa Y. 1993. Magmatic processes under arcs and formation of the volcanic front. J Geophys Res, 98: 8309–8319

Gao R, Lu Z W, Klemperer S L, Wang H Y, Dong S W, Li W H, Li H Q. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya. Nat Geosci, 9: 555–560

Garzanti E, Baud A, Mascle G. 1987. Sedimentary record of the northward flight of India and its collision with Eurasia (Ladakh Himalaya, India). Geodin Acta, 1: 297–312

Gill R. 2010. Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide. Malaysia: Wiley-Blackwell. 428

Gurnis M, Torsvik T H. 1994. Rapid drift of large continents during the late Precambrian and Paleozoic: Paleomagnetic constraints and dynamic models. Geology, 22: 1023–1026

Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteris-

tics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Ries A C, eds. Collision Tectonics. London Geol Soc Spec Publ, 19: 67–81

Harris N B W, Ronghua X, Lewis C L, Chengwei J. 1988. Plutonic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci, 327: 145–168

Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Yin A. 1992. Raising Tibet. Science, 255: 1663–1670

Harrison T M, Yin A, Grove M, Lovera O M, Ryerson F J, Zhou X H. 2000. The Zedong Window: A record of superposed Tertiary convergence in southeastern Tibet. J Geophys Res, 105: 19211–19230

He S, Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M. 2007. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet. Tectonophysics, 433: 15–37

Hu X M, Garzanti E, Moore T, Raffi I. 2015. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59±1 Ma). Geology, 43: 859–862

Hu X M, Garzanti E, Wang J, Huang W, An W, Webb A. 2016a. The timing of India-Asia collision onset—Facts, theories, controversies. Earth-Sci Rev, 160: 264–299

Hu X M, Wang J G, BouDagher-Fadel M, Garzanti E, An W. 2016b. New insights into the timing of the India-Asia collision from the Paleogene Quxia and Jialazi formations of the Xigaze forearc basin, South Tibet. Gondwana Res, 32: 76–92

Huang W, Dupont-Nivet G, Lippert P C, van Hinsbergen D J J, Hallot E. 2013. Inclination shallowing in Eocene Linzizong sedimentary rocks from Southern Tibet: Correction, possible causes and implications for reconstructing the India-Asia collision. Geophys J Int, 194: 1390–1411

Huang W T, Dupont-Nivet G, Lippert P C, van Hinsbergen D J J, Dekkers M J, Waldrip R, Ganerød M, Li X C, Guo Z J, Kapp P. 2015. What was the Paleogene latitude of the Lhasa terrane? A reassessment of the geochronology and paleomagnetism of Linzizong volcanic rocks (Linzhou basin, Tibet). Tectonics, 34: 594–622

Ingalls M, Rowley D B, Currie B, Colman A S. 2016. Large-scale subduction of continental crust implied by India-Asia mass-balance calculation. Nat Geosci, 9: 848–853

Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Wang X C, Liu C Z, Li Q L, Liu Z C, Liu X C, Wang J G. 2016. Eocene Neo-Tethyan slab breakoff constrained by 45 Ma oceanic island basalt-type magmatism in southern Tibet. Geology, 44: 283–286

Ji W Q, Wu F Y, Liu C Z, Chung S L. 2009a. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet. Sci China Ser D-Earth Sci, 52: 1240–1261

Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Li J X, Liu C Z. 2009b. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. Chem Geol, 262: 229–245

Jin Y, McNutt M K, Zhu Y S. 1996. Mapping the descent of Indian and Eurasian plates beneath the Tibetan Plateau from gravity anomalies. J Geophys Res, 101: 11275–11290

Kapp P, DeCelles P G, Leier A, Fabijanic J M, He S, Pullen A, Gehrels G E, Ding L. 2007. The Gangdese retroarc thrust belt revealed. GSA Today, 17: 4–9

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. Geophys Res Lett, 30: 8046

Klootwijk C T, Gee J S, Peirce J W, Smith G M, McFadden P L. 1992. An early India-Asia contact: Paleomagnetic constraints from Ninetyeast Ridge, ODP Leg 121. Geology, 20: 395–398

Kohn M J, Parkinson C D. 2002. Petrologic case for Eocene slab breakoff during the Indo-Asian collision. Geology, 30: 591–594

Kumar P, Yuan X H, Kumar M R, Kind R, Li X Q, Chadha R K. 2007. The rapid drift of the Indian tectonic plate. Nature, 449: 894–897

