印度与欧亚大陆碰撞时限的古地磁研究进展与问题

张大文^{1,2)},颜茂都^{2,3)}

1) 枣庄学院旅游与资源环境学院,山东枣庄,277160;

2) 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,北京,100101;

3) 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京,100101

内容提要:古地磁学在限定印度—欧亚板块碰撞时限的研究中扮演着重要的角色。然而受磁倾角浅化、地球磁场长期变以及重磁化等诸多因素影响,不同时期获得的古地磁数据质量参差不齐,造成其限定的印度—欧亚大陆碰撞时限从 65 到 20 多百万年不等。本文针对这一现状,通过对拉萨陆块和特提斯喜马拉雅己有的晚白垩世—古近纪古地磁数据开展严格的可靠性评判,共筛选出 10 条有效数据(其中拉萨陆块 9 条、特提斯喜马拉雅 1 条),获得以下认识:① 拉萨陆块晚白垩世期间基本稳定在 10°~16°N,在始新世晚期—渐新世早期位于 21.8+2.5/-2.3°N;② 特提斯喜马拉雅在晚白垩世中期位于约 34.2+4.4/-5.0°S,并与印度板块有基本一致的古纬度;③ 对于用来限定碰撞时限的晚白垩世晚期—始新世早期的古地磁结果,经评判分析,认为至少到目前为止,在明确磁倾角浅化及浅化程度、地球磁场长期变是否被平均掉和剩磁的原生性及重磁化程度等问题之前,还缺乏真正有效的古地磁数据。因此,总体来说,现有的古地磁数据在限定拉萨陆块与特提斯喜马拉雅碰撞时限的精确度方面,还有很大的提升空间,亟待针对存在争议的岩石地层单元开展更详细的磁学和非磁学相结合的综合研究进行验证,并在更多地区获得高质量的古地磁数据(尤其是晚白垩世晚期—古近纪)。此外,考虑到两个陆块呈近东西向的巨型狭长条带,其地质时期的展布方向会显著影响东、西部的古纬度,今后的相关古地磁研究应尽量分东、西部不同区域开展。

关键词:拉萨陆块;特提斯喜马拉雅;晚白垩世—古近纪;碰撞时限;古地磁;可靠性评判

印度—欧亚大陆发生碰撞及其持续作用,塑造 了地球上最显著的地貌单元—青藏高原—喜马拉雅 造山带(图 1a; Molnar and Tapponnier, 1975; Allegre et al., 1984; Dewey et al., 1988; Rowley, 1996; 莫 宣学等, 2007; 黄宝春等, 2010)。其不仅造成亚洲 内陆强烈的构造变形(Tapponnier et al., 1982; Yin An and Harrison, 2000; 张培震, 2008),而且对区域 乃至全球气候—环境都有着深远影响(Molnar and England, 1990; Raymo and Ruddiman, 1992; An Zhisheng et al., 2001)。印度—欧亚大陆初始碰撞 的时限及其古地理位置,是研究大陆碰撞过程、青藏 高原隆升变形机制和环境效应的前提条件(吴福元 等, 2008; 丁林等, 2017; 张也和黄宝春, 2017)。 然而,近几十年来不同方法(如地质学、沉积学、古 生物学等)开展的持续研究获得的初始碰撞时间从 70 Ma 到 20 多百万年不等(丁林等, 2017; 胡修棉 等, 2017; 王二七, 2017),争议很大,制约了对青藏 高原—喜马拉雅构造地质演化的深入认识。

古地磁学在限定陆块的南北纬向运动演化过程 研究中具有独特优势,尤其是可以通过缝合带两侧 陆块古纬度重合的最早时间来揭示碰撞发生的时 间。印度—欧亚板块碰撞与特提斯洋的闭合被广泛 认为发生于雅鲁藏布江缝合带(图 1b; Yin An and Harrison, 2000; Yin An, 2010)。因此,厘定拉萨陆 块与特提斯喜马拉雅的古纬度系古地磁约束大陆碰 撞时限的关键所在。近40年来,围绕印度—欧亚大 陆碰撞时限等问题在拉萨陆块和特提斯喜马拉雅开 展了诸多古地磁学研究,取得了很多认识(Klootwijk et al., 1979; Li Guangcen and Mercier, 1980; 朱志 文等, 1981; Pozzi et al., 1982; Westphal et al.,

