中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 3 期: 293 ~ 309
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

印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程

丁林[1,2*], Satybaev MAKSATBEK[1], 蔡福龙[1], 王厚起[1], 宋培平[1], 纪伟强[3], 许强[1], 张利云[1], Qasim MUHAMMAD[1,2], Baral UPENDRA[1]

1. 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* E-mail: dinglin@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2016-09-21; 接受日期: 2016-12-28; 网络版发表日期: 2017-02-20
中国科学院战略先导专项项目(编号: XDB03010401)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600303)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 41490615)资助

摘要 印度与欧亚大陆初始碰撞是海陆热力对比变化、青藏高原-喜马拉雅造山带形成和亚洲气候转变的起点. 本文根据近30年国内外的研究进展, 系统总结了大陆初始碰撞的研究历史. 对比了十多种初始碰撞研究方法, 我们认为周缘前陆盆地的构造-沉积响应对大陆初始碰撞最为敏感, 而古地磁学作为独立的证据也是非常好的定量研究方法. 关于碰撞过程, 与西方传统观点认为55~50Ma碰撞首先发生在西部衔接点, 随后向东闭合的模式不同; 最新的研究结果表明, 印度与欧亚大陆首先于雅鲁藏布江缝合带中部发生正向碰撞, 时间为65~63Ma, 随后向东西两侧穿时性碰撞. 大陆碰撞是一个复杂的造山过程, 涉及构造、沉积、变质和岩浆作用等多个方面, 不同学科的学者通常喜欢从各自学科的角度来定义碰撞. 我们建议使用多学科结合、相互验证的方法, 避免以偏概全、以点带面的现象发生, 尽量将每个阶段发生的事件真实地还原到碰撞造山演化的时间序列中.

关键词 青藏高原, 印度板块, 欧亚板块, 初始碰撞, 封闭过程

1 引言

印度与欧亚大陆的碰撞是近5亿年来地球历史上发生的最重要造山事件(Yin和Harrison, 2000). 尽管地球历史上关闭了许多大洋, 导致大陆碰撞, 唯独印度与欧亚大陆的碰撞引起了大面积的地表隆起. 这种碰撞和持续作用, 影响范围已经远远超越了青藏高原, 波及中亚腹地、东南亚和中国东部地区(Tapponnier等, 1982). 因此, 印度与欧亚大陆的碰撞及青藏高原的变形应有其独特的碰撞机制和陆内变形过程. 印度与欧亚大陆初始碰撞是研究大陆岩石圈变形过程及机制的先决条件, 是开展高原气候、环境变化和古高度研究的首要因素, 是评价和寻找大陆碰撞成矿的基础. 因而, 对该造山带形成演化过程的详细研究, 不仅对板块构造、大陆变形、多圈层相互作用具有重要的科学意义, 同时也为寻找各类矿产提供核心科学支撑.

中文引用格式: 丁林, Maksatbek S, 蔡福龙, 王厚起, 宋培平, 纪伟强, 许强, 张利云, Muhammad Q, Upendra B. 2017. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程. 中国科学: 地球科学, 47: 293–309, doi: 10.1360/N072016-00244
英文引用格式: Ding L, Maksatbek S, Cai F L, Wang H Q, Song P P, Ji W Q, Xu Q, Zhang L Y, Muhammad Q, Upendra B. 2017. Processes of initial collision and suturing between India and Asia. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-016-5244-x

© 2017 《中国科学》杂志社

初始碰撞指的是两大陆之间的大洋岩石圈沿着缝合带某一点或某一段俯冲殆尽, 两侧相连的大陆岩石圈直接接触. 大陆碰撞严格来说是一个过程, 它是指活动大陆边缘及其相连的增生楔加载到被动大陆边缘之上, 形成周缘前陆盆地系统, 残留洋壳在碰撞部位以蛇绿岩形式构造侵位, 缝合带及两侧大陆岩石圈发生强烈变形、变质及岩浆作用的造山过程(Ding等, 2005). 大陆碰撞不是一个简单的短暂的过程, 可能经历了从初始碰撞到全面碰撞的长期过程.

在20世纪80~90年代, 国际上普遍接受55Ma印度首先在西构造结与欧亚大陆发生碰撞, 随后向东穿时性封闭的模式(Achache等, 1984; Allégre等, 1984; Beck等, 1995; Besse等, 1984; Klootwijk等, 1994; Rowley, 1996; Searle等, 1987; Tapponnier等, 1981). 近十几年, 中国科学家根据雅鲁藏布江缝合带及其两侧地层资料, 首次提出印度与欧亚板块的碰撞时间要早, 起始时间可能在65~60Ma, 碰撞首先从中部开始, 然后向两侧的西构造结和东构造结穿时性启动(Cai等, 2011; Chen等, 2010; 丁林和钟大赉, 1999; Ding等, 2001, 2003, 2005, 2016b; Hu等, 2015, 2016b; Wu等, 2014; Yi等, 2011; Zhang等, 2012). 该模式具有重要意义, 它预测: (1) 青藏高原将发生大规模的陆内俯冲, 陆内俯冲可能是青藏高原大规模变形的主要动力学模式; (2) 大规模的陆内俯冲将引起变形的远程效应; (3)青藏高原碰撞后将发生大规模的陆内岩浆活动和成矿作用.

2 大陆初始碰撞时间的研究方法

在实际工作中, 不同学科的学者通常喜欢从各自学科的角度来定义初始碰撞时间(表1). 大陆碰撞是一个复杂的过程, 在这一过程中发生众多的地质事件, 因此, 我们建议使用多学科结合、相互验证的方法, 以避免以偏概全, 以点带面的现象发生, 尽可能地将每个阶段发生的事件真实地还原到碰撞造山演化的时间序列中(丁林等, 2013).

3 印度与欧亚大陆初始碰撞时间研究历史

印度-欧亚大陆初始碰撞时间的研究有长达30余年的历史, 在数千公里的缝合带及其两侧地体上积累了大量的资料, 我们将其归纳总结在图1和2中. 印度-欧亚大陆初始碰撞时间的研究最早始于巴基斯坦和印度西北部地区. 在巴基斯坦西北缘Waziristan-Kurram地区, Beck等(1995)通过构造填图, 认为Indus缝合带的增生楔和海沟地层在65~55Ma仰冲至印度被动大陆边缘之上, 标志印度-欧亚大陆在55Ma之前开始碰撞. 然而, 也有学者认为这种构造关系代表大洋岛弧和印度大陆的碰撞(Aitchison等, 2007a). 向东到Balakot地区, 55~50Ma的Balakot组作为最老的陆相前陆盆地沉积, 被解释为代表印度-欧亚大陆的碰撞(Bossart和Ottiger, 1989). 然而新的填图发现, 用来限定Balakot组年龄的含化石泥灰岩与Balakot组实际为断层接触关系, 而非连续沉积, 且Balakot组的碎屑云母年龄集中在40~36Ma(Najman等, 2001). 因此, Najman等(2001)建议碰撞可能比预期晚得多, 约为40Ma. 最近, Ding等(2016b)在该地区进行了详细的填图工作, 在相当于Balakot组下部的Kuldana组碎屑岩地层中新发现火山凝灰岩, 其锆石U-Pb年龄为53Ma, 碎屑锆石工作证明该套地层物源在55Ma发生由印度向欧亚的转变, 标志初始碰撞发生在56~55Ma. 此外, Zhuang等(2015)通过对巴基斯坦南部Indus盆地源区分析, 认为印度-欧亚大陆碰撞时间为50Ma之前.

印度西北部Zanskar地区, 印度大陆之上的下始新统Chulung La组在52~50.7Ma从海相转变为陆相, 同时期Spotang和Ladakh弧仰冲到印度大陆上(Gaetani和Garzanti, 1991; Garzanti等, 1987; Rowley, 1996; Searle等, 1987), 据此认为碰撞发生在50Ma之前. 该地区另一个有意思的现象是, Indus磨拉石由于同时不整合覆盖在印度和欧亚大陆之上, 通常用来说明碰撞在此之前一定已经发生(Clift等, 2002; Wu等, 2007). 磨拉石下部货币虫灰岩的年龄为50.8~49.4Ma, 因此, 碰撞被限定发生在50Ma之前. 然而, Henderson等(2011)的填图和地层工作则表明Indus磨拉石并非如前人所认为的不整合在印度之上, 二者实际为构造接触, 因此Indus磨拉石不能用来限定碰撞时间.

巴基斯坦和印度Zanskar地区另一个重要进展是, 发现多处大陆深俯冲成因的含柯石英榴辉岩. 其中, 巴基斯坦Kagan榴辉岩超高压峰期变质年龄为47~46Ma(Kaneko等, 2003; Tonarini等, 1993; Treloar等, 2003; Wilke等, 2010). Zanskar地区Tso Morari榴辉岩的薄片尺度原位锆石定年结果显示, 石榴石核部(早期)锆石包裹体年龄为57~53Ma, 而石榴石边部(峰期)锆石包裹体年龄为47~43Ma(Donaldson等, 2013). 这些峰