Lee H Y, Chung S L, Ji J Q, Qian Q, Gallet S, Lo C H, Lee T Y, Zhang Q. 2012. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet. J Asian Earth Sci, 53: 96–114

Lee H Y, Chung S L, Lo C H, Ji J Q, Lee T Y, Qian Q, Zhang Q. 2009. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record. Tectonophysics, 477: 20–35

Lee T Y, Lawver L A. 1995. Cenozoic plate reconstruction of southeast Asia. Tectonophysics, 251: 85–138

Leech M L, Coble M A, Singh S, Guillot S, Jain A K. 2014. New U-Pb age and trace element composition of young metamorphic zircon rims from the UHP Tso Morari Complex, NW Himalaya, distinguishes peak from retrograde metamorphism. AGU Fall Meeting Abstracts, 13: 181

Leech M L, Singh S, Jain A K, Klemperer S L, Manickavasagam R M. 2005. The onset of India-Asia continental collision: Early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya. Earth Planet Sci Lett, 234: 83–97

Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, Engdahl E R. 2008. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. Earth Planet Sci Lett, 274: 157–168

Li Y L, Wang C S, Dai J G, Xu G Q, Hou Y L, Li X H. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: A review. Earth-Sci Rev, 143: 36–61

Lippert P C, van Hinsbergen D J J, Dupont-Nivet G. 2014. Early Cretaceous to present latitude of the central proto-Tibetan Plateau: A paleomagnetic synthesis with implications for Cenozoic tectonics, paleogeography, and climate of Asia. Geol Soc Amer Spec Paper, 507: 1–21

Lustrino M. 2005. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism. Earth-Sci Rev, 72: 21–38

Ma L, Wang B D, Jiang Z Q, Wang Q, Li Z X, Wyman D A, Zhao S R, Yang J H, Gou G N, Guo H F. 2014. Petrogenesis of the Early Eocene adakitic rocks in the Napuri area, southern Lhasa: Partial melting of thickened lower crust during slab break-off and implications for crustal thickening in southern Tibet. Lithos, 196-197: 321–338

Ma L, Wang Q, Li Z X, Wyman D A, Jiang Z Q, Yang J H, Gou G N, Guo H F. 2013. Early Late Cretaceous (ca. 93 Ma) norites and hornblendites in the Milin area, eastern Gangdese: Lithosphere-asthenosphere interaction during slab roll-back and an insight into early Late Cretaceous (ca. 100–80 Ma) magmatic "flare-up" in southern Lhasa (Tibet). Lithos, 172-173: 17–30

Magni V, Faccenna C, van Hunen J, Funiciello F. 2013. Delamination vs. break-off: The fate of continental collision. Geophys Res Lett, 40: 285–289

Magni V, van Hunen J, Funiciello F, Faccenna C. 2012. Numerical models of slab migration in continental collision zones. Solid Earth, 3: 293–306

Martinod J, Husson L, Roperch P, Guillaume B, Espurt N. 2010. Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. Earth Planet Sci Lett, 299: 299–309

McKenzie D, Priestley K. 2008. The influence of lithospheric thickness variations on continental evolution. Lithos, 102: 1–11

McQuarrie N, Stock J M, Verdel C, Wernicke B P. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. Geophys Res Lett, 30: 2036

McQuarrie N, van Hinsbergen D J J. 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. Geology, 41: 315–318

Mo X X, Niu Y L, Dong G C, Zhao Z D, Hou Z Q, Zhou S, Ke S. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet. Chem Geol, 250: 49–67

Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics. Tectonics, 28: TC3001

Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. Science, 189: 419–426

Müller R D. 2010. Tectonics: Sinking continents. Nat Geosci, 3: 79–80

Najman Y, Appel E, Boudagher-Fadel M, Bown P, Carter A, Garzanti E, Godin L, Han J, Liebke U, Oliver G, Parrish R, Vezzoli G. 2010. Timing of India-Asia collision: Geological, biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints. J Geophys Res, 115: B12416

Negredo A M, Replumaz A, Villaseñor A, Guillot S. 2007. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region. Earth Planet Sci Lett, 259: 212–225

Niu Y L. 2014. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives. Glob Tecton Metal, 10: 23–47

Okay A I, Zattin M, Cavazza W. 2010. Apatite fission-track data for the Miocene Arabia-Eurasia collision. Geology, 38: 35–38

