早白垩世存在刚性/准刚性大印度板块的古地磁学新证据

张也, 黄宝春*, 赵千

北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: bchuang@pku.edu.cn

2019-03-11 收稿, 2019-05-22 修回, 2019-05-22 接受, 2019-06-25 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03010100)资助

摘要 白垩纪期间特提斯喜马拉雅地块与印度克拉通之间的构造关系, 是正确认识印度与欧亚大陆碰撞(简称印欧碰撞)模式的关键. 本研究通过对特提斯喜马拉雅东部浪卡子县工布学乡下白垩统桑秀组岩石的系统古地磁学和年代学研究, 结合早白垩世冈瓦纳大陆的重建和印度板块白垩纪的运动轨迹, 在对比分析特提斯喜马拉雅地块早白垩世以来古地磁数据的基础上, 提出印欧初始碰撞前存在一个刚性/准刚性的大印度板块, 印欧碰撞仍为经典的陆陆碰撞. 首先, 对采样剖面顶部砂岩和底部安山岩的U-Pb锆石年代学研究限定了桑秀组火山岩的喷发年龄为早白垩世的~134 Ma. 其次, 岩石磁学研究表明携带高温(高场)特征剩磁分量的主要磁性载体为磁铁矿和钛磁铁矿; 进一步古地磁测试分析在采样剖面褶皱两翼共23个采点中获得了可靠的特征剩磁组分, 经相邻熔岩流古地磁方向去重检验后的特征剩磁平均方向和对应该古地磁极位置分别为 $D^*/I^*=308.7^\circ/-57.6^\circ$, $k=29.5$, $\alpha_{95}=8.5^\circ(N=11)$ 和 $6.3^\circ N$, $308.6^\circ E(A_{95}=9.1^\circ)$. 特征剩磁分量在99%置信水平上通过了褶皱检验和地球磁场长期变模型的检验, 指示其为早白垩世末期区域褶皱形成之前获得的剩磁组分, 并有效地平均掉了古地球磁场的长期变化. 因此, 该特征剩磁组分很可能代表了桑秀组火山岩形成时获得的原生剩磁. 结果表明, 早白垩世特提斯喜马拉雅地块的观测古纬度和古磁偏角与由同时期印度板块古地磁参考极计算获得的期望古纬度和古磁偏角完全一致, 指示藏南桑秀组火山岩形成时期特提斯喜马拉雅与印度克拉通之间具有刚性/准刚性板块的特征.

关键词 特提斯喜马拉雅, 大印度板块, 早白垩世, 古地磁学, 印欧碰撞, 刚性板块

印度与亚洲大陆的碰撞是显生宙以来地球上发生的最重要造山事件^[1], 造就了世界上最大规模的喜马拉雅造山带^[2-4]. 印欧碰撞后的持续作用导致了地表大面积隆升^[5], 形成了举世瞩目的第三极—青藏高原. 显然, 初始碰撞发生的时限、古地理位置和碰撞模式是构建印度与欧亚大陆碰撞模型的重要边界条件, 亦是青藏高原造山带地质演化过程和大陆动力学研究的3个基本科学问题和起点^[5-9]. 古地磁学作为研究块体运动的最有效定量/半定量手段, 在造山带构造演化过程研究中发挥了重要作用^[8,9]. 针对喜马拉雅造山带这样一个由近南北向陆陆碰撞形成的碰撞带, 在缝合带两侧开

展古地磁学研究, 从理论上讲, 古地磁数据的独特内涵能够对上述基本科学问题提供有效制约^[10].

然而, 尽管近十多年来各国学者在青藏高原及其邻区开展了新一轮的晚中生代-新生代古地磁学研究, 但迄今为止围绕上述3个基本科学问题仍存在很大争议. 比如, 迄今仍未对印欧碰撞期间亚洲大陆南缘的古纬度形成统一认识, 目前报道的拉萨地块白垩纪-始新世的古纬度从约 $8^\circ\sim 26^\circ N$ 不等^[11-34]. 尽管来自特提斯喜马拉雅的上白垩统宗山组^[35]和古新统宗浦组^[36]的两个高质量古地磁结果较好地限定了初始碰撞发生前后大印度板块北缘的古地理位置, 但由于同时期亚洲大陆

引用格式: 张也, 黄宝春, 赵千. 早白垩世存在刚性/准刚性大印度板块的古地磁学新证据. 科学通报, 2019, 64: 2225-2244

Zhang Y, Huang B C, Zhao Q. New paleomagnetic positive proof of the rigid or quasi-rigid Greater Indian plate during the Early Cretaceous (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2225-2244, doi: [10.1360/N972019-00196](https://doi.org/10.1360/N972019-00196)

南缘古地理位置的争议,导致不同学者获得的初始碰撞时间亦从约70~35 Ma不等^[11,12,19~22,27,28,37]。与此同时,源于晚白垩世特提斯喜马拉雅和印度克拉通之间的巨大古纬度差异,经典的印欧陆陆碰撞模式^[38~40]受到了“弧陆+陆陆”碰撞模式^[37]、“大印度洋伸展+双陆陆”碰撞模式^[28,41],甚至增生碰撞模式^[42,43]等的挑战。

通过对白垩纪以来特提斯喜马拉雅和印度克拉通的古地理重建研究分析,Zhang和Huang^[44]发现晚白垩世特提斯喜马拉雅和印度克拉通之间的巨大古纬度差主要源自于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板块内部不同参考点之间古纬度的相对变化。另一方面,DeCelles等人^[45]基于代表印度陆缘伸展作用的早白垩世火山岩的空间分布对所谓的“大印度洋盆地缝合带”的位置也提出了质疑,认为缝合带应位于藏南拆离带(STDS)以北,而不是主中央断层(MCT)。同时,结合欧亚源的碎屑锆石研究,认为印度克拉通与特提斯喜马拉雅的碰撞应发生在约45 Ma甚至更早^[45,46]。此外,特提斯喜马拉雅上白垩统床得组的古地磁数据与同时期印度克拉通的视极移曲线的对比亦不支持在白垩纪期间二者之间存在一个宽泛的洋盆^[47]。因此,尽管在印欧初始碰撞时限和古地理位置上仍存在较大争议,然而,单就碰撞方式而言,传统的陆陆碰撞似乎比“洋盆伸展+双陆陆”等碰撞模式更加可信。由此引出的关键问题是,印欧初始碰撞前是否存在一个由现今印度克拉通和特提斯喜马拉雅地块组成的刚性或准刚性的大印度板块^[4,37],即白垩纪期间印度克拉通和特提斯喜马拉雅地块二者在运动学上是否作为一个统一的整体?

假设现今近东西向展布的雅鲁藏布江构造带是大印度板块和亚洲大陆碰撞的直接缝合带^[1,48~50],则位于雅鲁藏布江缝合带南侧的特提斯喜马拉雅应该是碰撞前大印度板块的连续北缘^[36]。因此,特提斯喜马拉雅的古地磁数据可用于限制大印度板块的北向延伸大小及印欧初始碰撞的时限等^[35,36]。同时,依据古地磁学理论,刚性或准刚性板块的运动等价于一个刚性质点的运动;则作为大印度板块一部分的特提斯喜马拉雅地块内部任一参考点在印欧碰撞前任一时段的观测古地磁方向(包括古纬度和古磁偏角)必定与由印度克拉通同时段古地磁参考极换算得到的期望古地磁方向完全一致^[51]。然而,尽管近年来发表的特提斯喜马拉雅的早白垩世古地磁数据^[52~54]指示,该地块的白垩纪观测古纬度与由印度克拉通的视极移曲线^[55]换算得到的期望古

纬度在95%置信区间内是一致的,但这些早白垩世古地磁结果均指示特提斯喜马拉雅与印度克拉通二者之间存在显著的相对旋转。其中,卧龙组火山碎屑砂岩(138~130 Ma)的磁偏角指示特提斯喜马拉雅地块相对于印度克拉通发生了~70°的相对逆时针旋转,而拉康组火山岩(133~131 Ma)的磁偏角则指示特提斯喜马拉雅地块相对于印度克拉通发生了~50°的顺时针旋转。考虑到碰撞后特提斯喜马拉雅地块遭受了强烈的构造作用,且重磁化作用严重^[56~58],我们推测上述磁偏角的差异很可能代表了特提斯喜马拉雅地块内部的局部构造旋转作用,因而不能用来检验白垩纪期间印度板块与特提斯喜马拉雅地块之间是否具有刚性/准刚性板块的特征。因此,亟待获得更为可靠的早白垩世古地磁数据以验证印欧碰撞之前是否存在一个刚性或准刚性的大印度板块。