表 1　大陆初始碰撞时间研究方法及应用条件

研究方法	基本原理	应用条件	碰撞时限
壳源高压-超高压变质作用	大陆岩石圈在大洋岩石圈的拖曳下, 俯冲到100km甚至更深的深度, 形成高压-超高压变质岩. 由于构造作用, 这些变质岩后期折返至地表, 如果获知大陆俯冲速率和角度、峰期变质的深度和时间, 可反推初始碰撞时间	深俯冲-折返过程中, 高压变质岩常经历减压降温退变质改造而无法还原碰撞-俯冲-变质整个过程*PTt*轨迹; 由于缺少合适的温压计和标志性高压矿物, 往往仅给出变质峰期温度和压力下限	上限
蛇绿岩构造侵位	蛇绿岩构造侵位时, 在其底板可形成变质石榴石角闪岩, 可以用来限定构造侵位的时代	一般洋内侵位要老于碰撞, 如雅鲁藏布江缝合带南侧蛇绿岩变质底板形成的石榴石角闪岩, 其角闪石$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄为130~120Ma	下限
最高海相沉积	大陆碰撞发生后洋壳消失, 陆地抬升导致海水退出, 最高海相层的沉积时代可限定陆陆碰撞的上限	大洋岩石圈的消失并不意味着海水同时退出, 如周缘前陆盆地形成时, 虽然大洋岩石圈消失, 但依然保持着海相沉积; 此外碰撞可能表现为局部碰撞, 两侧依然保留残留海	上限
磨拉石建造	磨拉石建造是大陆碰撞后形成于山前坳陷的巨厚粗碎屑岩系. 其下部为浅海相沉积, 向上过渡为陆相沉积, 有时含有煤层	需要鉴定两类不同性质的磨拉石, 一类形成大陆碰撞初期前陆盆地的楔顶部分, 可以配合前陆盆地限定碰撞时限; 第二类不整合沉积在缝合带及两侧大陆之上, 这种磨拉石形成时代一般大大晚于碰撞	上限
大洋扩张速度变化	通过俯冲板块后方洋中脊磁异常条带分析, 某一时期大洋扩张速度突然降低, 可能代表板块运动受到另一稳定大陆阻挡, 标志大陆开始碰撞	此方法的最大问题在于, 扩张速度降低除了碰撞阻挡这一被动原因外, 极可能还有洋中脊自身扩张速度的主动变化	不确定
板块运动方向变化	在穿时性碰撞过程中, 后期碰撞会伴随大规模的板块旋转, 因而板块的旋转在该情形下可用来限制大陆碰撞	与板块速度变化类似, 板块运动角度的变化并不要求碰撞发生, 如夏威夷海岭指示的板块运动角度发生了大规模变化	不确定
大规模走滑断裂	碰撞侧缘往往发生大规模走滑运动, 如滇西的红河-哀牢山走滑断裂、实皆断裂等	碰撞开始一般首先发生地壳挤压缩短, 当地壳加厚到一定程度无法有效吸收变形时才发生大规模走滑运动, 因而走滑断裂的产生一般要晚于大陆初始碰撞时间	上限
碰撞带地壳变形	大陆相向运动所造成的挤压作用通常引起规模巨大的地壳缩短加厚, 在俯冲板块一侧, 构造变形表现为前陆逆冲褶皱带	并非所有地壳变形加厚都代表着大陆碰撞发生, 如洋内岛弧和被动陆缘的碰撞可以造成类似的变形	上限/下限
古地磁视极移曲线	碰撞之前两个大陆具有各自独立的视极移曲线或古纬度差, 若某一时间之后二者视极移曲线相交甚至彼此重合, 或古纬度值在误差范围内一致, 标志着初始碰撞开始	适用于刚性块体, 碰撞后没有发生明显地壳缩短、大陆俯冲; 能够对地层年代进行精细限定; 能准确评估沉积岩倾角变浅的影响; 能过滤掉地球磁场长期变影响	碰撞
周缘前陆盆地	当洋壳俯冲消亡殆尽, 仰冲一侧的负载造成俯冲一侧发生挠曲下沉, 周缘前陆盆地形成; 同时, 仰冲板块物质可以沉积到被动大陆边缘之上, 物质交换发生, 从而标志两侧大陆初始碰撞开始	大陆碰撞可能会导致被动大陆边缘沉积物俯冲到仰冲板块之下, 导致早期记录消失; 周缘前陆盆地通常向克拉通方向动态迁移, 早期的前渊可能卷入后期的造山带. 因此, 最早期最靠近缝合带位置的周缘前陆盆地能够提供最接近真实的初始碰撞时间	碰撞
浅色花岗岩	浅色花岗岩广泛发现于地壳加厚造山带, 如喜马拉雅造山带, 被认为是加厚造山带上部泥质岩石部分熔融形成, 因而, 同期大规模出现的浅色花岗岩可以约束地壳大规模加厚过程	浅色花岗岩不仅出现在加厚的俯冲板块的前陆褶皱逆冲带之中, 也可以大规模形成在加厚的岛弧带, 可以是碰撞前, 也可以是碰撞后	上限/下限
大洋到大陆俯冲岩浆性质转换	大洋俯冲板片释放的流体引起上覆地幔楔熔融, 产生具有明显Nb、Ta、Ti负异常的钙碱性-高钾钙碱性岛弧岩石组合. 大陆岩石圈俯冲产生的岩浆成分混染了大量陆壳信息, 为壳源钾玄岩系列. 岩浆源区从大洋板片脱水到大陆板片熔融的转变标志大洋岩石圈的消失, 大陆开始接触并俯冲	岛弧岩浆作用结束的时代通常晚于大陆初始碰撞时代, 即岩浆作用对构造作用的响应总是呈现出一定程度的滞后性. 实际上, 大陆碰撞后, 被大洋俯冲改造的岛弧地幔楔仍长期显示岛弧岩浆岩石组合特征. 利用岩浆作用来限定大陆初始碰撞的时代, 要特别注意对岩石类型、构造背景、源区以及时间的精细研究	上限

续表1

研究方法	基本原理	应用条件	碰撞时限
陆生动植物、底栖浅海生物交换	碰撞前处于不同大陆或大陆边缘之上的陆生生物群或底栖浅海生物具有显著可区分的地域分异性特征, 两个大陆开始接触, 动植物开始迁移混合, 这种交换可以用来限制板块的碰撞时间	值得注意的是陆生生物或底栖浅海生物的地理分布和年代学上的不确定性会严重影响结论的可靠性	上限
数值及物理模拟	通过物理方法和数值方法可以模拟缓慢的大陆碰撞过程, 物理模拟是根据相似原理, 选择合适材料构建实体模型; 而数值模拟是根据岩石变形的本构方程, 利用计算机软件再现变形过程. 选择合适的应变速率, 达到理想变形所需的时间即为碰撞时间	物理模拟和数值模拟都需要建立基本符合的几何模型, 选择合适的本构方程、相似材料, 边界条件, 根据模拟效果与实际变形的近似情况, 对上述条件进行多次修正, 直至与实际情况高度一致. 优秀的模拟可以对大陆碰撞变形过程和机制给出有价值的预测	不确定

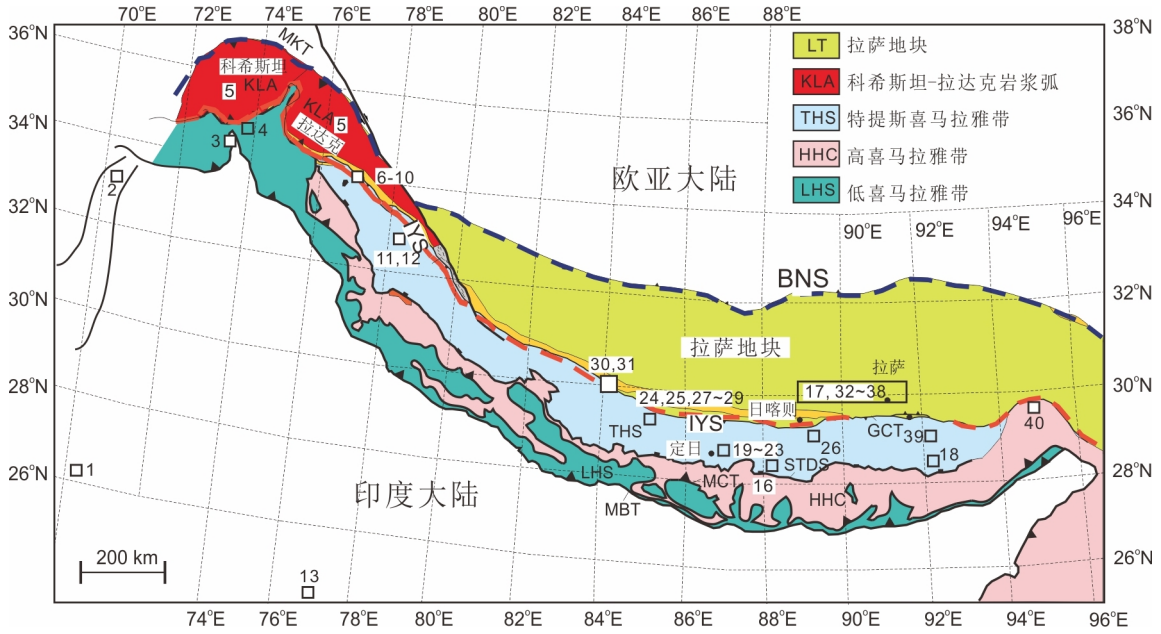

图 1　印度大陆与欧亚大陆碰撞时间研究工作位置图

BNS, 班公-怒江缝合带; GCT, 大反向逆冲断裂; IYS, 印度河-雅鲁藏布江缝合带; MBT, 主边界逆冲断裂; MCT, 主中央逆冲断裂; MKT, 主喀喇昆仑逆冲断裂; STDS, 藏南拆离系. 碰撞时间研究地点参考文献: (1) Zhuang等(2015); (2) Beck等(1995); (3) Ding等(2016b); (4) Wilke等(2010); (5) Bouilhol等(2013); (6) Garzanti等(1987); (7) Clift等(2002); (8) Wu等(2007); (9) Leech等(2005); (10) Fuchs和Willems(1990); (11) Batra(1989); (12) Najman(2005); (13) Jaeger等(1989); (14) Patriat和Achache(1984); (15) Klootwijk等(1992); (16) Yi等(2011); (17) Achache等(1984); (18) Yang等(2015a); (19) Hu等(2012); (20) Zhang等(2012); (21) Zhu等(2005); (22) Najman等(2010); (23) Rowley(1998); (24) DeCelles等(2014); (25) Ding等(2005); (26) Cai等(2011); (27) Hu等(2015); (28) Wu等(2014); (29) Wang等(2011); (30) Hu等(2016a); (31) Meng等(2012); (32) Chen等(2010); (33) Liebke等(2010); (34) Sun等(2010); (35) Chen等(2014); (36) Huang等(2013); (37) Huang等(2015a); (38) Huang等(2015b); (39) Ding等(2016a); (40) Ding等(2001)

期变质年龄结合大陆俯冲速率, 限定板块初始碰撞时间为(57±1)Ma(Leech等, 2005).

印度-欧亚大陆陆生生物的迁移也曾用来限定碰撞时间, 结合德干玄武岩喷发年龄, Jaeger等(1989)认为白垩纪-古近纪界线附近两大陆陆生生物发生了交换, 标志印度-欧亚大陆发生初始碰撞.