Orme D A, Carrapa B, Kapp P. 2015. Sedimentology, provenance and geochronology of the upper Cretaceous-lower Eocene western Xigaze forearc basin, southern Tibet. Basin Res, 27: 387–411

Patriat P, Achache J. 1984. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. Nature, 311: 615–621

Patzelt A, Li H, Wang J, Appel E. 1996. Palaeomagnetism of Cretaceous to Tertiary sediments from southern Tibet: Evidence for the extent of the northern margin of India prior to the collision with Eurasia. Tectonophysics, 259: 259–284

Pearce J A, Mei H J. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet geotraverse: Lhasa to Golmud. Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci, 327: 169–201

Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, Chen C. 1994. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision. J Geophys Res, 99: 19917–19945

Rowley D B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. Earth Planet Sci Lett, 145: 1–13

Schellart W P. 2004. Quantifying the net slab pull force as a driving mechanism for plate tectonics. Geophys Res Lett, 31: L07611

Schmidt M W, Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. Earth Planet Sci Lett, 163: 361–379

Sengör A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting. Annu Rev Earth Planet Sci, 15: 213–244

Sengör A M C, Özeren S, Genç T, Zor E. 2003. East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. Geophys Res Lett, 30: 8045

Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S, Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. Earth-Sci Rev, 113: 212–270

Shellnutt J G, Lee T Y, Brookfield M E, Chung S L. 2014. Correlation between magmatism of the Ladakh Batholith and plate convergence rates during the India-Eurasia collision. Gondwana Res, 26: 1051–1059

Smit M A, Hacker B R, Lee J. 2014. Tibetan garnet records early Eocene

initiation of thickening in the Himalaya. Geology, 42: 591–594

St-Onge M R, Rayner N, Searle M P. 2010. Zircon age determinations for the Ladakh batholith at Chumathang (Northwest India): Implications for the age of the India-Asia collision in the Ladakh Himalaya. Tectonophysics, 495: 171–183

Stern R J. 2007. When and how did plate tectonics begin? Theoretical and empirical considerations. Chin Sci Bull, 52: 578–591

Sui Q L, Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Chen Y, Santosh M, Hu Z C, Yuan H L, Mo X X. 2013. Compositional diversity of ca. 110Ma magmatism in the northern Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone. Lithos, 168-169: 144–159

Tan X, Gilder S, Kodama K P, Jiang W, Han Y, Zhang H, Xu H, Zhou D. 2010. New paleomagnetic results from the Lhasa block: Revised estimation of latitudinal shortening across Tibet and implications for dating the India-Asia collision. Earth Planet Sci Lett, 293: 396–404

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: 868–882

Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. 1999. Tethyan subducted slabs under India. Earth Planet Sci Lett, 171: 7–20

van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, McQuarrie N, Doubrovine P V, Spakman W, Torsvik T H. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. Proc Natl Acad Sci USA, 109: 7659–7664

van Hinsbergen D J J, Steinberger B, Doubrovine P V, Gassmöller R. 2011. Acceleration and deceleration of India-Asia convergence since the Cretaceous: Roles of mantle plumes and continental collision. J Geophys Res, 116: B06101

van Hunen J, Allen M B. 2011. Continental collision and slab breakoff: A comparison of 3-D numerical models with observations. Earth Planet Sci Lett, 302: 27–37

van Hunen J, Miller M S. 2015. Collisional processes and links to episodic changes in subduction zones. Elements, 11: 119–124

von Blanckenburg F, Davies J H. 1995. Slab breakoff: A model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps. Tectonics, 14: 120–131

Wang R, Richards J P, Hou Z, An F, Creaser R A. 2015. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf-O isotope geochemistry of the Paleocene-Eocene igneous rocks in western Gangdese: Evidence for the timing of Neo-Tethyan slab breakoff. Lithos, 224-225: 179–194

White L T, Ahmad T, Ireland T R, Lister G S, Forster M A. 2011. Deconvolving episodic age spectra from zircons of the Ladakh Batholith, northwest Indian Himalaya. Chem Geol, 289: 179–196

White L T, Ahmad T, Lister G S, Ireland T R, Forster M A. 2012. Is the switch from I- to S-type magmatism in the Himalayan Orogen indicative of the collision of India and Eurasia? Aust J Earth Sci, 59: 321–340

Wilson J T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. Nature, 207: 343–347

Wong A Ton S Y M, Wortel M J R. 1997. Slab detachment in continental collision zones: An analysis of controlling parameters. Geophys Res Lett, 24: 2095–2098