本文针对特提斯喜马拉雅东部浪卡子县工布学乡地区下白垩统桑秀组开展了系统的古地磁学和年代学研究,旨在获得可靠的特提斯喜马拉雅的早白垩世古地磁数据;在约束特提斯喜马拉雅地块古地理位置的同时,进一步探讨白垩纪以来特提斯喜马拉雅地块和印度克拉通之间的相对运动关系,验证印欧碰撞前是否存在一个刚性或准刚性的大印度板块;从而对印度与欧亚大陆的碰撞模式提供新的约束。

1 地质背景与古地磁采样

位于现今印度河-雅鲁藏布江缝合带(IYSZ)以南的喜马拉雅造山带通常被认为是印度大陆北缘的地体,在印度与欧亚大陆汇聚和碰撞过程中发育了复杂的褶皱和断层系统^[50],从北往南又可以进一步划分为特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅和次喜马拉雅,各自分别以藏南拆离系(STDS)、主中央断层(MCT)、主边界断层(MBT)和主前锋断层(MFT)与北侧地体相连接(图1(a))。前人研究表明,位于青藏高原南部高喜马拉雅和北部拉萨地体之间的特提斯喜马拉雅构造带,虽经历了多期次不同方位的挤压与伸展构造作用的叠加与改造,但沉积总厚度逾万米,发育石炭系至二叠系冈瓦纳相地层及中生界被动陆缘型沉积序列^[59,60],且广泛出露古生代-中生代火山岩^[61~63]。由于其紧邻雅鲁藏布江缝合带南侧,一直以来被认为可能代表了大印度板块最北缘的地壳。本文研究区域位于特提斯喜马拉雅东部浪卡子县羊卓雍措南部的工布学乡,区内出露大量晚侏罗世-早白垩世以中基性岩石为主的火

图 1 喜马拉雅造山带构造划分方案及研究区域地质图。(a) 印度与欧亚大陆碰撞带构造简图(修改自文献[36]), 显示了喜马拉雅构造带和拉萨地块主要的构造单元。IYSZ, 印度-雅鲁藏布江缝合带; GDS, 冈底斯岛弧; FAB, 弧前盆地; MBT, 主边界断层; MCT, 主中央断层; STDS, 藏南拆离系; BNSZ, 班公-怒江缝合带。(b) 浪卡子县工布学乡地区桑秀组采样区域地质简图, 显示了中-新生代地层及古地磁采样位置

Figure 1 Schematic tectonic division of Himalayan Orogenic Belt and geological map of research area. (a) Regional geologic map of the India-Asia collision zone modified after Yi et al. [36] showing main tectonic units of Himalayas and the Lhasa Terrane. Abbreviations: IYSZ, Indus-Yarlung Zangbo suture zone; GDS, Gangdise arc; FAB, forearc basin; MBT, Main Boundary thrust; MCT, Main Central thrust; STDS, South Tibetan detachment system; BNSZ, Bangong-Nujiang suture zone. (b) Simplified geological map of the sampling area showing Meso-Cenozoic stratigraphy and paleomagnetic sampling locations

山岩和脉状辉绿玢岩^[64]。区内下白垩统桑秀组通常与下伏上侏罗统维美组相伴；并与上覆下白垩统甲不拉组呈整合接触，且常常构成近东西向褶皱构造的两翼。桑秀组的沉积岩段由泥质粉砂岩、石英砂岩、石英杂砂岩及页岩等组成；而火山岩层发育玄武岩和安山岩；玄武岩以枕状、块状和杏仁状构造产出。

本文的采样剖面(28.7463°N, 91.1122°E)为一套沉积岩-火山岩序列(图1(b))：剖面底部为安山岩，向上为玄武岩熔岩流；顶部为中厚层长石石英砂岩；整个剖面为一近东西向背斜褶皱。如图2(b)所示，25个古地磁采点分布于褶皱两翼，其中19个采点来自剖面南西翼的玄武岩熔岩流；由于剖面北东翼岩石出露面积较小且

图2 浪卡子县工布学乡地区桑秀组火山岩-沉积岩序列。剖面野外露头(a)和实测剖面图(b)，显示了主要地层单元及古地磁学和年代学采样点的分布

Figure 2 Representative photos (a) and composite cross section (b) of the Sangxiu Formation volcanic-sedimentary sequence exposed in the south of Gongbuxue Village of Langkazi Country showing major petrologic units and distribution of sampling sites

风化程度较高,故仅采集到了6个采点的新鲜样品,包括4个安山岩采点和2个玄武岩采点。为了尽量满足每个采点的样品均来自于不同喷发期次的熔岩流,野外主要依据岩石表面气孔的指示沿着熔岩倾向方向至少跨越3 m以上地层厚度进行采样。采样剖面南西翼玄武岩产状可由剖面顶部的砂岩层精准测定;而北东翼安山岩的产状则由野外可清晰观测到的代表岩浆原生流动方向的线理和面理的平均方向所确定(图2(a))。所有古地磁样品均用便携式古地磁采样钻机钻取,用磁罗盘和太阳罗盘共同定向。室内统计结果显示两种罗盘定向结果间的差异在1°范围以内,表明采样剖面磁罗盘定向结果受火山岩的影响甚微。与此同时,为了能够精确限定采样剖面的岩石形成时代,在剖面底部安山岩、中部玄武岩和顶部砂岩中分别采集了3块新鲜的块状年龄样品SX-I、SX-III和SX-II(图2(b))。

2 实验方法与流程

实验室内首先将野外采集的古地磁岩芯样品加工成直径为2.5~2.2 cm的标准古地磁样品,切割剩下的新鲜碎样用于岩石磁学和岩石学实验。首先,为了分析岩石样品中载磁矿物的种类及其携带稳定原生剩磁的能力,在不同采点之中选取若干切割样品时剩下的新鲜碎样进行了岩石磁学和岩石学实验。其中,等温剩磁(IRM)获得曲线及反向场退磁曲线和磁滞回线的测量是在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室运用Micromag VSM 3900仪器完成的;磁化率随温度变化曲线(k - T)则在北京大学构造磁学实验室运用仪器AGICO MFK1-FA和CS4完成测量。Micromag VSM 3900仪器的灵敏度为0.5 μemu ,最大外加场为2.5 T;AGICO MFK1-FA的工作频率为876 Hz,实验过程在氦气环流中进行,升温速率为12.7 °C/min,温度测定精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$,最高加热温度为700 °C。此外,为了确定样品中主要铁磁性矿物的元素组成,在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行了背散射和能谱分析。

所有样品的古地磁退磁实验均在北京大学构造磁学实验室完成,磁屏蔽室内平均磁场强度低于150 nT,所使用的仪器为2G-755低温超导磁力仪和TD-48SC单腔热退磁炉。样品的退磁采用逐步热退磁、逐步交变退磁和热-交变混合退磁的方法。逐步热退磁实验在500 °C以内的温度间隔设置为50 °C,超过500 °C后缩小至10 °C甚至5 °C,最终逐步加热至560~580 °C;交变退

磁实验在30 mT之前的磁场间隔为5 mT,之后将间隔调整为10 mT直至90~110 mT。此外,为了剔除磁黄铁矿、褐铁矿和针铁矿等对交变退磁结果的影响,部分样品先进行了峰值温度为200或250 °C的低温热退磁处理,然后再以10 mT的间隔进行逐步交变退磁。所有样品均进行了15~20步退磁处理。剩磁组分的分离采用主成分分析法^[65,66],统计平均采用球面单位矢量的Fisher平均^[67]。

另一方面,对样品编号为SX-I、SX-II和SX-III的3块新鲜的沉积岩和火山岩年龄样品在北京领航科技有限公司进行了U-Pb年代学测试分析。首先将样品粉碎分选后,选取颗粒较大的锆石进行制靶和打磨抛光;然后在显微镜下选取颗粒完整、表面洁净、透明度较高的锆石颗粒,在激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)中进行U-Pb年代学测试,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值对年轻的岩浆锆石进行统计。

3 实验结果

3.1 岩石磁学研究

典型样品的IRM获得曲线显示出在低于250 mT时的快速增长趋势,并在~300 mT时达到饱和或准饱和状态;对应的反向场退磁显示其剩磁矫顽力在30~50 mT之间(图3),指示样品的主要载磁矿物以低矫顽力铁磁性矿物为主导。绝大多数样品的磁滞回线在~300 mT前已完全闭合,且回线形态细瘦,矫顽力低于20 mT;且磁滞回线参数显示磁性颗粒主要为单畴SD或假单畴PSD颗粒(图4(a), (c), (e))。个别采自于褶皱北东翼的安山岩样品的磁滞回线在高场作用下仍不能闭合,结合该类样品明显偏低的天然剩磁强度及难以获得稳定可靠退磁结果的特点,推测其可能受到了风化蚀变等作用的影响,故未能稳定地保存原生剩磁(图4(g))。样品的磁化率-温度曲线显示,降温过程中的冷却曲线远远高于升温过程中的加热曲线(图4(b), (d), (f), (h)),说明有较强的磁性矿物生成,推测可能与硅酸盐矿物加热到~600 °C之上转化为细颗粒的磁铁矿有关^[68]。所有样品的加热曲线均显示磁化率在530 °C之前逐渐下降,在530~580 °C之间快速下降(图4(b), (d), (f), (h))。结合背散射电子探头下的能谱分析指示样品铁磁性矿物中含有一定量的Ti元素(补充材料),我们综合认为本次研究所采浪卡子县工布学乡地区桑秀组火山岩样品的主要载磁矿物为单畴(SD)或准单畴(PSD)的磁铁矿或贫钛磁

图3 桑秀组火山岩典型样品的等温剩磁(IRM)获得曲线(红色)及其反向场退磁曲线(蓝色)

Figure 3 Acquisition curves of isothermal remnant magnetization (IRM) (red lines) and back-field demagnetization curves (blue lines) of representative samples

铁矿, 具有携带稳定原生剩磁的能力.