在西藏南部的特提斯喜马拉雅带, 近些年积累了大量的数据. 地质学家从最高海相层、物源分析、沉降速率、蛇绿岩仰冲上陆、古地磁等多方面来论证印度-欧亚大陆初始碰撞时间. 总的来说, 这些方法都或多或少地应用了周缘前陆盆地概念, 区别就是把不同地点、不同阶段发生的事件的时间用来限定初始

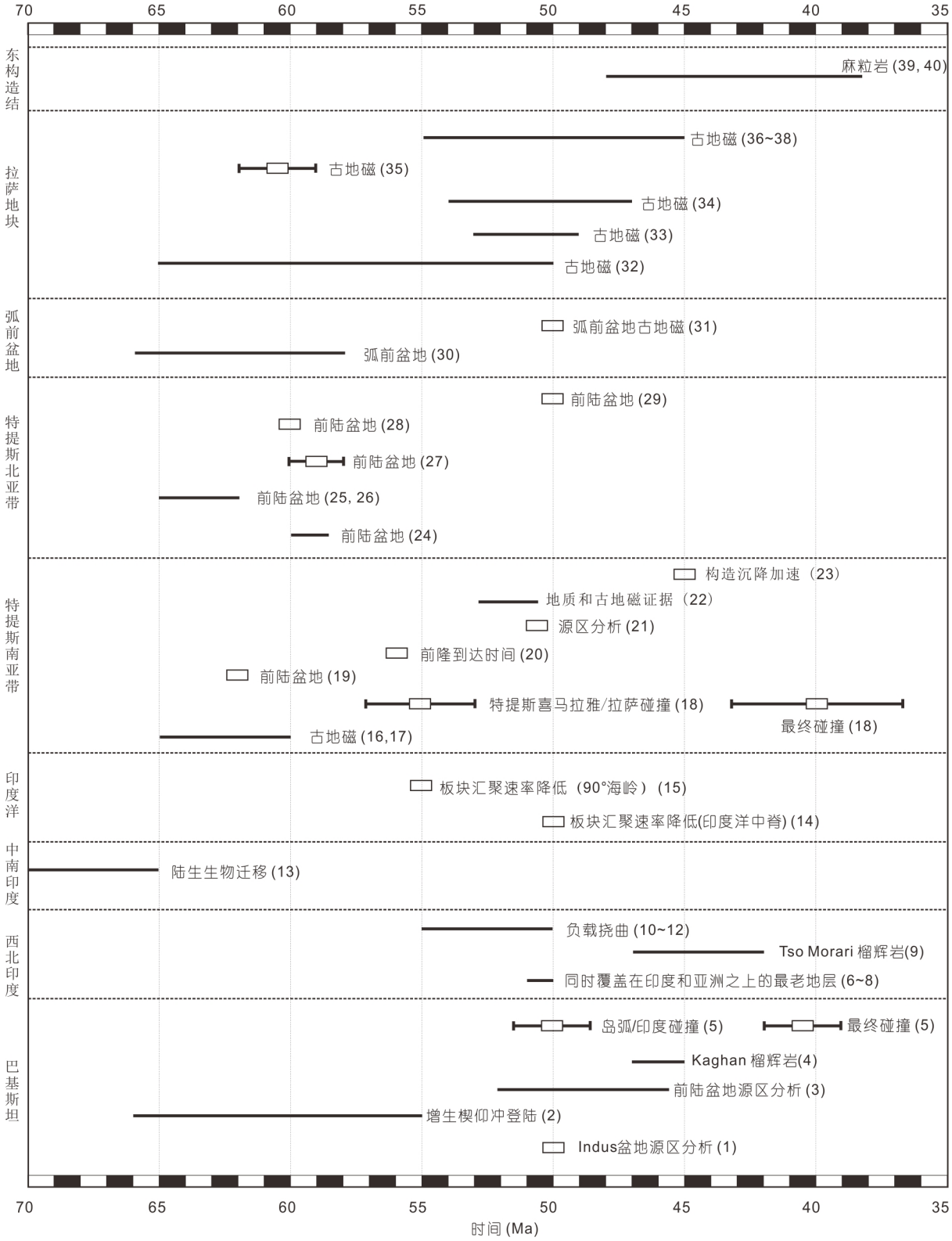

图 2　**印度与欧亚大陆碰撞时间研究进展(文献见图1)**

碰撞时间. 20世纪90年代, Rowley(1998)根据Willems等(1996)的定日遮普惹山剖面, 绘制了特提斯喜马拉雅南亚带沉降速率曲线, 并认为遮普惹组沉积结束(45.8Ma)时, 沉降速率一直无明显加大, 意味着碰撞导致的挠曲一定发生在45.8Ma之后. 随后, Zhu等(2005)在同一剖面通过物源分析得出, 50.8Ma前后物源区由印度转变为欧亚来源, 并认为碰撞已经发生. Najman等(2010)对遮普惹组(恩巴段和扎果段)中的微体化石重新进行了详细定年, 认为沉积时代在52.8~50.6Ma, 结合源区分析, 认为碰撞发生在此时间段内. Zhang等(2012)在详细的古生物年代学工作基础上, 将56Ma发育的由宗浦组灰岩组成的砾岩定义为前陆盆地的前隆沉积, 由此提出碰撞发生在56Ma前. Hu等(2012)在同一地区的工作则表明, 宗浦组的砾岩段和灰岩段都是沉积在前隆地区, 因此将宗浦组灰岩最底部时代(62Ma)作为碰撞开始时间.

近些年, 特提斯喜马拉雅北亚带周缘前陆盆地的发现和详细工作无疑对板块碰撞时间研究起了重要推动作用. 桑单林作为经典的周缘前陆盆地剖面得到了国内外众多地质学家的关注. 目前该地区的工作尽管仍存在些许争议, 但是普遍能够达成的共识是该地区的碰撞时间比以前提前15~10Ma, 认为碰撞最早发生在65~60Ma(DeCelles等, 2014; Ding等, 2005; Hu等, 2015; Wu等, 2014). 关于该部分的详细论述详见第三部分.

相比于西构造结发现的榴辉岩, 东构造结到目前为止还没有发现典型的榴辉岩, 但麻粒岩发育较为广泛, 时间跨度大(Ding等, 2001). 最新的研究表明, 对应于中下地壳俯冲的高压麻粒岩, 上地壳经历了早始新世(52~45Ma)的中压变质作用, 限定了大陆初始碰撞时间的上限(Ding等, 2016a).

4 印度与欧亚大陆初始碰撞时限最新进展

正如第一部分所述, 限定大陆初始碰撞时限的方法至少有十几种, 其中最为有效的是周缘前陆盆地和古地磁.

4.1 初始碰撞的构造沉积响应

4.1.1 特提斯喜马拉雅带碰撞早期构造变形

新特提斯洋岩石圈俯冲消亡之后, 构造变形作为敏感指标之一首先对碰撞进行响应. 欧亚大陆南缘的岛弧、增生楔和海沟地层在白垩纪最晚期至古新世早期加载到印度大陆北缘之上(DeCelles等, 2014; Ding等, 2005; Hu等, 2016b; Tapponnier等, 1981; Wang等, 2017). 负载导致印度大陆北缘发生挠曲, 形成第一期周缘前陆盆地, 即雅鲁藏布江周缘前陆盆地(丁林等, 2009; DeCelles等, 2014; 丁林, 2003; Ding等, 2005). 在雅鲁藏布江缝合带中部, 前陆盆地对应的前陆褶皱逆冲带为仲巴-江孜逆冲断裂, 该断裂是印度-欧亚大陆碰撞边界断裂的一部分, 其上盘为新特提斯洋俯冲增生杂岩, 广泛发育透入性的F1面理和膝折构造(Wang等, 2017). 韧性剪切带内高压蓝片岩及云母片岩中角闪石和云母的^{40}Ar-^{39}Ar热年代学结果表明, 该断裂活动时间为71~60Ma(Ding等, 2005; Wang等, 2017). 在南迦巴瓦地区, 印度-欧亚大陆碰撞边界断裂可能为排**龙**-拉月逆冲断裂和东久-米林走滑逆冲剪切带, 二者发育角闪岩相糜棱岩组构和石英中高温滑移系, 角闪石^{40}Ar-^{39}Ar冷却年龄和同构造片麻岩锆石年龄指示断裂活动时间为62~54Ma(Xu等, 2012; 张进江等, 2003).

随着印度-欧亚大陆碰撞的持续, 前陆挠曲向印度内陆方向迁移. 在始新世早期, 前缘断裂扩展到康马-吉隆逆冲断裂上(Ratschbacher等, 1994), 前渊沉降中心也随之迁移到岗巴-定日地区, 形成第二期周缘前陆盆地(丁林等, 2009; DeCelles等, 2014; Hu等, 2012; Zhang等, 2012). 伴随前缘断裂的扩展, 印度大陆北缘发育一系列向南倒伏的褶皱, 形成典型的前陆褶皱逆冲带(Burg和Chen, 1984; Ratschbacher等, 1994). 早期的仲巴-江孜逆冲断裂和第一期前陆盆地卷入该期构造, 形成一系列褶皱逆冲带(Ding等, 2005). 仁布地区褶皱逆冲带内的白云母K-Ar年龄指示该期构造活动时间为~50Ma(Ratschbacher等, 1994). 地壳的构造加厚还进一步引发了深部的高级变质作用和地壳部分熔融, 高级变质和深部熔融时间为48~43Ma(Aikman等, 2008; Ding等, 2005, 2016a; Zeng等, 2011), 进一步限定了该期构造变形作用的时间.

被动陆缘前缘的下地壳发生俯冲或底冲作用, 而上地壳则会形成向被动大陆腹陆方向扩展的褶皱逆冲带. 值得注意的是, 板块缝合边界的挤压构造变形也可能形成于洋岛与大陆的碰撞过程中, 因此实际工作中要注意区分构造的原因. 此外, 这些早期的构造变形可能既有脆性, 也有韧性变形. 对于脆性变形的

时代确定非常困难. 即便是发育有较好的韧性剪切带, Ar-Ar等热年代学数据的解释也依然存在很多的不确定性. 为了精确限定初始碰撞时间, 构造变形应该结合前陆盆地沉积的证据, 共同解释大陆碰撞过程.

4.1.2　周缘前陆盆地系统的建立

碰撞带周缘前陆盆地的建立是大陆碰撞的直接标志(丁林等, 2009; 丁林, 2003). 传统研究认为前陆盆地系统仅发育在喜马拉雅山南侧, 以中新统-上新统西瓦里克群(Siwalik)为代表. 丁林(2003)发现在紧靠雅鲁藏布江缝合带的南侧发育一个周缘前陆盆地系统, 即雅鲁藏布江前陆盆地系统(丁林, 2003), 相比其他新生代盆地, 它更靠近缝合带, 发育时间更早.

目前识别出的雅鲁藏布江前陆盆地形成在65~60Ma左右(图3a; Cai等, 2011; DeCelles等, 2014; 丁林, 2003; Ding等, 2005; Hu等, 2015; Wang等, 2011; Wu等, 2014). 此时, 萨嘎地区特提斯喜马拉雅带地层从印度被动大陆边缘沉积转变为周缘前陆盆地的前渊沉积(丁林, 2003; Ding等, 2005). 在东部江孜地区, 同样发育同时期的周缘前陆盆地(Cai等, 2011; Wu等, 2014).

萨嘎地区桑单林剖面位于特提斯喜马拉雅北亚带, 代表了欧亚大陆加载到印度大陆被动边缘产生的周缘前陆盆地, 是研究大陆初始碰撞时限的代表性剖面. 丁林(2003)最先在该剖面进行了详细的构造、古生物地层和沉积源区分析工作, 将该剖面划分为上白垩统宗卓组、古新统Danian-Thanetian阶桑单林组以及之上的始新统者雅组. 宗卓组由硅质页岩、硅质岩、灰岩和石英砂岩组成, 其中石英砂岩是典型的印度大陆被动大陆边缘重力流沉积. 桑单林组为硅质岩和硅质页岩, 根据放射虫化石研究, 其时代为古新世至早始新世(65~55Ma)(丁林, 2003). 桑单林组是典型的前陆盆地前渊沉积, 由于碎屑物质少, 属于饥饿型周缘前陆盆地. 者雅组主要为一套砂质复理石沉积, 中间夹有数层砾岩, 是靠近楔顶斜坡的一套浊积岩和水道砂岩、砾岩沉积.