Wu Y, Fei Y W, Jin Z M, Liu X Y. 2009. The fate of subducted upper continental crust: An experimental study. Earth Planet Sci Lett, 282: 275–284

Wyllie P J. 1981. Plate tectonics and magma genesis. Geol Rundsch, 70: 128–153

Xu J, Zheng Y Y, Sun X, Shen Y H. 2016. Alteration and mineralization at the Zhibula Cu skarn deposit, Gangdese belt, Tibet. Ore Geol Rev, 75: 304–326

Xu R H, Schärer U, Allègre C J. 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa Block (Tibet): A geochronological study. J Geol, 93: 41–57

Xu Y G, Lan J B, Yang Q J, Huang X L, Qiu H N. 2008. Eocene break-off of the Neo-Tethyan slab as inferred from intraplate-type mafic dykes in the Gaoligong orogenic belt, eastern Tibet. Chem Geol, 255: 439–453

Yang T S, Ma Y M, Bian W W, Jin J J, Zhang S H, Wu H C, Li H Y, Yang Z Y, Ding J K. 2015a. Paleomagnetic results from the Early Cretaceous Lakang Formation lavas: Constraints on the paleolatitude of the Tethyan Himalaya and the India-Asia collision. Earth Planet Sci Lett, 428: 120–133

Yang T S, Ma Y M, Zhang S H, Bian W W, Yang Z Y, Wu H C, Li H Y, Chen W, Ding J K. 2015b. New insights into the India-Asia collision process from Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results in the Lhasa terrane. Gondwana Res, 28: 625–641

Yang Z M, Hou Z Q, Chang Z S, Li Q Y, Liu Y F, Qu H C, Sun M Y, Xu B. 2016. Cospatial Eocene and Miocene granitoids from the Jiru Cu deposit in Tibet: Petrogenesis and implications for the formation of collisional and postcollisional porphyry Cu systems in continental collision zones. Lithos, 245: 243–257

Ye K, Cong B, Ye D. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km.. Nature, 407: 734–736

Yi Z, Huang B, Chen J, Chen L, Wang H. 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 Planet Sci Lett, 309: 153–165

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. Annu Rev Earth Planet Sci, 28: 211–280

Zeng L S, Gao L E, Xie K J, Zeng J L. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thick-

ened lower continental crust. Earth Planet Sci Lett, 303: 251–266

Zhang Q H, Willems H, Ding L, Gräfe K U, Appel E. 2012. Initial India-Asia continental collision and foreland basin evolution in the Tethyan Himalaya of Tibet: Evidence from stratigraphy and paleontology. JGeol, 120: 175–189

Zhang Z M, Shen K, Santosh M, Dong X. 2011. High density carbonic fluids in a slab window: Evidence from the Gangdese charnockite, Lhasa terrane, southern Tibet. J Asian Earth Sci, 42: 515–524

Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, Wang J L, Dong X, Shen K. 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction? Gondwana Res, 17: 615–631

Zhu B, Kidd W S F, Rowley D B, Currie B S, Shafique N. 2005. Age of initiation of the India-Asia collision in the East-Central Himalaya. J Geol, 113: 265–285

Zhu D C, Chung S L, Mo X X, Zhao Z D, Niu Y, Song B, Yang Y H. 2009a. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia. Geology, 37: 583–586

Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S, Wu F Y. 2009b. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. Chem Geol, 268: 298–312

Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, Zhao Z D, Mo X X. 2017. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 214–223

Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Chung S L, Cawood P A, Niu Y, Liu S A, Wu F Y, Mo X X. 2015. Magmatic record of India-Asia collision. Sci Rep, 5: 14289

Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. Gondwana Res, 23: 1429–1454

Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. Earth Planet Sci Lett, 301: 241–255

Zhuang G S, Najman Y, Guillot S, Roddaz M, Antoine P O, Métais G, Carter A, Marivaux L, Solangi S H. 2015. Constraints on the collision and the pre-collision tectonic configuration between India and Asia from detrital geochronology, thermochronology, and geochemistry studies in the lower Indus basin, Pakistan. Earth Planet Sci Lett, 432: 363–373

Zlotnik S, Fernández M, Díez P, Vergés J. 2008. Modelling gravitational instabilities: Slab break-off and Rayleigh-taylor diapirism. Pure Appl Geophys, 165: 1491–1510

Zor E. 2008. Tomographic evidence of slab detachment beneath eastern Turkey and the Caucasus. Geophys J Int, 175: 1273–1282