3.2 古地磁退磁结果与分析

大约50%的样品使用逐步热退磁方法, ~40%的样品进行了热-交变混合退磁, 余下~10%的样品选用逐步交变退磁. 在总计205块样品的系统退磁实验中, 185块样品在高温或高场强阶段能够分离出一个稳定趋向于退磁原点的特征剩磁分量. 依据退磁曲线的形态、质量和采样位置, 可将样品的退磁结果分为三类: 第一类样品采自于褶皱南西翼的玄武岩熔岩流, 其退磁曲线为双分量, 应用上述3种退磁方法均得到了方向一致的特征剩磁分量(图5(f), (g)). 该类样品显示出了一个~200°C以下的低温组分或者~30 mT以下的低剩磁矫顽力组分. 由于地理坐标下这些低温(低剩磁矫顽力)剩磁分量十分接近于现今地磁场的方向(见补充材料), 故解释其为近代地磁场中获得的黏滞剩磁. 低温(低剩磁矫顽力)组分被分离之后, 在约400~560°C之间或者40~110 mT之间, 可以分离获得一个稳定地呈直线趋向于退磁原点的高温或高场的特征剩磁分量(图5(a)~(g)). 结合样品的岩石磁学特征, 可知该特征剩磁的磁性载体为磁铁矿和贫钛磁铁矿. 第二类为采自于褶皱北东翼的安山岩样品, 其退磁曲线显示单分量特征. 由于该翼的安山岩出露面积较小且表面存在一定的风化作用, 使得该翼某些样品的天然剩磁强度较弱, 故主要采用逐步交变退磁. 特征剩磁方向以单分量形式呈直线向原点收敛, 并在80~90 mT之间强度衰减至天然剩磁的10%以下(图5(h)~(l)), 故其主要的载磁矿物亦应为磁铁矿和钛磁铁矿. 第三类样品为北东翼整合覆盖在安山

岩之上的两个玄武岩采点SX24和SX25, 推测可能由于风化作用的影响, 样品在高温阶段显示出了较为散乱的退磁曲线特征, 无法分离出稳定可靠的特征剩磁分量(图5(m)).

为此, 从23个采点中分离获得了稳定的高温或高场特征剩磁分量(表1), 其中19个采点来自于剖面褶皱的南西翼, 岩性为玄武岩; 另外4个安山岩采点采自于褶皱北东翼. 应用Fisher统计平均求得23古地磁采点的平均方向为: 地理坐标系 $D_g=282.2^\circ$, $I_g=-47.4^\circ$, $\alpha_{95}=11.0^\circ$; 经地层产状校正后为: $D_s=303.3^\circ$, $I_s=-60.5^\circ$, $\alpha_{95}=4.4^\circ$ (图6(a), (b)). 该特征剩磁分量为单一极性, 其采点平均方向的集中程度在地层倾斜校正后有显著提高($k_s/k_g=5.65$), 并在95%和99%置信水平上均通过了McElhinny褶皱检验^[72](95%和99%置信水平下的检验临界值 $F_{44,44}$ 分别为2.01和2.72), 表明该特征剩磁组分是褶皱发生之前获得的. 我们注意到研究区域可识别出两期褶皱变形作用, 其中F1褶皱是具有广泛意义上的区域性近东西向线状褶皱构造, 卷入褶皱的最年轻地质体为下早白垩统; F2褶皱是与大规模逆冲-逆掩推覆构造伴生的挤压褶皱, 卷入的最年轻地质体为上白垩统, 且F2褶皱对F1褶皱有明显的叠加和改造^[64]. 如前所述, 采样剖面为近东西向线状褶皱构造, 采样地层桑秀组与下伏上侏罗统维美组 and 上覆下白垩统甲不拉组均呈整合接触, 且构成了褶皱构造的两翼. 因此, 我们倾向于将采样剖面的褶皱作用归属于早白垩世末的F1区域性褶皱作用. 该解释与Ma等人^[54]对研究区内桑秀组最早褶皱作用发生时间的推断一致. 为此, 上述褶皱检验结果指示特征剩磁为早白垩世末之前获得的,

图 4 桑秀组火山岩典型样品的磁滞回线((a), (c), (e), (g))及磁化率-温度(k - T)曲线((b), (d), (f), (h)). 其中 H_{cr} 和 H_c 分别为剩磁矫顽力和矫顽力; M_{rs} 和 M_s 分别为饱和剩磁强度和饱和磁化强度

Figure 4 Representative hysteresis loops ((a), (c), (e), (g)) and temperature-dependent magnetic susceptibility (k - T) curves ((b), (d), (f), (h)) of the Sangxiu Formation volcanic samples, in which H_{cr} , H_c , M_{rs} , and M_s indicate the remanent coercivity, coercivity, saturation remanent magnetization, and saturation magnetization, respectively

图5 桑秀组火山岩典型样品的退磁曲线结果. (a)~(m)为地理坐标系下正交矢量投影. T和M分别代表热退磁温度和交变退磁磁场峰值; 实心点和空心点分别代表剩磁方向在水平面和垂直面上的投影

Figure 5 Thermal/alternating field orthogonal (Zijderveld) vector plots ((a)–(m)) for representative Sangxiu Formation volcanic specimens in geographic coordinates. The solid and open symbols represent the projections onto the horizontal and vertical planes, respectively

很可能代表了桑秀组火山岩形成时获得的原生剩磁. 对23个采点特征剩磁平均方向所对应的虚地磁极进行 Fisher统计平均, 获得其古地磁极位置为 1.6°N , 309.5°E ($A_{95}=5.4^{\circ}$), 对应古纬度为 $41.5^{\circ}\pm 5.4^{\circ}\text{S}$.

然而, 对于连续喷发形成的熔岩流, 即使厚度达到几十米甚至上百米, 也可能由于喷发速度的不同而仅仅代表了一个相当短的时间间隔, 导致其古地磁结果无法平均掉地磁场长期变化^[69]. 如图2(b)所示, 本次研

表 1 特提斯喜马拉雅地块浪卡子县工布学乡桑秀组火山岩采点平均特征剩磁方向等一览表^{a)}

Table 1 Summary of sampling information and characteristic remanent magnetizations (ChRMs) from the Lower Cretaceous Sangxiu Formation volcanics in the south of the Gongbuxue Village of Langkazi Country, Tethyan Himalaya Terrane^{a)}