关于该地区初始碰撞时间的限定, 不同学者的理解依然不同. Ding等(2005)通过65~63Ma时沉积环境由印度被动大陆边缘向饥饿型周缘前陆盆地的转变, 认为碰撞发生在65Ma左右. Wu等(2014)在该地区做了更为详细的碎屑锆石工作, 发现桑单林组中交替出现印度来源物质和欧亚来源物质, 且第一次出现欧亚来源的碎屑物质比Wang等(2011)所认为的要早, 结合最年轻碎屑锆石年龄((62±1)Ma和(57±2)Ma)以及同期的放射虫化石年代(RP4, 63~61Ma), 认为碰撞发生在60Ma. DeCelles等(2014)的工作在桑单林剖面者雅组顶部发现了凝灰岩, 其U-Pb年龄为58.5Ma, 结合第一次出现欧亚来源的碎屑锆石的最年轻年龄60.6Ma, 认为碰撞发生在60.6~58.5Ma. Hu等(2015)对物源区改变附近的地层重新进行了化石年代学和碎屑锆石年代学研究, 得出了和DeCelles等(2014)及Wu等(2014)等类似的观点, 将印度-亚洲初始碰撞时间约束在(59±1)Ma. 总的来说, 如果以前陆盆地系统的前渊中第一次出现欧亚来源碎屑物质的时代来限定初始碰撞时间, 大陆碰撞应该在60~59Ma之前发生. 构造变形比物源改变

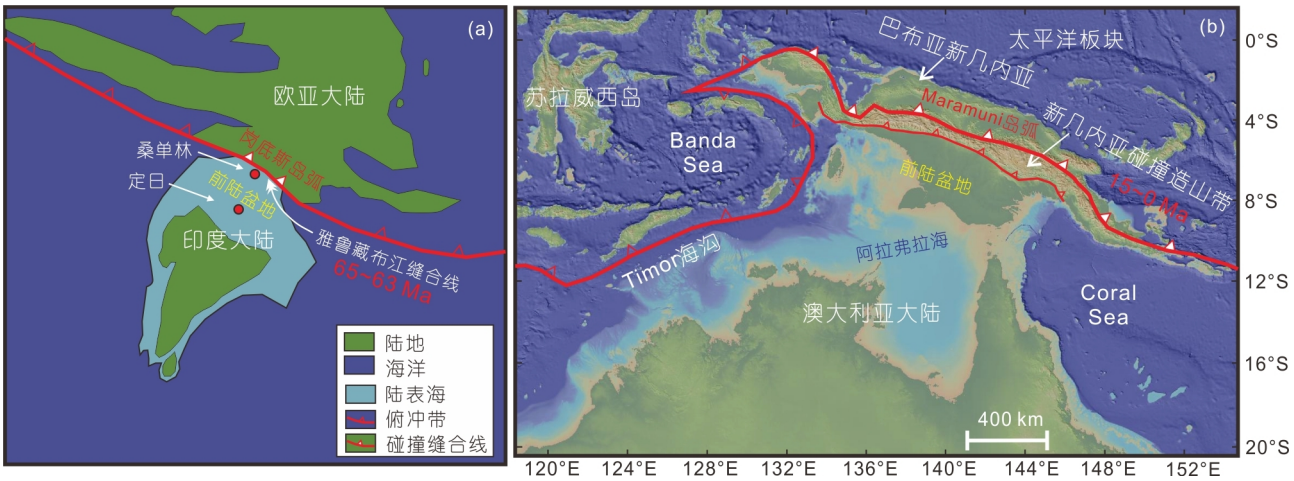

图 3　印度大陆(a)及澳大利亚大陆(b)碰撞前缘的陆表海及前陆盆地

对大陆碰撞更为敏感, 如果以构造变形和前陆盆地的开始时间联合限定初始碰撞, 时间应该在65~63Ma.

岗巴-定日一带, 下古新统的基堵拉组纯净石英砂岩碎屑物质来源于印度大陆; 上古新统的宗浦组是瘤状灰岩沉积, 可见向南的滑塌构造(李国彪等, 2002; 万晓樵等, 2002). 上述沉积构造指示宗浦组沉积时前隆已迁移到该位置(Zhang等, 2012). 始新统遮普惹组是一套泥岩夹岩屑砂岩地层(Wang等, 2002; Zhu等, 2005), 碎屑物质来自北部卷入褶冲带的特提斯喜马拉雅带地层和缝合带-冈底斯弧(Zhu等, 2005). 遮普惹组代表前隆通过后的前渊沉积, 当时的萨嘎-江孜前陆盆地已卷入前陆褶冲带, 前陆褶冲带前渊已迁移到拉轨岗日南部的岗巴-定日地区(丁林等, 2009).

总的来说, 随着65~63Ma增生楔和海沟物质向南逆冲到印度被动大陆北缘, 在特提斯喜马拉雅带最北侧发育了最早期的周缘前陆盆地, 前渊沉积单元对应萨嘎的桑单林组, 而前隆在56Ma迁移到岗巴-定日地区, 形成瘤状灰岩. 这表明周缘前陆盆地和前陆褶冲带研究所获得的印度-欧亚板块初始碰撞时间为~65Ma.

4.1.3 印度大陆碰撞前缘的最高海相层

20世纪80~90年代, 印度北部被动大陆边缘地层由海相向陆相的转变被用于指示印度大陆和欧亚大陆的初始碰撞(Searle等, 1987). 西部巴基斯坦55~50Ma的Balakot组作为最老的陆相前陆盆地沉积, 被解释为代表印度-欧亚大陆的碰撞(Bossart和Ottiger, 1989). 向东到Zanskar地区, 特提斯喜马拉雅带下始新统的Chulung La组沉积相由海相转为陆相, 标志着碰撞发生(Gaetani和Garzanti, 1991; Rowley, 1996). 上述具有精确化石年代限定的最高海相层均不晚于50.5Ma(Critelli和Garzanti, 1994). 在西藏定日地区, Rowley(1996)指出浅水陆架碳酸盐岩可以发育到Lutetian期(47.8~41.2Ma)(图3a), 这就意味着最高海相层一定在此之后, 因此得出了更晚的碰撞时间, 且据此提出了自西向东穿时性碰撞的观点. Wang等(2002)根据微体化石研究进一步限定定日地区最年轻的海相层为晚始新世~34Ma, 而其他的学者根据有孔虫化石和微体化石等证据认为最高海相层沉积时代为53.5~50.6Ma(Najman等, 2010; Zhu等, 2005).

海相沉积并不会随着碰撞开始而结束, 最高海相层的年代只能代表碰撞最年轻年代. 因此, 这一方法在应用上具有较大局限性, 这是由于两个大陆即使发生碰撞, 洋壳虽然消失, 但是残留海或者周缘前陆盆地等海相沉积作用依然在进行, 如现今的澳大利亚北部(图3b). 澳大利亚大陆与巴布亚-新几内亚于15~12Ma碰撞以来(Hall, 2012), 澳大利亚大陆北缘碰撞前缘仍然发育一个陆表海——阿拉弗拉海(相当于西藏定日陆表海; 图3a), 平均深度约50m, 连通西部的印度洋与东部的太平洋.

4.2 初始碰撞的古纬度

除周缘前陆盆地系统外, 古地磁学是限定两个大陆在何时何地初始碰撞的最直观和有效的手段. 在过去20余年的研究中, 与印度和欧亚大陆初始碰撞相关的大印度、大亚洲研究也取得了很多重要进展.

4.2.1 大印度与特提斯喜马拉雅古纬度

自Argand(1924)首次提出大印度概念以来, 由于其在青藏高原-喜马拉雅造山带中的重要作用受到了学者的广泛关注. 大印度在不同地质时期的范围和位置对于研究印度-欧亚大陆初始碰撞时间、计算地壳缩短和俯冲量以及限定青藏高原隆升模式都具有极其重要的意义. 在介绍大印度模型之前, 首先介绍现今印度大陆和大印度的定义. 现今的印度大陆包括主边界逆冲断裂以南的印度克拉通以及该断裂和雅鲁藏布江缝合带之间的喜马拉雅造山带(Ali和Aitchison, 2005). 大印度指的是地质历史时期, 现今印度大陆范围以北的区域, 应该包括已经发生俯冲的大印度岩石圈以及喜马拉雅造山带的缩短量(Ali和Aitchison, 2005).

在众多的大印度重建模型中, Ali和Aitchison(2005)的方法似乎看起来是可靠的. 他们通过对印度洋东南部靠近澳大利亚的海底地形进行了详细的分析, 结合中生代冈瓦纳大陆重建, 采用几何学的方法重建了大印度可能的最大范围为950km.

该方法的原理是依靠现代海底地形数据. 澳大利亚西部印度洋中存在多个具有陆壳性质的水下隆起, 自南向北依次是Naturaliste高原、Wallaby-Zenith高原和其南部的Wallaby-Zenith破裂带(图4). Wallaby-Zenith破裂带是大印度重建的关键, 它的南侧是印度洋洋壳, 而北侧是具有陆壳的Wallaby-Zenith高原(Brown等, 2003). 这一重要现象表明, 至少大印度东部可以限定在该破裂带的南侧. 该模型目前仅能限定白垩纪时期

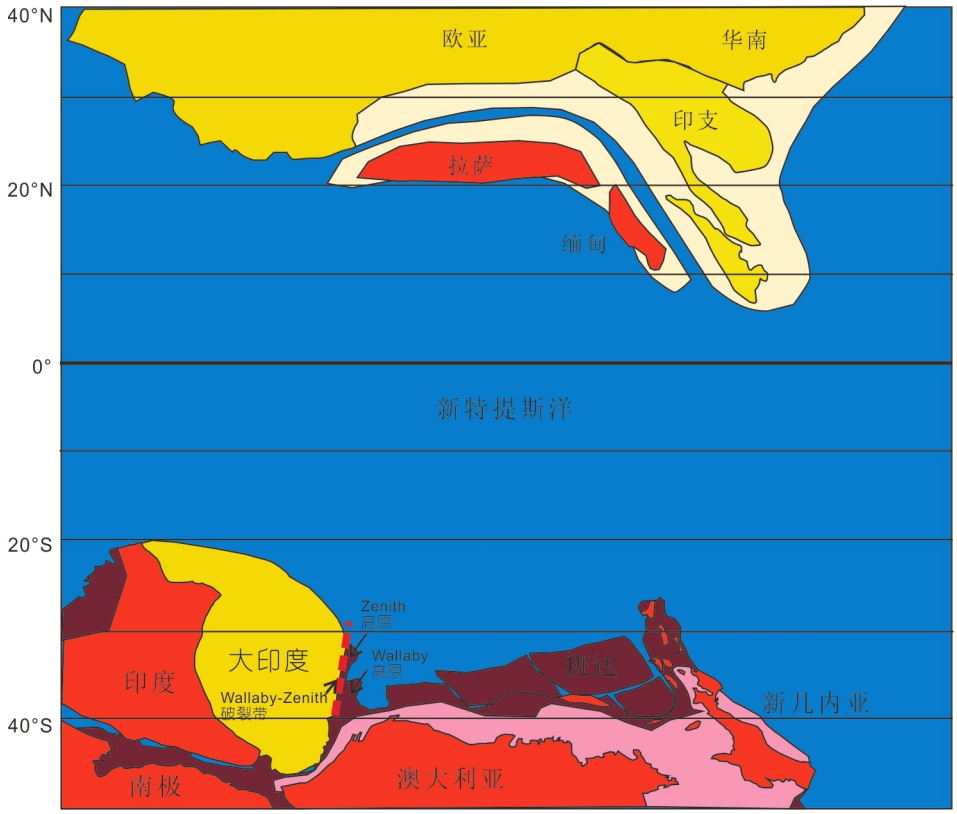

图 4　大印度从澳大利亚裂离的位置

Ali和Aitchison(2005)、Hall(2012)

大印度东部的边界, 其西北部和北部仍然无法准确限定. 我们在后面的古地磁讨论中采用Ali和Aitchison(2005)的大印度模型, 并参考了和他们类似的Hall(2012)古地理重建模型, 即略向北凸出的大印度(图4).