注:本文为第二次青藏大科考基金资助项目(编号:2019QZKK0707);中国科学院战略性先导科技专项资助项目(编号:XDA20070201);枣 庄学院博士科研基金项目(编号:2018BS064);中国科学院大陆碰撞与高原隆升重点实验室开放一合作基金项目(编号:LCPU201905)的 成果。

收稿日期:2018-09-24;改回日期:2019-06-28;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.05.014

作者简介:张大文,男,1988年生,博士,主要从事磁性地层年代学研究;Email:zhangdawen@uzz.edu.cn。通讯作者:颜茂都,男,1973年 生,研究员,主要从事古地磁和构造地质学研究;Email:maoduyan@itpcas.ac.cn。



图 1 亚洲东部和南部构造简图(a; 修改自 Tapponnier et al., 1982)与青藏高原及周边地区构造简图(b)

Fig. 1 (a)Schematic tectonic map of the East and South Asia(modified from Tapponnier et al., 1982);

(b) Simplified tectonic map of the Tibetan Plateau and its surrounding areas

AKSZ—阿尼玛卿—昆仑缝合带;ASRRF—哀牢山—红河断裂;ATF—阿尔金断裂;BNSZ—班公湖—怒江缝合带;IND—印度支那陆块; IYZSZ—印度河—雅鲁藏布缝合带;MBT—主边界逆冲断裂;JSSZ—金沙江缝合带;NCB—华北陆块;SCB—华南陆块;XSH—XJF—鲜水 河—小江断裂

AKSZ—Ayimaqin—Kunlun suture zone; ASRRF—Ailao Mountains—Honghe River(Red River) fault; ATF—Altyn Tagh fault; BNSZ—Bangong Lake—Nujiang River suture zone; IND—Indochina Block; IYZSZ—Indus River—Yarlung River suture zone; MBT—Main Boundary thrust; JSSZ—Jinsha River suture zone; NCB—North China Block; SCB—South China Block; XSH—XJF—Xianshui River—Xiaojiang River fault

1983; Achache et al., 1984; 叶祥华和李家福, 1987; Lin Jinlu and Watts, 1988; Otofuji et al., 1990; Patzelt et al., 1996; Appel et al., 1998; Ali and Aichison, 2008; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Dupont-Nivet et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2010, 2012; Yi Zhiyu et al., 2011, 2015; Meng Jun et al., 2012; van Hinsbergen et al., 2012, 2018; 唐 祥德等, 2013; Lippert et al., 2014; Huang Wentao et al., 2015a, b; Yang Tianshui et al., 2015a; Cao Yong et al., 2017; Tong Yabo et al., 2017; 曹勇等, 2017; 张波兴等, 2017; 梁雅伦等, 2017)。但是, 不同研究获得的古纬度存在很大分歧,造成其限定 的印度—欧亚大陆碰撞时限、发生位置和模式等存 在很大争议:碰撞时限从 65~20 多百万年不等 (Klootwijk et al., 1979; Besse et al., 1984; Patzelt et al., 1996; Ali and Aichison, 2008; Tong Yabo et al.,

2008; Chen Junshan et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Yi Zhiyu et al., 2011; Meng Jun et al., 2012; van Hinsbergen et al., 2012, 2018; Lippert et al., 2014; Yang Tianshui et al., 2015a; Cao Yong et al., 2017; Tong Yabo et al., 2017),碰撞发生古纬度在约 10°~约 23°N (Klootwijk et al., 1979; Dupont-Nivet et al., 2010; Huang Wentao et al., 2013, 2015b; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Lippert et al., 2014; Tong Yabo et al., 2017),碰撞模式有硬碰撞(印度—特提斯喜马 拉雅为单一陆块,早新生代与欧亚大陆发生了一次 碰撞; Achache et al., 1984; Besse et al., 1984; Patriat and Achache, 1984; Patzelt et al., 1996; Appel et al., 1998; Tong Yabo et al., 2008; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Tan Xiaodong et al., 2010; Yi Zhiyu et al., 2011; Sun Zhiming et al.,