采点/DG	岩性	$\lambda_s(^{\circ}\text{N})$	$\varphi_s(^{\circ}\text{E})$	走向($^{\circ}$)	倾向($^{\circ}$)	n/n_0	R/N	$D_s(^{\circ})$	$I_s(^{\circ})$	$D_s(^{\circ})$	$I_s(^{\circ})$	κ	$\alpha_{95}(^{\circ})$	$\varphi_p(^{\circ}\text{E})$	$\lambda_p(^{\circ}\text{N})$	δ	δ_0
sx19 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	7/7	7/0	265.2	-49.1	299.2	-64.4	38.1	9.9	308.3	-2.9		
sx18 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	267.6	-52.6	307.6	-65.9	122.7	4.7	303.0	-0.1	3.8	11.0
sx17 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	263.4	-49.8	298.1	-65.7	192.2	3.7	307.5	-4.6	3.9	6.0
sx16 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	8/8	8/0	265.5	-48.2	298.4	-63.6	579.9	2.3	309.5	-2.7	2.1	4.4
sx15 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	7/7	7/0	266.6	-45.2	295.7	-60.7	189.4	4.4	313.4	-2.1	3.2	5.0
sx14 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	10/10	10/0	270.0	-47.4	302.3	-61.0	336.5	2.6	310.0	1.5	3.2	5.1
sx13 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	264.9	-43.4	291.6	-60.0	39.2	8.3	315.9	-4.1	5.4	8.7
sx12 ^{*1}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	10/10	10/0	258.4	-42.8	282.6	-61.9	117.7	4.5	317.6	-10.9	4.8	9.4
DG1 (sx19~sx12)						69/69	69/0	264.8	-47.2	296.0	-63.1	78.4	1.9	311.0	-3.6		
sx11	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	262.8	-49.1	296.4	-65.4	998.6	1.6	308.5	-5.2	7.0	4.8
sx10 ^{*2}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	7/7	7/0	267.8	-45.3	297.2	-60.3	180.0	4.5	313.1	-0.9	5.1	4.8
sx9 ^{*2}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	11/11	11/0	264.5	-44.9	292.8	-61.4	102.4	4.5	314.1	-4.3	2.4	6.4
sx8 ^{*2}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	10/10	10/0	265.7	-44.4	293.7	-60.5	802.8	1.7	314.5	-3.1	1.0	4.8
DG2 (sx10~sx8)						28/28	28/0	265.5	-45.3	294.5	-61.3	126.7	2.3	313.4	-3.2		
sx7 ^{*3}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	8/8	8/0	271.4	-39.0	294.8	-53.5	82.4	6.1	319.9	2.0	7.0	6.3
sx6 ^{*3}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	267.0	-44.1	294.9	-59.7	454.1	2.4	314.7	-1.8	6.2	6.6
DG3 (sx7~sx6)						17/17	17/0	269.1	-41.7	294.8	-56.8	126.3	3.2	317.3	0.0		
sx5 ^{*4}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	8/8	8/0	261.9	-47.3	292.8	-64.4	1080.6	1.7	311.0	-6.4	4.8	2.9
sx4 ^{*4}	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	10/10	10/0	258.2	-46.8	287.3	-65.4	155.3	3.9	312.1	-10.3	2.5	4.3
DG4 (sx5~sx4)						18/18	18/0	259.9	-47.1	289.8	-65.0	247.0	2.2	311.6	-8.5		
sx3	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	4/7	4/0	288.0	-37.8	310.7	-45.5	107.4	8.9	316.1	16.9	23.6	9.7
sx2	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	11/11	11/0	269.2	-49.6	304.4	-63.0	63.7	5.8	307.2	1.0	17.9	10.6
sx1	玄武岩	28.7463	91.1122	136	26	9/9	9/0	282.7	-37.5	305.3	-47.5	39.2	8.3	318.3	12.4	15.5	10.1
sx23 ^{*5}	安山岩	28.7463	91.1122	294	42	4/6	4/0	357.0	-34.2	318.6	-65.6	97.3	9.4	297.6	4.9	19.4	12.5
sx22 ^{*5}	安山岩	28.7463	91.1122	294	42	5/5	5/0	7.6	-31.8	340.6	-69.6	183.8	5.7	282.6	6.2	9.2	11.0
DG5 (sx23~sx22)						9/11	9/0	3.0	-33.0	329.9	-68.2	98.3	5.2	289.5	5.7		
sx21	安山岩	28.7463	91.1122	294	42	4/7	4/0	4.5	-19.5	348.3	-57.4	122.0	8.4	281.1	22.3	12.7	10.2
sx20	安山岩	28.7463	91.1122	294	42	7/7	7/0	330.2	-6.3	318.4	-28.3	80.7	6.8	319.2	30.5	35.8	10.8
采点平均方向 ^{*1}						23/23	0/23	282.2	-47.4			8.6	11.0				
(23个采点)										303.3	-60.5	48.5	4.4				
重组后采点平均方向 ^{*2}						11/23	0/11	294.4	-44.9			5.9	20.6				
(6个采点与5个DGs)								308.7	-57.6			29.5	8.5				

a) φ_s/λ_s 为采样点的经度/纬度; φ_p/λ_p 为古地磁极的经度/纬度; n/n_0 为统计的样品数/测试的样品数; D_s/I_s 为地理坐标系下的磁偏角/磁倾角; κ/α_{95} 为Fisher统计的精度参数和95%置信度; δ 为相邻熔岩流采点平均方向间的角偏差, δ_0 为临界值, 由相邻熔岩流采点平均方向的 α_{95} 平方和的平方根确定^[69-71]。若 $\delta > \delta_0$, 则该采点可作为单独的采点代表当时地磁场的某一个时段的方向; 若 $\delta < \delta_0$, 则该采点记录的地磁场方向在统计意义上与上一个采点相同, 应合并组成一个新的方向组DG(directional group), 在表格中用加粗字体标识

图6 桑秀组火山岩的特征剩磁方向赤平投影图。(a), (c) 分别显示了相邻熔岩流去重校正前后在地理坐标系下采样平均方向; (b), (d) 分别显示了相邻熔岩流去重校正前后在地质坐标系下采样平均方向; 其中空心点为上半球面投影, 五角星代表采样平均方向

Figure 6 Equal-area projections of site-mean directions from the Sangxiu Formation before (a), (c) and after (b), (d) tilt correction; projections (c) and (d) showing the mean directions of 5 directional groups and 6 individual sites following the flow-by-flow analysis. The open circles represent upward inclinations; the stars indicate the overall-mean directions

究的剖面为厚度约65 m的连续熔岩流, 虽然在野外采样过程中尽可能保证每个古地磁采样点之间至少相隔约3 m的地层厚度以免在同一熔岩流内重复采样; 但是为了确保每个采样点记录了不同时间点的古地磁场方向, 利用Chenet等人^[69]提出的相邻熔岩流古地磁方向的去重方法对上述23个采样点平均方向进行了检验, 获得5个

古地磁方向组(DG1~DG5)和6个独立的古地磁采样点(表1), 重新统计平均后得到地层产状校正前后的平均方向分别为 $D_g^*=294.4^\circ$, $I_g^*=-44.9^\circ$ ($\alpha_{95}=20.6^\circ$)和 $D_s^*=308.7^\circ$, $I_s^*=-57.6^\circ$ ($\alpha_{95}=8.5^\circ$)(图6(c), (d)). 同样, 重组后的采样点平均方向也在95%和99%置信水平上通过了McElhinny褶皱检验^[72] ($k_s/k_g=5.0$, 95%和99%置信水

平下的检验临界值 $F_{20,20}$ 分别为2.82和4.46)。11个重组采点平均方向对应的古地磁极位置为 6.3°N , 308.6°E ($A_{95}=9.1^{\circ}$), 对应古纬度为 $39.7^{\circ}\pm 9.1^{\circ}\text{S}$ 。

诚然, 一个可信赖的火山岩古地磁结果不仅取决于高质量的野外作业和古地磁稳定性检验, 还必须要平均掉地球磁场的长期变化。基于以下4个证据: (1) 采样剖面有~65 m的厚度, 且跨越了不同岩性; (2) 应用相邻熔岩流的去重检验前后, 二者的古地磁极位置在95%置信范围内是一致的, 指示了古地磁研究结果有效地记录了当时地磁场的信息; (3) 去重检验后的11个重组采点的虚地磁极的角离散度为 14.9° , 与古纬度为 $\sim 40^{\circ}\text{S}$ 处的过去5 Ma以来的古地磁场长期变化模式^[73]相符合; (4) 通过了Deenen等人^[74]提出的地磁场长期变化检验模型(补充材料)。所有185样品的VGP平均的 A_{95} 为 2.0° , 位于置信区间 $[1.48, 3.06]$ 之内。因此, 我们认为本次研究获得的桑秀组火山岩的古地磁结果平均掉了地磁场的长期变, 是一个可信赖的早白垩世特提斯喜马拉雅的古地磁结果。

3.3 U-Pb锆石年代学研究

由于玄武岩样品(样品编号SX-Ⅲ)中获得的锆石颗粒较少, 且U-Pb锆石同位素年龄差别显著, 未能获得有效的年代学结果。

安山岩样品(样品编号SX-I)采自桑秀组剖面底部, 其锆石在显微镜下主体为透明-半透明短柱状晶体, 颗粒大小为 $50\sim 200\ \mu\text{m}$, 长宽比介于 $1:1\sim 3:1$ 。CL图像显示绝大多数锆石发育典型的岩浆振荡环带(图7(c)), 结合其较高的Th/U($0.11\sim 1.74$)比值, 指示其具有典型的岩浆锆石特征^[75,76]。本文选取50颗没有裂隙和包裹体的锆石进行U-Pb定年, 获得U-Pb年龄变化范围从 $126\sim 1833\ \text{Ma}$ 。其中, 21个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $127\sim 144\ \text{Ma}$ 之间, 其加权平均年龄为 $133.7\pm 1.6\ \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.5$), 该年龄代表了安山岩的形成年龄(图7(a), (b))。这一最新年龄数据与Zhu等人^[63]所报道的 $133\pm 3\ \text{Ma}$ 桑秀组火山岩形成年龄相一致。