印度大陆最北部现今能直接观察到的岩石单元是特提斯喜马拉雅带, 它的古纬度变化无疑对于印度-欧亚大陆初始碰撞具有重要意义. 特提斯喜马拉雅带早新生代可靠的古地磁数据较少, Patzelt等(1996)对特提斯喜马拉雅南亚带岗巴和堆拉地区晚白垩世-古近纪地层进行古地磁学研究, 获得宗山组(71~65Ma)时期古纬度为(4.4°±4.4°)S, 宗浦组(63~55Ma)时期古纬度为(5.8°±3.8°)N. Yi等(2011)重新对岗巴地区宗浦组灰岩进行了古地磁研究, 结果表明62~59Ma期间的古纬度为(7.1°±3.5°)N, 59~56Ma期间的古纬度为(11.8°±2.5°)N. van Hinsbergen等(2012)通过对已有白垩纪古地磁数据的解释和修订, 认为印度大陆和特提斯喜马拉雅之间存在一个上千公里的大印度洋盆, Yang等(2015a)对特提斯喜马拉雅的古地磁研究也支持该观点.

4.2.2　欧亚南缘古纬度

数十年来, 国内外学者对欧亚南缘拉萨地块的白垩纪-始新世的火山岩和沉积岩开展了详细的古地磁学研究(唐祥德等, 2013; Achache等, 1984; Chen等, 2010, 2012, 2014; Huang等, 2013, 2015a; Li等, 2015, 2016; Lin和Watts, 1988; Ma等, 2014; Pozzi等, 1982; Sun等, 2010, 2012; Tan等, 2010; Westphal和Pozzi, 1983; Yang等, 2015b). 但是, 这些研究的结果差异较大, 拉萨地块南缘晚白垩世-古近纪古纬度估值变化范围从7°N一直到32°N, 而由此限定的印度-欧亚大陆初始碰撞时间范围从65~43Ma. 产生这些古纬度差异的主要原因可能有沉积岩的磁倾角浅化(Gilder等, 2001; Kodama, 2012; Tauxe, 2005; Yan等, 2005)、火山岩古地磁数据未平均掉地球磁场长期变影响(Sun等, 2012)、重磁化(Huang等, 2015a)和不严格的数据筛选方法(Lippert等, 2014)等. Yang等(2015b)和Ma等(2014)综合分析了已发表的拉萨地块白垩纪古地磁结果, 挑选出了116个可靠的火山岩古地磁采点数据, 计算得到拉萨地块南

缘白垩纪古纬度为~15°N. Lippert等(2014)对已有的白垩纪-始新世古地磁数据进行严格的筛选, 选取了有精确年代学限定的火山岩古地磁数据和有磁倾角浅化矫正的沉积岩古地磁数据进行综合分析, 认为拉萨地块南缘在白垩纪-古近纪时期一直位于16~22°N附近, 印度-欧亚碰撞后, 逐渐向北漂移至现今纬度(~30°N)附近. 总体来说, 我们倾向于相信拉萨地块南缘在晚白垩世-古新世时~15°N的古纬度. Yi等(2015)最近通过对拉萨地块西部亚热和狮泉河地区上白垩统火山岩的古地磁研究, 结合已发表数据, 认为欧亚大陆南缘—即拉萨地块南缘呈310°走向展布, 西部纬度略高, 东部略低.

结合大印度的范围, 通过印度北缘和欧亚大陆南缘白垩纪-始新世古纬度的对比, 可以直观有效地限定印度-欧亚大陆初始碰撞时间(Huang等, 2015a; Lippert等, 2014; Yi等, 2011). 以目前的数据来看, 如果拉萨地块南缘晚白垩世-始新世期间一直处于~15°N, 岗巴-定日地区古纬度采用Yi等(2011)的数据, 印度-欧亚大陆初始碰撞时间在52Ma(Hu等, 2016a), 这是古地磁数据所能独立得到的最年轻碰撞时代. 如果我们考虑大印度范围为950km(Ali和Aitchison, 2005), 特提斯喜马拉雅带缩短量为120~150km(DeCelles等, 2002), 那么推测的初始碰撞时间应该在65~60Ma(Yi等, 2011).

4.3 印度大陆前缘的碰撞早期岩浆活动

近年来研究发现, 喜马拉雅地区除了广泛分布的渐新世-中新世淡色花岗岩, 还发育有碰撞后更早期的岩浆活动, 即始新世中期花岗岩(吴福元等, 2015; Ding等, 2005). 这些花岗岩主要沿着雅鲁藏布缝合带南缘分布, 在空间上呈东西向带状展布, 侵位于特提斯喜马拉雅北缘. 从西往东包括普兰县东北部Xiao Gurla Range((43.9±0.9)Ma, Pullen等, 2011)、仲巴县东北部牛库((44.8±2.6)Ma, Ding等, 2005)、仁布县东部然巴(~44Ma, Liu等, 2014)和山南地区雅拉香波-打拉-确当(46~42Ma: 戚学祥等, 2008; Aikman等, 2008, 2012; Hou等, 2012; Zeng等, 2011, 2015)等多个地区. 该时期花岗岩多侵入穿切了早期的褶皱构造, 如在Xiao Gurla Range和牛库, 侵位于褶皱的核部(Ding等, 2005; Pullen等, 2011), 在雅拉香波地区侵位于穹窿的核部(Zeng等, 2011)或穿切明显褶皱缩短变形的三叠系地层(如打拉岩体)(Aikman等, 2008).

根据雅拉香波-打拉-确当地区的研究(谢克家等, 2010; Hou等, 2012; Zeng等, 2011, 2014), 该套岩石主要为二云母花岗岩, 整体具有高SiO_2(68.3~74.8wt%)和高Al_2O_3(13.4~17.0wt%, 多在15wt%以上)的特征, 属于过铝质系列(A/CNK=1.0~1.3). 然而, 该套岩石具有相对富钠贫钾的特征(Na_2O/K_2O=0.95~1.42, Na_2O/K_2O多在1以上), 具有中等-较高的稀土元素含量(REE=80~180ppm), 明显富集轻稀土、亏损重稀土(La/Yb=17~126, 平均为52), Eu异常不明显(Eu/Eu^*=0.57~1.71, 平均为0.83). 该套岩石高的Sr含量(252~1564ppm, 平均为358ppm)、Sr/Y比值(33~251, 平均为56)和La/Yb比值, 低的重稀土Yb(0.25~0.78ppm)和Y(3.30~8.77ppm)含量, 显示与埃达克质岩石相似的特征(图5). 然巴地区同期发育的斑状二云母花岗岩脉也具有类似的地球化学特征(Liu等, 2014). 该期岩石具有明显富集的Sr-Nd同位素组成($^{87}Sr/^{86}Sr(i)$=0.707696~0.719344; $\varepsilon_{Nd}(t)$= −14.94~−8.97; T_{DM2}=1.49~2.05Ga), 落入喜马拉雅淡色花岗岩范围内(Hou等, 2012; Liu等, 2014; Zeng等, 2011). 目前研究多认为, 该套岩石为碰撞早期阶段喜马拉雅北缘加厚下地壳部分熔融的产物, 源区组成以石榴角闪岩为主(谢克家等, 2010; Hou等, 2012; Liu等, 2014; Zeng等, 2011, 2015). 该套岩石为喜马拉雅北缘碰撞后最早的一期岩浆活动, 与拉萨地块南缘始新世中期岩浆活动同期发育, 因此很多学者认为该期岩浆活动可能与碰撞后新特提斯洋板片的断离有关(Hou等, 2012; Pullen等,

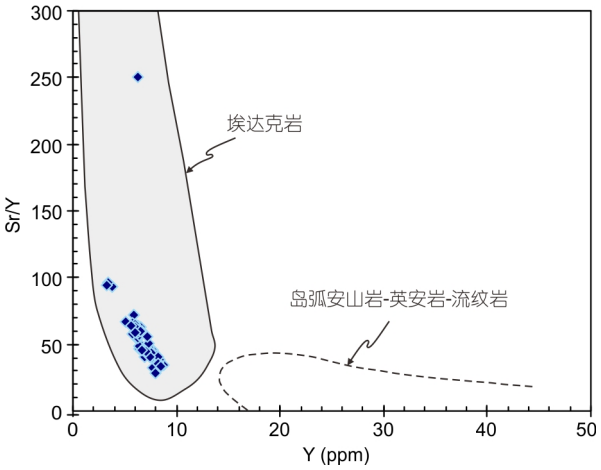

图 5 特提斯喜马拉雅碰撞早期岩浆岩地球化学特征(Ji等, 2016)

2011; Zeng等, 2011). 最近, Ji等(2016)在特提斯喜马拉雅北缘的江孜地区发现了同期((45.0±1.4)Ma)的OIB型辉长岩, 为软流圈直接来源的岩浆记录. 结合该时期岩浆活动主要沿着雅鲁藏布缝合带南缘呈东西向带状展布特点, 以及喜马拉雅西构造结地区同期变质记录, 进一步确认俯冲板片在始新世中期(~45Ma)发生了整体断离, 即该期花岗岩岩浆作用与板片断离引起的热扰动有关(Ji等, 2016). 特提斯喜马拉雅早期岩浆岩也限定印度与欧亚大陆碰撞发生时间不晚于45Ma.