2012) 与软碰撞(印度/特提斯喜马拉雅为相互独立 的陆块/岛弧,先(早新生代)后(晚始新世---渐新 世)与欧亚大陆发生了两期次碰撞; Aitchison et al., 2007; van Hinsbergen et al., 2012; Yang Tianshui et al., 2015a 等)两种模式。上述争议,对于印度--欧 亚板块的碰撞时限认识造成了很大的混淆,甚至导 致了部分非古地磁学学者完全否认古地磁的研究结 果等。由于争议的碰撞时间范围从约 70 Ma 到 20 Ma,确定拉萨陆块和特提斯喜马拉雅晚白垩世—古 近纪时期的古纬度尤为重要:同时,造成上述认识的 主要古地磁结果可能受到了如区域构造、样品数、次 生剩磁(重磁化)、火山岩地球磁场长期变化、沉积 岩磁倾角浅化等在内的各种因素影响,加上不同时 期岩石定年和剩磁测量技术条件的制约,数据之间 质量参差不齐。因此,有必要分别对已有的晚白垩 世—古近纪古地磁结果进行可靠性评判和分析造成 差异的主要原因,为古地磁学研究正名。另外,考虑 到两个陆块现今均呈近东西向逾 2000 km 的狭长条 带,东西部不同部位古纬度转换到相同参考点其限 定的碰撞时间可能会有不同,本次研究针对拉萨陆 块已有古地磁数据点分布比较广泛将其以 88°E 为 界划分为中东部和中西部地区,而特提斯喜马拉雅 因其整体古地磁数据量较少且主要分布在陆块中部 地区没有进行划分。

1 古地磁数据可靠性评判标准

目前,国际上公认的古地磁数据遴选原则主要 依据 Van der Voo(1990)提出的七条判据,下面列出 7条经过本文适当调整的判据:①精确的地层年代。 一般情况下,年代精度最好控制在岩石年代的1% 范围内,或显生宙确定在半个"世"之内,前寒武纪 确定在4%或者40 Ma之内。②足够的样品量。要 求采点数 N≥3,每个采点样品数≥3,样品总数 n> 24, 精度参数 $k(ext{ of } K) \ge 10$ 和置信区间 $\alpha_{os}(ext{ of } A_{os})$ ≤16:③有效的系统退磁步骤。因为岩石记录的剩 磁通常包含多个组分,包括高温/场的指向原点的特 征剩磁组分和中、低温/场组分,必须能够确定各组 分被明确分离,并利用主成分分析法计算方向;此 外,退磁后的剩余强度应足够低(<10%的天然剩 磁)。④有野外检验或者其他方法约束剩磁获得时 代或排除了重磁化。常用的野外检验法包括褶皱检 验、烘烤检验、砾岩检验等;随着科学技术的发展,一 些岩石磁学、岩相学或者扫描电镜等技术可以限定 剩磁获得时间或者排除了重磁化的可能,应具有跟 野外检验类似的效果,也应该可以作为类似评判标 准之一;⑤有地层产状控制(火山岩产状能够很好 限定)或者构造从属于稳定克拉通或板块。对于造 山带附近,尤其是青藏高原地区,必须要有明确的地 层产状控制,因为大多数地层已经产生了变形,对剩 磁方向有明显的影响;⑥具有倒转极性且正负极性 呈对趾分布;⑦显著区别于较年轻(超过一个世)的 古地磁极方向,在一定程度上能够避免部分重磁化 结果。另外,越来越多的学者认识到了磁倾角浅化 对沉积岩和地球磁场长期变化对火山岩古地磁极的 影响。因此,本研究在上述七条判据的基础上,增加 第⑧条:沉积岩古地磁结果需要经过磁倾角浅化校 正或没有遭受浅化验证;火山岩古地磁结果需要通 过地磁场长期变化验证(或者满足年代跨度足够 长)。