砂岩样品(样品编号SX-II)采自桑秀组剖面的顶部, 对样品中的99粒碎屑锆石进行了测试分析, 获得93个有效的锆石年龄数据。显微镜下显示, 这些锆石的形态主体为自形-半自形的短柱状, 颗粒大小介于 $60\sim 200\ \mu\text{m}$, 长宽比介于 $1:1\sim 3:1$ 。CL图像研究结果显示这些锆石多数发育岩浆振荡环带, 主体显示为岩浆成因锆石(图7(f))。根据样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图和年龄

频谱图(图7(c), (d))可以得出, 砂岩的碎屑锆石年龄分布范围介于 $134\sim 3410\ \text{Ma}$ 之间, 其中最年轻的锆石年龄峰值为 $136\pm 2\ \text{Ma}$ 。该年龄界定了桑秀组剖面顶部沉积岩形成时代的下限。由于采样剖面砂岩地层覆盖在安山岩-玄武岩层之上(图2(b)), 所以其形成时代应晚于安山岩的喷发年龄, 即桑秀组沉积地层形成于 $\sim 134\ \text{Ma}$ 之后。此外, 整合覆盖于桑秀组顶部砂岩之上的甲不拉组底部层位中的腕足类*Peregrinella*化石分子仅出现于Valanginian期^[77], 指示桑秀组顶部砂岩很可能形成于 $132.9\ \text{Ma}$ 之前。综上所述, 我们认为在采样剖面上所采集的桑秀组火山岩的形成年龄应为约 $134\sim 133\ \text{Ma}$ 。

4 讨论

4.1 特提斯喜马拉雅早白垩世古纬度的指示意义

基于上述对浪卡子县工布学乡地区桑秀组火山岩的岩石磁学、古地磁学和年代学的研究结果, 获得了年龄为 $\sim 134\ \text{Ma}$ 的早白垩世特提斯喜马拉雅地块的可靠古地磁极为 6.3°N , 308.6°E ($A_{95}=9.1^{\circ}$)。该古地磁结果指示 $\sim 134\ \text{Ma}$ 研究区域(28.7°N , 91.1°E)的古纬度为 $39.7^{\circ}\pm 9.1^{\circ}\text{S}$, 这与由印度板块同时期古地磁参考极^[55,78]换算得到的期望古纬度($51.5^{\circ}\pm 3.4^{\circ}\text{S}$)在95%置信区间范围内无显著差别, 说明早白垩世时期特提斯喜马拉雅和印度克拉通有可能是相连的。中侏罗世末期(距今约 $166\ \text{Ma}$)印度板块开始从东冈瓦纳大陆裂解, 之后在逐步北向漂移过程中发生了近 90° 块体水平逆时针旋转^[79,80]。根据 $130\ \text{Ma}$ 冈瓦纳大陆的重建和白垩纪印度板块的运动轨迹显示, 不论特提斯喜马拉雅在印欧碰撞前是作为现今印度克拉通连续北缘, 即大印度板块(Greater India)的一部分, 还是作为一个独立的微陆块, 印度板块在早白垩世期间始终大致呈近东西向展布, 现今的印度板块北缘与古赤道面近似垂直(图8(a)); 直至新生代与亚洲大陆南缘发生初始碰撞前的约 $70\ \text{Ma}$, 印度板块才大致呈与现今方位相似的近南北向展布, 从而实现近南北向的初始碰撞(图8(b)), 为利用雅鲁藏布江碰撞缝合带两侧块体同时代古纬度的直接对比限定印欧碰撞的初始时限提供了可能^[10]。来自于特提斯喜马拉雅地块岗巴地区的晚白垩世宗山组^[35]和古新世宗浦组^[36]的古地磁结果指示, 在 $70\sim 60\ \text{Ma}$ 期间, 已呈近南北向展布的印度克拉通北缘存在约 $1500\sim 2000\ \text{km}$ 的北向延伸, 故二者相互验证且有效地限制了初始碰撞前大印度板块的北向延展范围。为此, 可将特

图7 桑秀组样品SX-I和SX-II的U-Pb锆石年代和谐图(a), (b), (d), (e)及典型锆石阴极发光图像(c), (f)
Figure 7 Concordia plots (a), (b), (d), (e) and CL images (c), (f) of zircons in Samples SX-I and SX-II from the Sangxiu Formation

提斯喜马拉雅晚白垩世-古新世指示的北向延伸通过印度克拉通的块体旋转恢复到早白垩世印度克拉通的东缘(图8(a), (b)), 那么代表现今印度克拉通连续北缘的研究区域的古纬度在早白垩时期实际上反映的是大

印度板块东缘的古地理位置. 由于古地磁数据在板块古经度确定上的缺陷, 早白垩世提斯喜马拉雅的观测古纬度^[52~54,79]与同时期印度克拉通的期望古纬度值在95%置信区间内的一致性, 仅能说明早白垩时期特

提斯喜马拉雅地块与印度板块位于同一纬度带上^[44]；即便两者相连在一起，也不能对大印度板块东缘(早白垩世的地理坐标系)的延伸范围进行制约。相反，由于印度板块白垩纪期间的近90°的逆时针块体旋转，导致晚白垩世-古新世期间印度板块近南北向展布(图8)，如果印欧碰撞前存在刚性或准刚性的，以特提斯喜马拉雅作为印度克拉通北向延伸的大印度板块，则根据晚白垩世-古新世特提斯喜马拉雅的古地磁结果推算得到的印度克拉通北缘的约1500~2000 km的北向延伸，极可能指示了大印度板块的北向延展大小^[35,36]。

4.2 印欧初始碰撞前是否存在一个刚性或准刚性的 大印度板块？

假设在印度与欧亚大陆初始碰撞之前，存在一个由印度克拉通和特提斯喜马拉雅组成的刚性或准刚性的的大印度板块；那么，特提斯喜马拉雅作为印度克拉通的连续北缘，两者之间应不存在显著的相对运动。也就是说，作为一个统一的运动学整体，不仅要求特提斯喜马拉雅地块与印度克拉通一起向北运动(具有一致的

古纬度)，而且还需满足二者在任一时刻均具有相似的旋转状态，即一致的古磁偏角^[51]。如前所述，前人所发表的早白垩世特提斯喜马拉雅的古地磁结果^[52,53]换算到同一参考点的观测磁偏角对比于同时期印度克拉通^[55,78]的期望磁偏角存在显著差异，这显然不符合一个刚性板块的运动性质。考虑到特提斯喜马拉雅地区构造复杂、岩石变形变质严重和重磁化作用等因素的影响，避免以偏概全，我们将前人在特提斯喜马拉雅地块发表的高质量的早白垩世至古新世古地磁结果($Q \geq 5$)以及本次研究结果放在一起综合讨论(表2)。为了便于讨论，我们选择雅鲁藏布江缝合带南侧采样区域位置(28.7°N, 91.1°E)作为参考点，根据表2所列特提斯喜马拉雅地块的古地磁极位置和印度板块的视极移曲线^[78]，计算出早白垩世以来不同时期特提斯喜马拉雅和印度克拉通的古磁偏角和古磁倾角，并进行对比(图9)。首先，图9(a)显示前人从特提斯喜马拉雅地块上获得时代均为~130 Ma的卧龙组(编号(3))和拉康组(编号(4))的观测磁偏角相对于印度克拉通的期望磁偏角存在显著的差异：拉康组的数据^[52]表明了，在~130 Ma特

图8 约130 Ma大印度板块及其周边主要块体的古地理位置重建(a)和大印度板块130~70 Ma期间的运动轨迹(b)。图中各板块的古地磁数据来源于视极移曲线^[76]；大印度岩石圈的形状改编自文献^[37]；印度岩石圈的大小依据文献^[35,36]的古地磁结果

Figure 8 Paleogeographic reconstructions of the Greater Indian Plate and its surroundings at ~130 Ma (a) and the motion pattern of the Greater Indian Plate during the period of 130 to 70 Ma (b) according to their APW paths of Besse and Courtillot^[76], the shape of the Greater Indian Plate is modified from Aitchison et al.^[37] The size of Greater India is calculated from these two paleomagnetic result^[35,36]

表2 早白垩世至古新世特提斯喜马拉雅地块的古地磁极^{a)}Table 2 Summary of Early Cretaceous to Paleocene crucial paleomagnetic poles from the Tethyan Himalaya Terrane^{a)}