5　印度与欧亚大陆碰撞方式和过程

碰撞是一个复杂过程, 因为碰撞前的大陆边缘有的非常平直, 有的却非常复杂, 包括陆缘弧、岛弧、微陆块和边缘海等. 初始碰撞首先在凸出点上开始, 进一步的大陆汇聚使得碰撞部位向开放的残留大洋岩石圈进行逆冲推覆或侧向走滑, 直至碰撞系统内的所有大洋岩石圈被俯冲、掩埋或圈闭掉, 全面碰撞阶段启动, 碰撞变形传递到更宽阔的两侧大陆之上. 相应地, 初始碰撞到全面碰撞阶段被称为“软碰撞”, 而全面碰撞以后的碰撞过程被称为“硬碰撞”(图3a和6). 印度与欧亚大陆碰撞方式和过程的争议主要集中在碰撞是两阶段还是单阶段, 两阶段碰撞模式可以进一步概括为洋内俯冲模式和大印度盆地模式. 洋内俯冲模式认为新特提斯洋的消亡是洋内俯冲和沿拉萨地

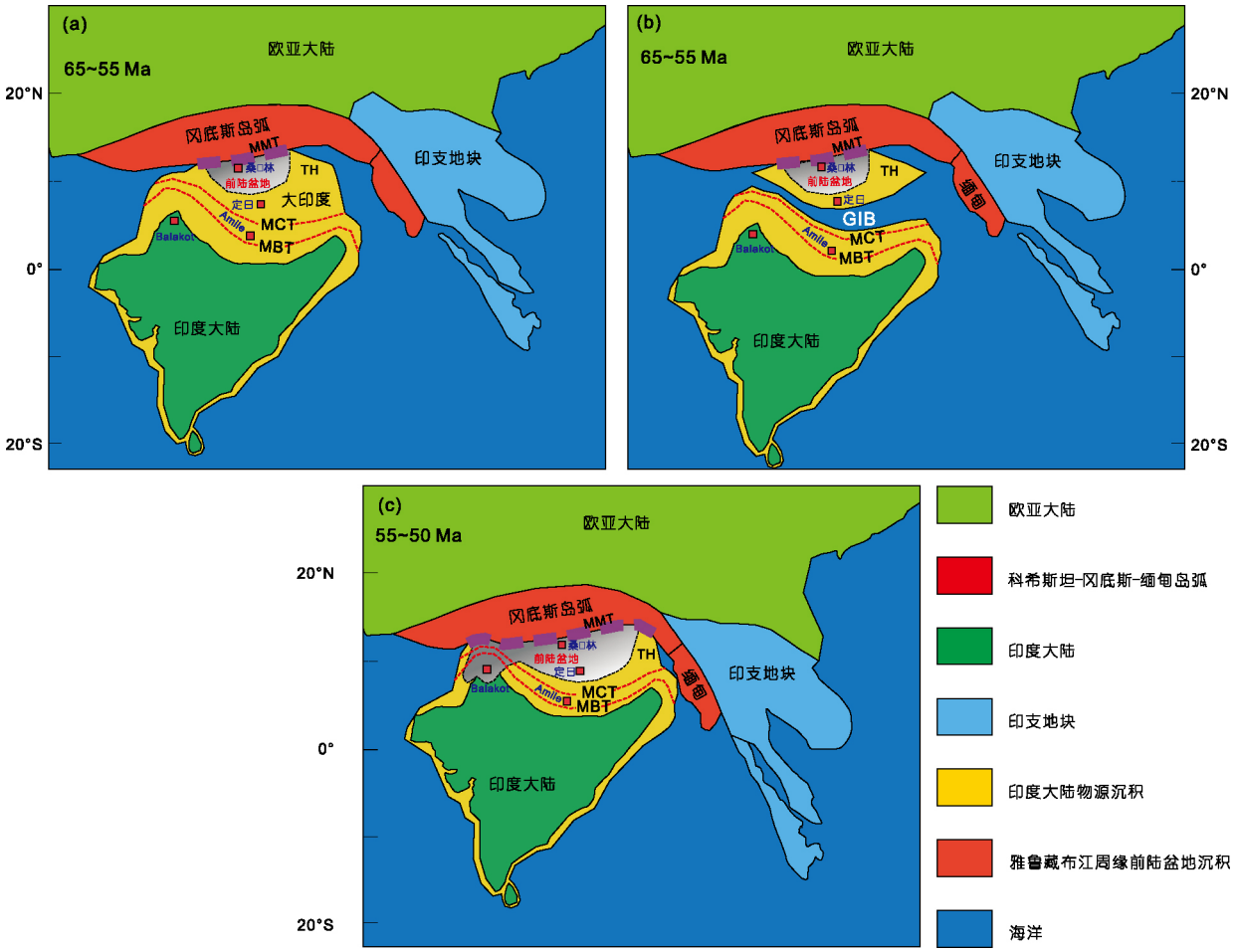

图 6　印度与欧亚大陆的碰撞过程和方式

(a) 大印度模型; (b) 大印度盆地模型; (c) 古新世末-始新世初前陆盆地范围. GIB, 大印度盆地; MBT, 主边界逆冲断裂; MCT, 主中央逆冲断裂; MMT, 主地幔逆冲断裂(碰撞缝合带); TH, 特提斯喜马拉雅

块南缘俯冲共同作用的结果. 洋内岛弧的设想在20世纪80年代即被提出(Allégre等, 1984), 但直到本世纪初才被详细研究. Aitchison等(2000)将泽当地区出露的一套晚侏罗世中基性火山岩和硅质岩定义为新特提斯洋洋内岛弧的残留, 认为雅鲁藏布江蛇绿岩为岛弧弧前蛇绿岩, 匮乏陆缘碎屑的白朗块体为洋内俯冲杂岩; 这套岛弧系统类似于现今西太平洋地区的伊豆-小笠原-马里亚纳(Izu-Bonin-Mariana)群岛洋内岛弧系统(Aitchison等, 2007b). 而对于被广泛接受的55~50Ma印度-欧亚大陆碰撞, Aitchison等(2007a)认为其只是洋内岛弧与印度陆缘的碰撞, 彼时大印度北缘(~14°N, Ali和Aitchison, 2005)和欧亚大陆南缘(~28°N, Ali和Aitchison, 2006)相距甚远. 岛弧和印度大陆碰撞后一起继续向北漂移, 并在~34Ma和欧亚大陆碰撞, 同时印度陆缘海相沉积结束、欧亚南缘发育磨拉石沉积、冈底斯弧俯冲型岩浆活动停止等.

然而, 洋内岛弧模式中的关键证据一直都备受质疑(Hu等, 2016a). 泽当岛弧本身的岩石地球化学特征和冈底斯弧并无明显的差别, 且二者之间并没有能代表残留洋盆的蛇绿岩或混杂岩带, 因此泽当岛弧更可能是冈底斯弧的一部分, 而非独立的洋内岛弧(Zhang等, 2014). Abrajevitch等(2005)用来限定洋内岛弧古地理位置的蛇绿岩古地磁数据存在明显的倾角浅化, 因此得出的古纬度偏低. 此外, Aitchison等(2007a)用来重建欧亚南缘古地理位置的古地磁数据(28°N)是根据视极移曲线计算得出的数据. 更可靠的古地磁数据则显示蛇绿岩形成于欧亚大陆南缘, 而非洋内环境(Huang等, 2015c). 实测古地磁数据显示欧亚大陆南缘在~50Ma的古纬度为~20°N, 印度-欧亚至少在50Ma就已经发生了古地理位置的重合(Liebke等, 2010; Lippert等, 2014).

大印度盆地(Greater Indian Basin, GIB)模型是van Hinsbergen等(2012)基于特提斯喜马拉雅和印度克拉通之间在晚白垩世的巨大古纬度差异提出的. 特提斯喜马拉雅在白垩纪早期与印度克拉通连接在一起, 但在白垩纪(120~70Ma)二者之间产生了~24°(~2675km)的古纬度差(van Hinsbergen等, 2012). 虽然Yi等(2011)认为这只是反映了大印度北缘在当时的强烈伸展, 但van Hinsbergen等(2012)则认为伸展最终形成了大印度洋盆. 特提斯喜马拉雅从印度拉伸而出成为一个单独的块体, 并在~50Ma和欧亚大陆南缘碰撞; 而大印度盆地在25~20Ma沿MCT俯冲消亡(van Hinsbergen等, 2012). 最近对特提斯喜马拉雅带早白垩世古地磁学的研究支持了该模型(Yang等, 2015a), 但这些研究根据欧亚大陆南缘、特提斯喜马拉雅块体和印度克拉通的古纬度变化历史, 将特提斯喜马拉雅和欧亚大陆的碰撞时间限定在~55Ma, 印度和特提斯喜马拉雅的碰撞时间限定在40~37Ma(Ma等, 2016; Yang等, 2015a).

DeCelles等(2014)对GIB模型进行了系统评述, 指出代表印度陆缘伸展作用的早白垩世火山岩只出露在特提斯喜马拉雅带内部, 而未分布在代表印度克拉通边缘的低喜马拉雅地区, 该地区也未发育和GIB有关的沉积记录, 因此如果GIB存在, 其最后关闭的缝合带应在STDS(藏南拆离系)以北, 而不是MCT. 此外, 特提斯喜马拉雅块体的碎屑物质在~45Ma即已沉积到低喜马拉雅地区的印度前陆盆地内, 但欧亚物源沉积没有达到尼泊尔地区的低喜马拉雅山, 如Amile地区(图6; DeCelles等, 2004). 如果GIB模型确实成立的话, 印度克拉通和特提斯喜马拉雅块体的碰撞也应该发生在45Ma之前, 而不是更晚的40~37Ma甚至25Ma, 这样才能合理解释特提斯喜马拉雅和高喜马拉雅地区在~45Ma发生的一系列和碰撞相关的地壳缩短、埋藏变质和深熔作用(DeCelles等, 2014). Ding等(2016b)在巴基斯坦地区的工作进一步表明, 欧亚来源的碎屑锆石在始新世早期(55Ma)已经沉积到印度大陆之上的Balakot地区(图6a和c). 这要求GIB缝合带和Indus缝合带在此之前一定已经关闭, 否则欧亚大陆的碎屑物质无法沉积到印度大陆之上(图6c).

雅鲁藏布江缝合带中部萨嘎地区桑单林剖面晚白垩世地层物源研究结果表明, 萨嘎地区前陆盆地的基底沉积在上白垩统马斯特里赫特阶宗卓组石英砂岩之上, 石英砂岩是典型的印度被动大陆边缘重力流沉积(丁林等, 2009; DeCelles等, 2014; 丁林, 2003; Ding等, 2005; Hu等, 2015; Wu等, 2014). 岗巴-定日一带, 下古新统基督拉组是纯净的石英砂岩, 其碎屑物质来源于印度大陆(DeCelles等, 2014). 因而大印度盆地(GIB)的出现不可能早于基督拉石英砂岩地层的沉积时间(~65Ma).