根据上述标准,古地磁极每通过一条判据.得到 一个点数,所有点数之和即为该古地磁极的品质因 子(Q,范围从0到8)。一般认为,一个可靠的古地 磁极至少应满足 Q≥3,Q 值越高越好。但也有研究 者认为,高质量的古地磁数据必须同时满足判据1~ 5(Besse and Courtillot, 2002)。鉴于目前拉萨和特 提斯喜马拉雅地区的古地磁结果存在较大争议,本 研究选取后者这个比较严格的方案,即:古地磁结果 只有在全部满足判据1~5时(0≥5)才能通过可靠 性评判标准。需要指出的是,因为古地磁结果的复 杂性,部分未满足上述标准的有效数据可能因此被 舍弃掉了。另外,对于那些在同一或邻近地区同一 套地层中获得的古地磁研究结果存在分歧目无法确 认原因的,在不能判断哪一个结果为正确的情况下, 即使这些数据有些通过了全部判据1~5.为避免争 议或者误导,本文也把这些古地磁数据排除在古纬 度分析之外,仅用作参考。总体来说,通过了上述评 判标准的古地磁数据,至少在理论上其可靠性会得 到一定保证。

2 古地磁数据评判

本研究通过收集、整理拉萨陆块和特提斯喜马 拉雅已发表的古地磁数据[附表 A,数据页数较 多,印刷纸本上略。电子文件见《地质论评》网站 (www.geojournals.cn/georev)及中国知网(https:// cnki.net)等],并逐一核查符合上述8条判据的哪几 条。对于通过可靠性评判标准(满足判据1~5)且 没有争议的古地磁数据(附表 A 中蓝色字体),为避 免冗余,本文不再展开分析和论述。而部分古地磁



图 2 拉萨与特提斯喜马拉雅地质简图(修改自 Hu Xiumian et al., 2016)

Fig. 2 Simplified geological map of the Lhasa and Tethyan—Himalaya area(modified from Hu Xiumian et al., 2016) 图中显示了白垩纪—古近纪通过可靠性评判标准的古地磁采样点分布位置;红色星(29°N, 88°E)代表了本研究选取的参考点位置;GCT—大反转逆冲断裂;KKF—喀喇昆仑断裂;MBT—主边界逆冲断裂;MCT—主中央逆冲断裂;MFT—主前缘逆冲断裂;STDS—藏南拆离系

Figure showing the locations of the paleomagnetic data that pass the reliability criteria. the red star(29°N, 88°E) represents the reference point of this study; GCT—Great counter thrust; KKF—Karakoram fault; MBT—main boundary thrust; MCT—main central thrust; MFT—main frontal thrust; STDS—south Xizang(Tibet) detachment system

数据虽然通过了可靠性评判标准,但由于对于是否 遭受磁倾角浅化、地球磁场长期变以及重磁化等因 素影响存在很大争议,这部分古地磁数据在不能判 断谁对谁错的情况下仅用作参考(附表 A)。为了 更好地说明所收集到的部分古地磁数据未通过可靠 性评判标准(附表 A 中绿色字体数据)和被用作参 考的原因,本文对于这些古地磁数据依据判据 1~8 分别进行详细分析和综合评判。

2.1 拉萨陆块

2.1.1 拉萨陆块中东部地区(88°E 以东)

根据前面所述的古地磁数据可靠性评判标准, 首先,来自该区的部分白垩纪—古新世火山岩与沉 积岩古地磁结果(附表 A 中绿色字体数据)因地层 单元划分与年代学不清楚(判据 1;朱志文等, 1981)、有效采点和样品数据量不足及特征剩磁平 均方向误差过大(判据 2;Li Guangcen and Mercier, 1980; Lin Jinlu and Watts, 1988)、缺乏有效的系统 退磁(判据 3;朱志文等, 1981)、可能的重磁化(Lin Jinlu and Watts, 1988; Otofuji et al., 1990;判据4) 和缺乏野外检验验证(判据4; Li Guangcen and Mercier, 1980; 朱志文等, 1981; 叶祥华和李家福, 1987; Lin Jinlu and Watts, 1988; Otofuji et al., 1990)以及地层产状不明确(判据5; Lin Jinlu and Watts, 1988)等问题,这些研究的古地磁结果将直 接排除在进一步的拉萨陆块中东部地区古纬度分析 之外。