编号	时代 (Ma)	采样单元	岩性	地块	$\lambda_p(^{\circ}\text{N})$	$\phi_p(^{\circ}\text{E})$	$A_{95}(^{\circ})dp/dm(^{\circ})$	Q	检验	文献
(1)	138~135	遮拉组和维美组	火山岩	喜马拉雅	0.9	293.4	7.0	7	F, R	[81]
(2)	约134	桑秀组	火山岩	喜马拉雅	6.3	308.6	9.1	6	F	本研究
(3)	138~130	卧龙组	沉积岩	喜马拉雅	4.4	255.9	4.6/5.2	5	无检验	[53]
(4)	133~131	拉康组	火山岩	喜马拉雅	-26.8	315.2	5.7	7	F, R	[52]
(5)	135~124	桑秀组	火山岩	喜马拉雅	-5.9	308.0	6.1	7	F, R	[54]
(6)	121~112	Thakkhola-Dzong组	沉积岩	喜马拉雅	12.0	288.8	6.0/7.5	5	无检验	[82]
(7)	约120.8~93.9	桑单林组	沉积岩	喜马拉雅	25.0	285.7	4.8/7.1	7	R	[83]
(8)	86~74	床得组	沉积岩	喜马拉雅	-65.7	197.6	5.6/8.2	5	R	[41]
(9)	71~65	宗山组	沉积岩	喜马拉雅	55.8	261.4	4.4	7	F, R	[35]
(10)	62~59	宗浦组	沉积岩	喜马拉雅	67.3	266.3	3.5	7	F, R	[36]
(11)	59~56	宗浦组	沉积岩	喜马拉雅	71.6	277.8	2.5	7	F, R	[36]

a) ϕ_p/λ_p 为古地磁极的经度/纬度; A_{95} 古地磁极Fisher平均结果的95%置信区间; dp/dm 为古地磁置信椭圆的半短轴/半长轴; F为褶皱检验; R为倒转检验. Q 为古地磁数据可靠性指数[0,7]^[84]. 判据依次为: (1) 采样地层的年代精确; (2) 足够数量的独立采样点和独立定向样品; (3) 合理的退磁方法; (4) 剩磁野外稳定性检验; (5) 区域内年代相近岩石单元的古地磁极应当一致; (6) 岩石中出现正负两种极性, 且能通过倒转检验; (7) 古地磁极位置不应与时代更年轻的古地磁极重合

提斯喜马拉雅相对印度克拉通存在~50°的顺时针旋转, 而卧龙组的数据^[53]却指示了~70°的逆时针旋转. 无独有偶, 张波兴等人^[47]报道的晚白垩世~80 Ma床得组古地磁结果(编号(8))也显示了相对印度克拉通同时代古地磁参考方向~170°的磁偏角差异. 如果说这些磁偏角的显著差异暗示了白垩纪期间特提斯喜马拉雅地块与印度克拉通为两个相互单独的块体, 两者之间存在显著的相对运动; 则至少要求早白垩世期间, 当时位于东冈瓦纳大陆边缘的特提斯喜马拉雅地块在~5 Ma内发生了~120°的水平旋转, 这显然缺乏必要的证据支持. 更可能的解释是, 这些古地磁数据指示的是采样剖面或地区的区域性局部旋转, 代表了其在后期印欧碰撞及挤压造山过程中发生了显著的构造变形, 因而不能用于限定特提斯喜马拉雅地块的整体运动学行为.

其次, 包括本次研究结果在内的其他4个早白垩世和一个白垩纪的特提斯喜马拉雅古地磁数据(编号分别为(1), (2), (5), (6)和(7))^[54,81-83]均显示了与印度大陆相同的旋转状态和古地理位置(图9(a), (b)); 而其余3个晚白垩-古新世的结果(编号分别为(9)~(11))^[35,36]亦显示了与印度板块相似的块体旋转运动性质(图9(a), (b)). 如图9(c), (d)所示, 在剔除掉卧龙组、拉康组和床得组这3个古地磁结果之后, 迄今在特提斯喜马拉雅地块获得的早白垩世-古新世古地磁数据显示, 早白垩世至古新世期间特提斯喜马拉雅与印度克拉通两者一起向北

运动的同时, 始终具有一致的块体旋转运动状态. 这表明自冈瓦纳大陆裂解之后直至印欧初始碰撞之前, 二者很可能具有统一的运动学特征, 即两者之间存在刚性或准刚性板块(大印度板块)的连接特征(图8(b)). 至于到晚白垩-古新世期间特提斯喜马拉雅地块上的观测古纬度与由印度板块同时期古地磁参考极换算获得的期望古纬度之间的显著古纬度差(图9(d))产生的原因, 可作如下解释: 第一, 由于印度与欧亚大陆在新生代的碰撞使得大印度板块在印欧碰撞后不再是一个刚性或准刚性的块体, 新生代印度板块的持续北向挤压和楔入使得特提斯喜马拉雅和印度克拉通原本统一的视极移曲线发生显著分离; 第二, 大印度板块在白垩纪期间经历了近90°的大幅度逆时针旋转, 导致了大印度板块内部不同参考点之间的相对纬度关系发生了显著变化. Zhang和Huang^[44]曾就上述两个问题开展过详细讨论, 并指出如果印欧碰撞前存在刚性/准刚性的大印度板块, 那么, 早白垩世期间大印度板块的近东西向展布必然导致现今呈近南北向展布的特提斯喜马拉雅地块北缘与印度克拉通北缘的古纬度几乎重合.

5 结论

通过对特提斯喜马拉雅东部浪卡子县工布学乡地区下白垩统桑秀组地层的系统古地磁学和年代学研究, 我们获得如下主要结论:

图 9 早白垩世至古新世特提斯喜马拉雅与印度克拉通磁偏角(a), (c)和磁倾角(b), (d)对比图。图中特提斯喜马拉雅数据的序号顺序与表2相同
Figure 9 Comparison of the inclinations and declinations of the Tethyan Himalaya Terrane and the Indian Plate during the Early Cretaceous to Paleocene times (reference point: 28.7°N, 91.1°E). The numbers in brackets represent sources of paleomagnetic data, see corresponding Table 2 for details

首先, 通过对采样剖面顶部砂岩和底部安山岩的 U-Pb 锆石年代学研究获得了两组谐和年龄, 分别为 (136±2) 和 (133.7±1.6) Ma, 限定了采样剖面中火山岩的喷发年龄为早白垩世的 ~134 Ma。

其次, 采样剖面的系统退磁特征、岩石磁学及岩石学特性揭示出所采桑秀组火山岩样品的主要磁性载体为可能记录熔岩流形成时期原生剩磁的磁铁矿或贫钛磁铁矿。除采样剖面北东翼两个不太新鲜的玄武岩采点未能分离出可靠特征剩磁组分外, 采自剖面北东、南西褶皱两翼的 23 个采点 (185 块玄武岩和安山岩

样品) 均分离出稳定可靠的特征剩磁方向。经相邻熔岩流的去重检验后获得地层倾斜校正后的特征剩磁平均方向为 $D^*/I^*=308.7^\circ/-57.6^\circ$ ($\alpha_{95}=8.5^\circ$, $N=11$), 对应古地磁极位置为 6.3°N, 308.6°E ($A_{95}=9.1^\circ$)。特征剩磁方向在 95% 和 99% 的置信水平上均通过了褶皱检验, 表明该特征剩磁组分是早白垩世末区域褶皱形成之前获得的, 且两种地磁场长期变模型检验指示其有效平均掉了地磁场的长期变化, 因而很可能代表了桑秀组火山岩形成时期的原生剩磁。

最后, 新获得的特提斯喜马拉雅早白垩世 (~134

Ma)古地磁极指示早白垩世特提斯喜马拉雅地块的观测古纬度和磁偏角与印度克拉通同时期古地磁参考极换算获得的期望古地磁方向完全一致,表明该时期印度板块与特提斯喜马拉雅地块具有刚性或准刚性板块

的特征,在运动学上为一个统一的整体。进一步分析表明这种刚性或准刚性板块的特征,即大印度板块的存在,很可能持续至印欧发生初始碰撞之前。因此,印度与亚洲大陆的碰撞仍为经典的陆陆碰撞。