因而, 结合MCT或STDS(藏南拆离系)北侧的西藏桑单林-定日及南侧的巴基斯坦北部Balakot晚白垩世-古近纪的沉积证据, 如果GIB曾经存在, 其开始伸展的时间要晚于65Ma, 关闭时间要早于55Ma. 仅仅

~10Ma之内(65~55Ma)不可能完成从大洋扩张到封闭的Wilson旋回, 最有可能的情况是大印度盆地根本就不存在. 基于古地磁数据提出的"大印度盆地"或"陆间盆地"模型, 可能反映的是白垩纪期间大印度板块自身近90°的逆时针水平旋转所导致的印度大陆和特提斯喜马拉雅的古纬度相对变化(图4, 张也和黄宝春, 见本辑; Klootwijk等, 1992; Wang等, 2014), 而并不能说明白垩纪时期印度和特提斯喜马拉雅之间存在着N-S向伸展. 但Huang等(2015b)并不认为旋转可以抵消这种纬度差.

相对于两阶段碰撞模式, 单阶段碰撞模式认为印度-欧亚碰撞是新特提斯洋大洋岩石圈沿欧亚大陆南缘俯冲消亡的结果, 不发育洋内俯冲带和岛弧, 因此当这唯一的一条俯冲带关闭之后, 印度大陆北缘和欧亚大陆南缘直接接触和碰撞(Yin和Harrison, 2000). 这种模型符合一系列沉积、构造、变质和岩浆作用, 因此, 作者倾向于认同单阶段碰撞模式.

6 结论

(1) 大陆碰撞是指活动大陆边缘及其相连的增生楔加载到被动大陆边缘之上, 形成周缘前陆盆地系统, 残留洋壳在碰撞部位以蛇绿岩形式构造侵位, 缝合带及两侧大陆岩石圈同时发生强烈变形、变质及岩浆作用的造山过程.

(2) 如果把碰撞阶段定义为从初始碰撞开始, 延续到汇聚停止为止, 那么印度与欧亚大陆的碰撞仍在继续进行, 可能还会持续近100Ma. 在实际工作中, 不同学科的学者通常喜欢从自己学科的角度来定义碰撞. 因此造成对印度和欧亚大陆初始碰撞时间认识的巨大差异, 我们建议使用多学科结合、相互验证的方法, 以避免以偏概全、以点带面的现象发生, 尽量将每个阶段发生的事件真实地还原到碰撞造山演化的时间序列中.

(3) 最新研究表明, 印度-欧亚初始碰撞首先发生于雅鲁藏布江缝合带中部, 时间最早为65~63Ma, 碰撞自中部向东西两侧穿时性进行, 而不是普遍接受的碰撞于55~50Ma首先发生在西构造结, 然后由西向东的单向穿时性碰撞.

(4) 大印度与欧亚大陆初始碰撞的位置位于北纬10°~15°N附近, 印度-欧亚碰撞后, 碰撞带逐渐向北漂移至现在纬度(~30°N)附近. 古地磁数据预测的"大印度盆地"伸展模型目前还没有得到任何地质证据的支持, 白垩纪早期以来特提斯喜马拉雅块体与印度克拉通之间的纬度变化可能是大印度由东西向到南北向的持续旋转造成的, 与伸展无关.

参考文献

丁林. 2003. 西藏雅鲁藏布江缝合带古新世深水沉积和放射虫动物群的发现及对前陆盆地演化的制约. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 47–58

丁林, 钟大赉. 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 385–397

丁林, 蔡福龙, 王厚起, 李振宇, 李翌芃. 2013. 大陆碰撞时间研究方法. 见: 丁仲礼, 主编. 固体地球科学研究方法. 北京: 科学出版社. 842–853

丁林, 蔡福龙, 张清海, 张利云, 许强, 杨迪, 刘德亮, 钟大赉. 2009. 冈底斯-喜马拉雅碰撞造山带前陆盆地系统及构造演化. 地质科学, 44: 1289–1311

李国彪, 万晓樵, 其和日格, 梁定益, 刘文灿. 2002. 藏南岗巴-定日地区始新世化石碳酸盐岩微相与沉积环境. 中国地质, 29: 401–406

戚学祥, 曾令森, 孟祥金, 许志琴, 李天福. 2008. 特提斯喜马拉雅打拉花岗岩的锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义. 岩石学报, 24: 1501–1508

唐祥德, 黄宝春, 杨列坤, 易治宇, 乔庆庆, 陈力为. 2013. 拉萨地块中部晚白垩世火山岩Ar-Ar年代学和古地磁研究结果及其构造意义. 地球物理学报, 56: 136–149

万晓樵, 梁定益, 李国彪. 2002. 西藏岗巴古新世地层及构造作用的影响. 地质学报, 76: 155–162

吴福元, 刘志超, 刘小驰, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩. 岩石学报, 31: 1–36

谢克家, 曾令森, 刘静, 高丽娥. 2010. 西藏南部晚始新世打拉埃达克质花岗岩及其构造动力学意义. 岩石学报, 26: 1016–1026

张进江, 季建清, 钟大赉, 丁林, 何顺东. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 373–383

Abrajevitch A, Ali J, Aitchison J, Badengzhu J, Davis A, Liu J, Ziabrev S. 2005. Neotethys and the India-Asia collision: Insights from a palaeomagnetic study of the Dazhuqu ophiolite, southern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 233: 87–102

Achache J, Courtillot V, Xiu Z Y. 1984. Paleogeographic and tectonic evolution of southern Tibet since Middle Cretaceous time: NEw paleomagnetic data and synthesis. J Geophys Res, 89: 10311–10339

Aikman A B, Harrison T M, Lin D. 2008. Evidence for early (>44 Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 274: 14–23

Aikman A B, Harrison T M, Hermann J. 2012. The origin of Eo- and Neo-

himalayan granitoids, Eastern Tibet. J Asian Earth Sci, 58: 143–157

Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. 2007a. When and where did India and Asia collide? J Geophys Res, 112: B05423

Aitchison J C, McDermid I R C, Ali J R, Davis A M, Zyabrev S V. 2007b. Shoshonites in southern Tibet record Late Jurassic rifting of a Tethyan Intraoceanic Island Arc. J Geol, 115: 197–213

Aitchison J C, Badengzhu J C, Davis A M, Liu J, Luo H, Malpas J G, McDermid I R C, Wu H, Ziabrev S V, Zhou M. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). Earth Planet Sci Lett, 183: 231–244

Ali J R, Aitchison J C. 2005. Greater India. Earth-Sci Rev, 72: 169–188

Ali J R, Aitchison J C. 2006. Positioning Paleogene Eurasia problem: Solution for 60–50 Ma and broader tectonic implications. Earth Planet Sci Lett, 251: 148–155

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 C, Chang C F, Li G Q, Lin B Y, Teng J W, Wang N W, Chen G M, Han T L, Wang X B, Den W M, Sheng H B, Cao Y G, Zhou J, Qiu H G, 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

Argand E. 1924. La tectonique de l' Asie. Brussels: Proceedings of the VIIIth International Geological Congress. 181–372

Batra R S. 1989. A Reinterpretation of the Geology and Biostratigraphy of the Lower Tertiary Formations exposed along the Bilaspur-Shimla Highway, Himachal Pradesh, India. J Geol Soc Ind, 33: 503–523

Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, Riley G W, Barndt J K, Berry J R, Afzal J, Khan A M, Jurgen H, Metje J, Cheema A, Shafique N A, Lawrence R D, Khan M A. 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia. Nature, 373: 55–58

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

Bossart P, Ottiger R. 1989. Rocks of the Murree Formation in northern Pakistan: Indicators of a descending foreland basin of late Paleocene to middle Eocene age. Eclogae Geol Helv, 82: 133–165

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

Brown B J, Müller R D, Struckmeyer H I M, Gaina C, Stagg H, Symonds P. 2003. Formation and evolution of Australian passive margins: Implications for locating the boundary between continental and oceanic crust. Geol Soc Am Spec, 372: 223–243

Burg J P, Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. Nature, 311: 219–223

Cai F, Ding L, Yue Y. 2011. Provenance analysis of upper Cretaceous strata in the Tethys Himalaya, southern Tibet: Implications for timing of India-Asia collision. Earth Planet Sci Lett, 305: 195–206

Chen J, Huang B, Yi Z, Yang L, Chen L. 2014. Paleomagnetic and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological results from the Linzizong Group, Linzhou Basin, Lhasa Terrane, Tibet: Implications to Paleogene paleolatitude and onset of the India-Asia collision. J Asian Earth Sci, 96: 162–177

Chen J, Huang B, Sun L. 2010. New constraints to the onset of the India-Asia collision: Paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa Block, China. Tectonophysics, 489: 189–209

Chen W, Yang T, Zhang S, Yang Z, Li H, Wu H, Zhang J, Ma Y, Cai F. 2012. Paleomagnetic results from the Early Cretaceous Zenong Group volcanic rocks, Cuoqin, Tibet, and their paleogeographic implications. Gondwana Res, 22: 461–469

Clift P D, Carter A, Krol M, Kirby E. 2002. Constraints on India-Eurasia collision in the Arabian Sea region taken from the Indus Group, Ladakh Himalaya, India. In: Clift P D, Kroon D, Gaedicke C, et al., eds. The tectonic and climatic evolution of the Arabian Sea region. Geol Soc Lon Spec Publ, 195: 97–116

Critelli S, Garzanti E. 1994. Provenance of the Lower Tertiary Murree redbeds (Hazara-Kashmir Syntaxis, Pakistan) and initial rising of the Himalayas. Sediment Geol, 89: 265–284

DeCelles P G, Gehrels G E, Najman Y, Martin A J, Carter A, Garzanti E. 2004. Detrital geochronology and geochemistry of Cretaceous-Early Miocene strata of Nepal: Implications for timing and diachroneity of initial Himalayan orogenesis. Earth Planet Sci Lett, 227: 313–330

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

DeCelles P G, Robinson D M, Zandt G. 2002. Implications of shortening in the Himalayan fold-thrust belt for uplift of the Tibetan Plateau. Tectonics, 21: 12-1–12-25

Ding H, Zhang Z, Dong X, Tian Z, Xiang H, Mu H, Gou Z, Shui X, Li W, Mao L. 2016a. 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, Wan X. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. Tectonics, 24: TC3001

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

Ding L, Qasim M, Jadoon I A K, Khan M A, Xu Q, Cai F, Wang H, Baral U, Yue Y. 2016b. The India-Asia collision in north Pakistan: Insight from the U-Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin.