致谢 感谢中国地质科学院葛茂卉博士对本文年代学结果提供了专业性帮助;感谢北京大学Umar Farooq Jadoon博士对英文摘要做了修饰润色;两位匿名审稿人对本文的进一步修改和提高提出了专业性的意见,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211–280
- 2 Allégre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 1984, 307: 17–22
- 3 Chang C F, Chen N S, Coward M P, et al. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet. *Nature*, 1986, 323: 501–507
- 4 Le Pichon X, Fournier M, Jolivet L. Kinematics, topography, shortening, and extrusion in the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 1992, 11: 1085–1098
- 5 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611
- 6 Johnson M R W. Shortening budgets and the role of continental subduction during the India-Asia collision. *Earth-Sci Rev*, 2002, 59: 101–123
- 7 Wu F Y, Huang B C, Ye K, et al. Collapsed Himalayan-Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2008, 24: 1–30 [吴福元, 黄宝春, 叶凯, 等. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. *岩石学报*, 2008, 24: 1–30]
- 8 Huang B C, Zhou Y X, Zhu R X. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2008, 15: 348–359 [黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程. *地学前缘*, 2008, 15: 348–359]
- 9 Ding L, Maksatbek S, Cai F L, et al. Processes of initial collision and suturing between India and Asia. *Sci China-Earth Sci*, 2017, 60: 635–651
- 10 Huang B C, Chen J S, Yi Z Y. Paleomagnetic discussion of when and where India and Asia initially collided (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53: 2045–2058 [黄宝春, 陈军山, 易治宇. 再论印度与亚洲大陆何时何地发生初始碰撞. *地球物理学报*, 2010, 53: 2045–2058]
- 11 Chen J, Huang B, Yi Z, et al. Paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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*, 2014, 96: 162–177
- 12 Chen J, Huang B, Sun L. New constraints to the onset of the India-Asia collision: Paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa Block, China. *Tectonophysics*, 2010, 489: 189–209
- 13 Meng J, Coe R S, Wang C, et al. Reduced convergence within the Tibetan Plateau by 26 Ma? *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 6624–6632
- 14 Tong Y, Yang Z, Pei J, et al. Paleomagnetism of the Upper Cretaceous red-beds from the eastern edge of the Lhasa Terrane: New constraints on the onset of the India-Eurasia collision and latitudinal crustal shortening in southern Eurasia. *Gondwana Res*, 2017, 48: 86–100
- 15 Cao Y, Sun Z, Li H, et al. New Late Cretaceous paleomagnetic data from volcanic rocks and red beds from the Lhasa terrane and its implications for the paleolatitude of the southern margin of Asia prior to the collision with India. *Gondwana Res*, 2017, 41: 337–351
- 16 Zhu X Y, Liu C, Ye S J, et al. Remanence of red beds from Linzhou Xizang and the northward movement of the Indian plate (in Chinese). *Sci Geol Sin*, 1977, 12: 44–51 [朱湘元, 刘椿, 叶素娟, 等. 西藏林周地区红层的天然剩余磁性和印度洋板块的北向移动. *地质科学*, 1977, 12: 44–51]
- 17 Zhu Z W, Zhu X Y, Zhang Y M. Palaeomagnetic observation in Xizang and continental drift (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1981, 24: 40–49 [朱志文, 朱湘元, 张一鸣. 西藏高原古地磁及大陆漂移. *地球物理学报*, 1981, 24: 40–49]
- 18 Liebke U, Appel E, Ding L, et al. 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*, 2010, 182: 1199–1215
- 19 Sun Z, Jiang W, Li H, et al. New paleomagnetic results of Paleocene volcanic rocks from the Lhasa block: Tectonic implications for the collision of India and Asia. *Tectonophysics*, 2010, 490: 257–266
- 20 Dupont-Nivet G, Lippert P C, van Hinsbergen D J J, et al. Palaeolatitude and age of the Indo-Asia collision: Palaeomagnetic constraints. *Geophys J Int*, 2010, 182: 1189–1198
- 21 Huang W, Dupont-Nivet G, Lippert P C, et al. Inclination shallowing in Eocene Linzizong sedimentary rocks from southern Tibet: Correction, possible causes and implications for reconstructing the India-Asia collision. *Geophys J Int*, 2013, 194: 1390–1411

- 22 Meng J, Wang C, Zhao X, et al. India-Asia collision was at 24°N and 50 Ma: Palaeomagnetic proof from southernmost Asia. *Sci Rep*, 2012, 2: 925
- 23 Achache J, Courtillot V, Xiu Z Y. Paleogeographic and tectonic evolution of southern Tibet since Middle Cretaceous time: New paleomagnetic data and synthesis. *J Geophys Res*, 1984, 89: 10311–10339
- 24 Yi Z, Huang B, Yang L, et al. 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*, 2015, 34: 1431–1451
- 25 Jinlu L, Watts D R. Palaeomagnetic results from the Tibetan Plateau. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1988, 327: 239–262
- 26 Tang X D, Huang B C, Yang L K, et al. Paleomagnetism and Ar–Ar geochronology of Cretaceous volcanic rocks in the middle Lhasa terrane, China and tectonic implications (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 136–149 [唐祥德, 黄宝春, 杨列坤, 等. 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*, 2013, 56: 136–149]
- 27 Tan X, Gilder S, Kodama K P, et al. 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*, 2010, 293: 396–404
- 28 Yang T, Ma Y, Zhang S, et al. New insights into the India-Asia collision process from Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results in the Lhasa terrane. *Gondwana Res*, 2015, 28: 625–641
- 29 Li Z, Ding L, Song P, et al. 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*, 2017, 41: 352–372
- 30 Chen W, Yang T, Zhang S, et al. Paleomagnetic results from the Early Cretaceous Zenong Group volcanic rocks, Cuoqin, Tibet, and their paleogeographic implications. *Gondwana Res*, 2012, 22: 461–469
- 31 Ma Y, Yang T, Yang Z, et al. 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*, 2014, 119: 7404–7424
- 32 Pozzi J P, Westphal M, Zhou X Y, et al. Position of the Lhasa block, South Tibet, during the late cretaceous. *Nature*, 1982, 297: 319–321
- 33 Ding J, Zhang S, Chen W, et al. Paleomagnetism of the Oligocene Kangtuo Formation red beds (Central Tibet): Inclination shallowing and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 2015, 104: 55–68
- 34 Sun Z M, Jiang W, Pei J L, et al. New Early Cretaceous paleomagnetic data from volcanic of the eastern Lhasa Block and its tectonic implications (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 24: 1621–1626 [孙志明, 江万, 裴军令, 等. 青藏高原拉萨地块早白垩纪火山岩古地磁结果及其构造意义. *岩石学报*, 2008, 24: 1621–1626]
- 35 Patzelt A, Li H, Wang J, et al. 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*, 1996, 259: 259–284
- 36 Yi Z Y, Huang B C, Chen J S, et al. 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*, 2011, 309: 153–165
- 37 Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. When and where did India and Asia collide? *J Geophys Res-Solid Earth*, 2007, 112: B05423
- 38 Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Tethyan subducted slabs under India. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 171: 7–20
- 39 Gansser A. The significance of the Himalayan suture zone. *Tectonophysics*, 1980, 62: 37–52
- 40 Harrison T M, Copeland P, Kidd W, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663–1670
- 41 van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, et al. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 7659–7664
- 42 Ao S J, Xiao W J, Windley B F, et al. Components and structures of the eastern Tethyan Himalayan Sequence in SW China: Not a passive margin shelf but a mélangé accretionary prism. *Geol J*, 2018, 53: 2665–2689
- 43 Xiao W J, Ao S J, Yang L, et al. Anatomy of composition and nature of plate convergence: Insights for alternative thoughts for terminal India-Eurasia collision. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 1015–1039
- 44 Zhang Y, Huang B C. The influence of Cretaceous paleolatitude variation of the Tethyan Himalaya on the India-Asia collision pattern. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 1057–1066
- 45 DeCelles P G, Gehrels G E, Najman Y, et al. Detrital geochronology and geochemistry of Cretaceous-Early Miocene strata of Nepal: Implications for timing and diachroneity of initial Himalayan orogenesis. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 227: 313–330
- 46 Ding L, Qasim M, Jadoon I A K, et al. The India-Asia collision in north Pakistan: Insight from the U–Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 455: 49–61
- 47 Zhang B X, Li Y X, Hu X M. Paleomagnetic results from Jurassic-Cretaceous strata in the Chuangde area of southern Tibet constrain the nature and timing of the India-Asia collision system (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 298–311 [张波兴, 李永祥, 胡修棉. 藏南床得剖面古地磁结果对印度-亚洲碰撞方式的约束. *科学通报*, 2017, 62: 298–311]
- 48 Hodges K V. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geol Soc Am Bull*, 2000, 112: 324–350
- 49 Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, 321: 1054–1058