Earth Planet Sci Lett, 455: 49–61

Ding L, Zhong D, Yin A, Kapp P, Harrison T M. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). Earth Planet Sci Lett, 192: 423–438

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

Fuchs G, Willems H. 1990. The final stages of sedimentation in the Tethyan zone of Zanskarr and their geodynamic significance (Ladakh-Himalaya). Jahrbuche Geol Bundenstalt, 133: 259–273

Gaetani M, Garzanti E. 1991. Multicyclic History of the Northern India Continental-Margin (Northwestern Himalaya). AAPG Bull, 75: 1427–1446

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

Gilder S, Chen Y, Sen S. 2001. Oligo-Miocene magnetostratigraphy and rock magnetism of the Xishuigou section, Subei (Gansu Province, western China) and implications for shallow inclinations in central Asia. J Geophys Res, 106: 30505–30521

Hall R. 2012. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. Tectonophysics, 570-571: 1–41

Henderson A L, Najman Y, Parrish R, Mark D F, Foster G L. 2011. Constraints to the timing of India-Eurasia collision: A re-evaluation of evidence from the Indus Basin sedimentary rocks of the Indus-Tsangpo Suture Zone, Ladakh, India. Earth-Sci Rev, 106: 265–292

Hou Z Q, Zheng Y C, Zeng L S, Gao L E, Huang K X, Li W, Li Q Y, Fu Q, Liang W, Sun Q Z. 2012. Eocene-Oligocene granitoids in southern Tibet: Constraints on crustal anatexis and tectonic evolution of the Himalayan orogen. Earth Planet Sci Lett, 349-350: 38–52

Hu X, 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, Wang J, 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

Hu X, 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, Sinclair H D, Wang J, Jiang H, Wu F. 2012. Late Cretaceous-Palaeogene stratigraphic and basin evolution in the Zhepure Mountain of southern Tibet: Implications for the timing of India-Asia initial collision. Basin Res, 24: 520–543

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, Dupont-Nivet G, Lippert P C, van Hinsbergen D J J, Dekkers M J, Waldrip R, Ganerød M, Li X, Guo Z, Kapp P. 2015a. 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

Huang W, van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Guo Z, Dupont-Nivet G. 2015b. Paleomagnetic tests of tectonic reconstructions of the India-Asia collision zone. Geophys Res Lett, 42: 2642–2649

Huang W, van Hinsbergen D J J, Maffione M, Orme D A, Dupont-Nivet G, Guilmette C, Ding L, Guo Z, Kapp P. 2015c. Lower Cretaceous Xigaze ophiolites formed in the Gangdese forearc: Evidence from paleomagnetism, sediment provenance, and stratigraphy. Earth Planet Sci Lett, 415: 142–153

Jaeger J J, Courtillot V, Tapponnier P. 1989. Paleontological view of the ages of the Deccan Traps, the Cretaceous/Tertiary boundary, and the India-Asia collision. Geology, 17: 316–319

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

Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, Misawa K, Ishikawa M, Rehman H U, Kausar A B, Shiraishi K. 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: Sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia. J Metamorph Geol, 21: 589–599

Klootwijk C T, Conaghan P J, Nazirullah R, de Jong K A. 1994. Further palaeomagnetic data from Chitral (Eastern Hindukush): Evidence for an early India-Asia contact. Tectonophysics, 237: 1–25

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

Kodama K P. 2012. Paleomagnetism of Sedimentary Rocks: Process and Interpretation. Hoboken: John Wiley & Sons

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 Z, Ding L, Song P, Fu J, Yue Y. 2017. Paleomagnetic constraints on the paleolatitude of the Lhasa block during the Early Cretaceous: Implications for the onset of India-Asia collision and latitudinal shortening estimates across Tibet and stable Asia. Gondwana Res, 41: 352–372

Li Z, Ding L, Lippert P C, Song P, Yue Y, van Hinsbergen D J J. 2016. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic drift of the Lhasa terrane

(Tibet) from Gondwana to Eurasia. Geology, 44: 727–730

Liebke U, Appel E, Ding L, Neumann U, Antolin B, Xu Q. 2010. Position of the Lhasa terrane prior to India-Asia collision derived from palaeomagnetic inclinations of 53 Ma old dykes of the Linzhou Basin: Constraints on the age of collision and post-collisional shortening within the Tibetan Plateau. Geophys J Int, 182: 1199–1215

Lin J, Watts D R. 1988. Palaeomagnetic results from the Tibetan Plateau. Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci, 327: 239–262

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 Am Spec Pap, 507: 1–21

Liu Z C, Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z. 2014. Petrogenesis of the Ramba leucogranite in the Tethyan Himalaya and constraints on the channel flow model. Lithos, 208-209: 118–136

Ma Y, Yang T, Bian W, Jin J, Zhang S, Wu H, Li H. 2016. Early Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results from the Tethyan Himalaya: Insights into the Neotethyan paleogeography and the India-Asia collision. Sci Rep, 6: 21605

Ma Y, Yang T, Yang Z, Zhang S, Wu H, Li H, Li H, Chen W, Zhang J, Ding J. 2014. Paleomagnetism and U-Pb zircon geochronology of Lower Cretaceous lava flows from the western Lhasa terrane: New constraints on the India-Asia collision process and intracontinental deformation within Asia. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 7404–7424

Meng J, Wang C, Zhao X, Coe R, Li Y, Finn D. 2012. India-Asia collision was at 24°N and 50 Ma: Palaeomagnetic proof from southernmost Asia. Sci Rep, 2: 925

Najman Y. 2005. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins. Earth-Sci Rev, 74: 1–72

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

Najman Y, Pringle M, Godin L, Oliver G. 2001. Dating of the oldest continental sediments from the Himalayan foreland basin. Nature, 410: 194–197

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

Pozzi J P, Westphal M, Xiu Zhou Y, Sheng Xing L, Yao Chen X. 1982. Position of the Lhasa block, South Tibet, during the late Cretaceous. Nature, 297: 319–321

Pullen A, Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Ding L. 2011. Cenozoic anatexis and exhumation of Tethyan Sequence rocks in the Xiao Gurla Range, Southwest Tibet. Tectonophysics, 501: 28–40

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

Rowley D B. 1998. Minimum age of initiation of collision between India and Asia North of everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain section. J Geol, 106: 220–235

Searle M P, Windley B F, Coward M P, Cooper D J W, Rex A J, Rex D, Tingdong L, Xuchang X, Jan M Q, Thakur V C, Kumar S. 1987. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya. Geol Soc Am Bull, 98: 678–701

Sun Z, Jiang W, Li H, Pei J, Zhu Z. 2010. New paleomagnetic results of Paleocene volcanic rocks from the Lhasa block: Tectonic implications for the collision of India and Asia. Tectonophysics, 490: 257–266

Sun Z, Pei J, Li H, Xu W, Jiang W, Zhu Z, Wang X, Yang Z. 2012. Palaeomagnetism of late Cretaceous sediments from southern Tibet: Evidence for the consistent palaeolatitudes of the southern margin of Eurasia prior to the collision with India. Gondwana Res, 21: 53–63

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

Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, Andrieux J, Armijo R, Bassoullet J P, Brunel M, Burg J P, Colchen M, Dupré B, Girardeau J, Marcoux J, Mascle G, Matte P, Nicolas A, Li T D, Xiao X C, Chang C F, Lin G C, Wang N W, Chen G M, Han T L, Wang X B, Den W M, Zhen H X, Sheng H B, Cao Y G, Zhou J, Qiu H R. 1981. The Tibetan side of the India-Eurasia collision. Nature, 294: 405–410

Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. Geology, 10: 611–616

Tauxe L. 2005. Inclination flattening and the geocentric axial dipole hypothesis. Earth Planet Sci Lett, 233: 247–261

Tonarini S, Villa I M, Oberli F, Meier M, Spencer D A, Pognante U, Ramsay J G. 1993. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: Implications for India-Eurasia collision. Terra Nova, 5: 13–20

Treloar P J, O'Brien P J, Parrish R R, Khan M A. 2003. Exhumation of early Tertiary, coesite-bearing eclogites from the Pakistan Himalaya. J Geol Soc, 160: 367–376

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

Wang C, Dai J, Zhao X, Li Y, Graham S A, He D, Ran B, Meng J. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. Tectonophysics, 621: 1–43

Wang C, Li X, Hu X, Jansa L F. 2002. Latest marine horizon north of Qomolangma (Mt Everest): Implications for closure of Tethys seaway and collision tectonics. Terra Nova, 14: 114–120

Wang H Q, Ding L, Cai F L, Xu Q, Li S, Fu J J, Lai Q Z, Yue Y H, Li X. 2017. Early Tertiary deformation of the Zhongba-Gyangze Thrust in central southern Tibet. Gondwana Res, 41: 235–248

Wang J, Hu X, Jansa L, Huang Z. 2011. Provenance of the Upper Cretaceous-Eocene deep-water sandstones in Sangdanlin, Southern Tibet: Constraints on the timing of initial India-Asia collision. J Geol, 119: 293–309

Westphal M, Pozzi J P. 1983. Paleomagnetic and plate tectonic constraints on the movement of Tibet. Tectonophysics, 98: 1–10

Wilke F D H, O'Brien P J, Gerdes A, Timmerman M J, Sudo M, Khan M A. 2010. The multistage exhumation history of the Kaghan Valley UHP series, NW Himalaya, Pakistan from U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages. Eur J Mineral, 22: 703–719

Willems H, Zhou Z, Zhang B, Gräfe K U. 1996. Stratigraphy of the upper cretaceous and lower tertiary strata in the Tethyan Himalayas of Tibet (Tingri area, China). Geol Rundsch, 85: 723–754

Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z, Chung S L, Clift P D. 2014. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision. Am J Sci, 314: 548–579

Wu F Y, Clift P D, Yang J H. 2007. Zircon Hf isotopic constraints on the sources of the Indus Molasse, Ladakh Himalaya, India. Tectonics, 26: TC2014

Xu Z, Ji S, Cai Z, Zeng L, Geng Q, Cao H. 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology. Gondwana Res, 21: 19–36

Yan M, Van der Voo R, Tauxe L, Fang X, M Parés J. 2005. Shallow bias in Neogene palaeomagnetic directions from the Guide Basin, NE Tibet, caused by inclination error. Geophys J Int, 163: 944–948

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

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

Yi Z, Huang B, Yang L, Tang X, Yan Y, Qiao Q, Zhao J, Chen L. 2015. A quasi-linear structure of the southern margin of Eurasia prior to the India-Asia collision: First paleomagnetic constraints from Upper Cretaceous volcanic rocks near the western syntaxis of Tibet. Tectonics, 34: 1431–1451

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

Zeng L, Gao L E, Tang S, Hou K, Guo C, Hu G. 2015. Eocene magmatism in the Tethyan Himalaya, southern Tibet. Geol Soc London Spec Publ, 412: 287–316

Zeng L, Gao L E, Xie K, Liu-Zeng J. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust. Earth Planet Sci Lett, 303: 251–266

Zhang L L, Liu C Z, Wu F Y, Ji W Q, Wang J G. 2014. Zedong terrane revisited: An intra-oceanic arc within Neo-Tethys or a part of the Asian active continental margin? J Asian Earth Sci, 80: 34–55

Zhang Q, 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. J Geol, 120: 175–189

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

Zhuang G, 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