- 50 Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth Sci Rev*, 2006, 76: 1–131
- 51 Gilder S A, Tan X, Bucher H, et al. Optimization of apparent polar wander paths: An example from the South China plate. *Phys Earth Planet Inter*, 2008, 169: 166–177
- 52 Yang T, Ma Y, Bian W, et al. 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*, 2015, 428: 120–133
- 53 Huang W, van Hinsbergen D J J, Dekkers M J, et al. Paleolatitudes of the Tibetan Himalaya from primary and secondary magnetizations of Jurassic to Lower Cretaceous sedimentary rocks. *Geochem Geophys Geosyst*, 2015, 16: 77–100
- 54 Ma Y, Yang T, Bian W, et al. Early Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results from the Tethyan Himalaya: Insights into the Neotethyan paleogeography and the India-Asia collision. *Sci Rep*, 2016, 6: 21605
- 55 Besse J, Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *J Geophys Res Solid Earth*, 2002, 107: EPM 6
- 56 Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, et al. Palaeomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture. *Nature*, 1984, 311: 621–626
- 57 Tong Y, Yang Z, Zheng L, et al. Early Paleocene paleomagnetic results from southern Tibet, and tectonic implications. *Int Geol Rev*, 2008, 50: 546–562
- 58 Klootwijk C T, Gee J S, Peirce J W, et al. An early India-Asia contact: Paleomagnetic constraints from Ninetyeast Ridge, ODP Leg 121. *Geology*, 1992, 20: 395–398
- 59 Liu G, Einsele G. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas. *Geol Rundsch*, 1994, 83: 32–61
- 60 Garzanti E. Stratigraphy and sedimentary history of the Nepal Tethys Himalaya passive margin. *J Asian Earth Sci*, 1999, 17: 805–827
- 61 Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. Permian to Cretaceous volcanic activities in the central segment of the Tethyan Himalayas (I): Distribution characteristics and significance (in Chinese). *Geol Bull China*, 2004, 23: 645–654 [朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 藏南特提斯喜马拉雅带中段二叠纪—白垩纪的火山活动(I): 分布特点及其意义. *地质通报*, 2004, 23: 645–654]
- 62 Hu X, Garzanti E, Moore T, et al. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59 ± 1 Ma). *Geology*, 2015, 43: 859–862
- 63 Zhu D, Pan G, Mo X, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for the dacite of the Sangxiu Formation in the central segment of Tethyan Himalaya and its implications. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 563–568
- 64 Zhong H M, Xia J, Tong J S, et al. New results and major progress in regional geological survey of the Lhozag County Sheet (in Chinese). *Geol Bull China*, 2004, 23: 451–457 [钟华明, 夏军, 童劲松, 等. 洛扎县幅地质调查新成果及主要进展. *地质通报*, 2004, 23: 451–457]
- 65 Halls H C. The use of converging remagnetization circles in palaeomagnetism. *Phys Earth Planet Inter*, 1978, 16: 1–11
- 66 Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys J Int*, 1980, 62: 699–718
- 67 Fisher R. Dispersion on a sphere. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1953, 217: 295–305
- 68 Liu Q, Deng C, Yu Y, et al. Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: Implications for pedogenesis of Chinese loess/palaeosols. *Geophys J Int*, 2005, 161: 102–112
- 69 Chenet A L, Fluteau F, Courtillot V, et al. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment. *J Geophys Res Solid Earth*, 2008, 113: B04101
- 70 Chenet A L, Courtillot V, Fluteau F, et al. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: 2. Constraints from analysis of eight new sections and synthesis for a 3500-m-thick composite section. *J Geophys Res Solid Earth*, 2009, 114: B06103
- 71 Lhuillier F, Gilder S A, Wack M, et al. More stable yet bimodal geodynamo during the Cretaceous superchron? *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 6170–6177
- 72 McElhinny M W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophys J Int*, 1964, 8: 338–340
- 73 Merrill R T, McElhinny M W. *The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective*. London: Academic Press, 1983. 401
- 74 Deenen M H L, Langeris C G, van Hinsbergen D J J, et al. Geomagnetic secular variation and the statistics of palaeomagnetic directions. *Geophys J Int*, 2011, 186: 509–520
- 75 Wu Y B, Zheng Y F. Zircon genetic mineralogy and constraints on U-Pb dating (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 1589–1604 [吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 2004, 49: 1589–1604]
- 76 Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chem Geol*, 2002, 184: 123–138
- 77 Zhong H M, Xia J, Tong J S, et al. Report of Regional Geological Survey of the People's Republic of China: 1:250000 Lhozag County Sheet (H46C004001) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2018 [钟华明, 夏军, 童劲松, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告: 洛扎]

图幅(H46C004001), 比例尺1:250000. 北京: 地质出版社, 2018]

- 78 Besse J. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Correction*. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2300
- 79 Stagg H M J, Colwel J B, Direen N G, et al. Geology of the continental margin of enderby and mac. Robertson lands, east Antarctica: Insights from a regional data set. *Mar Geophys Res*, 2004, 25: 183–219
- 80 Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia. *Geology*, 2009, 37: 583–586
- 81 Bian W, Yang T, Ma Y, et al. Paleomagnetic and geochronological results from the Zhela and Weimei Formations lava flows of the eastern Tethyan Himalaya: New insights into the breakup of eastern Gondwana. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 44–64
- 82 Klootwijk C T, Bingham D K. The extent of Greater India, iii. Palaeomagnetic data from the Tibetan Sedimentary series, Thakkhola region, Nepal Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 51: 381–405
- 83 Qin S X, Li Y X, Li X H, et al. Paleomagnetic results of Cretaceous cherts from Zhongba, southern Tibet: New constraints on the India-Asia collision. *J Asian Earth Sci*, 2019, 173: 42–53
- 84 Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 1990, 184: 1–9

Summary for “早白垩世存在刚性/准刚性大印度板块的古地磁学新证据”

New paleomagnetic positive proof of the rigid or quasi-rigid Greater Indian Plate during the Early Cretaceous

Ye Zhang, Baochun Huang* & Qian Zhao

Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: bchuang@pku.edu.cn

Identifying when, where, and how the Indian Plate or the Greater Indian Plate and the Asia continent collided is the most important three key issues for constructing a collision model, and it is also the starting basis for the further understanding of continental dynamics in the Tibetan Plateau. In the past decades, with the deepening of paleomagnetic studies on the terranes or blocks on both sides of the Indus-Yarlung Zangbo suture zone, the blank or deficiency of available paleomagnetic data from the Lhasa and Tethyan Himalaya blocks around the India-Asia collision has been largely filled. However, the timing and paleo-position of the collision between India and Asia still remains controversial on account of the discrepancy of the paleolatitudes of the Lhasa block during the Cretaceous to Eocene times. Meanwhile, tectonic relationship between the Tethyan Himalaya Terrane and the Indian Craton during the Cretaceous period is a key issue to better understanding the collision pattern between India and Asia. Whether or not the Tethyan Himalaya Terrane or the Himalayas kept a rigid or quasi-rigid connection with the Indian Craton, i.e. the Tethyan Himalaya Terrane or the Himalayas and the Indian Craton behaved as a rigid or quasi-rigid plate before the India-Asia collision, plays a key issue for the construction of the India-Asia collision model. In this study we report a combined paleomagnetic and geochronological investigation on the Lower Cretaceous Sangxiu Formation basalts and andesites from the Tethyan Himalaya located in the south of the Gongbuxue Village, Langkazi Country. In the light of the paleogeographic reconstruction of major plates and/or blocks of Gondwana at ~130 Ma, northwards-motion pattern of the Indian Plate during the Cretaceous, as well as published available post-Early Cretaceous paleomagnetic data from Tethyan Himalaya, we confidently argue that the Indian Craton and its northern Himalayas should behave as a rigid or quasi-rigid Greater Indian Plate prior to the India and Asia collision, and the archetypical India-Asia continental collision model is still a convincing scenario. Firstly, the U-Pb zircon chronological dating of the sandstone and andesite samples at the top and bottom of the sampling section yields weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of (136 ± 2) and (133.7 ± 1.6) Ma, respectively, suggesting an eruption age of ~134 Ma of the Early Cretaceous for the sampled Sangxiu Formation volcanic rocks. Secondly, rock magnetic results indicate that the high-temperature or high-field characteristic remanent magnetization (ChRM) components are carried predominately by magnetite and titanomagnetite. As a result, the ChRM directions, successively isolated from a total of 23 sampling sites in both limbs of an anticline, yield a mean direction of $D/I=303^\circ/-60.5^\circ$ ($k=48.5$, $\alpha_{95}=4.4^\circ$) after the tilt adjustment, corresponding to a paleomagnetic pole at 1.6°N , 309.5°E ($A_{95}=5.4^\circ$). Further site-by-site assessing of the serial correlation between adjacent lava flows indicates that the available site-mean observations could be reorganized into 5 directional groups (DGs) and 6 independent site-mean directions, which yield a new formation-mean ChRM direction and a corresponding paleomagnetic pole of $D^*/I^*=308.7^\circ/-57.6^\circ$ ($k=29.5$, $\alpha_{95}=8.5^\circ$) and of 6.3°N , 308.6°E ($A_{95}=9.1^\circ$), respectively. Positive fold test and paleosecular variation test results show a pre-folding origin of the ChRM and effectively averaging out the paleosecular variation. A comparison between the observed Early Cretaceous paleomagnetic results and those expected from coeval apparent polar wander path for the Indian Plate shows that the Tethyan Himalaya Terrane has compatible paleolatitude and paleo-declination with the Indian Plate during the Early Cretaceous times, indicating that the Indian Plate and its northern Himalayas should behave as a rigid or quasi-rigid Greater Indian Plate during the formation of the Sangxiu Formation volcanic rocks.

Tethyan Himalaya, Greater Indian Plate, Early Cretaceous, Paleomagnetism, India-Asia collision, rigid/quasi-rigid plate

doi: [10.1360/N972019-00196](https://doi.org/10.1360/N972019-00196)