拉萨陆块中东部地区通过可靠性评判标准但存 在争议的古地磁数据主要分布在林周盆地及周边地 区中—晚白垩世设兴组沉积岩—火山岩序列(Tan Xiaodong et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2012; 梁 雅伦等, 2017; Cao Yong et al., 2017)和林周盆地与 南木林盆地的古新世—始新世林子宗群火山岩—沉 积岩序列及其切穿火山岩地层的岩墙群(Achache et al., 1984; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Dupont-Nivet et al., 2010; Liebke et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Lippert et al., 2014; Huang Wentao et al., 2013, 2015b;图 2, 附表 A)。

(1)中—晚白垩世(约110~65 Ma)。林周盆地 及周边地区设兴组不整合于古近纪林子宗群火山岩 之下,与下伏早白垩世塔克那组地层整合接触,主要 由红层及玄武质熔岩流夹层组成。地层中的化石组 合显示其年代为晚白垩世(西藏自治区地质矿产 局, 1993),但无法提供准确的生物地层年代约束。 根据林子宗群下部典中组底部火山岩的 Ar-Ar 年代 学结果为约 65.0~644 Ma (Mo Xuanxue et al., 2007; Chen Junshan et al., 2014), 塔克那组地层中 最年轻的化石为早白垩世 Albian 期(西藏自治区地 质矿产局, 1993),约束设兴组地层的年代在约110 ~约65 Ma之间(Tan Xiaodong et al., 2010)。Tan Xiaodong 等(2010) 在林周盆地针对设兴组红层和 熔岩夹层分别开展了详细的古地磁研究,其中,从 43个红层采点中分离出377个特征剩磁方向,具有 双极性目通过褶皱检验,获得平均剩磁方向为 Dec= 350. 2°、*Inc* = 23. 5°、*k* = 75.0 和 α₉₅ = 2.5, 通过进一 步的 E/I 分析(Tauxe and Kent, 2004)得到校正后 的平均磁倾角为 42°(39.9°~44.5°),该结果满足第 1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值为7;此外,从熔岩层 32 个采点获得的 136 个特征剩磁方向通过褶皱检 验,依据 E/I 统计分析(Tauxe and Kent, 2004),他 们认为这些剩磁方向没有遭受磁倾角浅化影响且很 可能平均掉了地磁场的长期变化,计算得到地层坐 标系下的平均方向为 Dec = 202.6°、Inc = -41.9°、k= 52.0 和 α₉₅ = 4.4, 满足第 1、2、3、4、5、7 和 8 条判据, Q值为7。Sun Zhiming 等(2012) 在马乡地区分别 从设兴组红层和安山岩层获得了17个采点111个 和3个采点15个样品的特征剩磁方向,具有正负极 性且通过褶皱检验,满足第1、2、3、4、5和7条判据, 0 值为6。Cao Yong 等(2017) 报道了来自林周盆地 设兴组红色砂岩和玄武岩的年代学(约75~约68 Ma)和古地磁研究结果,从砂岩 10 个采点 85 个样 品和玄武岩层 11 个采点 79 个样品分离出了特征剩 磁方向,结合岩石薄片显微镜下观察、褶皱检验和倒 转检验表明其可能为原生剩磁方向:同时,依据砂岩 和玄武岩的磁倾角平均值在误差范围内一致以及 VGP 离散度统计分析,他们认为该地区晚白垩世红 层未遭受磁倾角浅化影响且所获得剩磁方向平均掉 了地磁场的长期变化,获得倾斜校正后的平均方向 为 $Dec = 0.5^{\circ}$ 、 $Inc = 20.2^{\circ}$ 、k = 25.5 和 $\alpha_{95} = 6.4$,满足 所有判据,Q值为8。当然,因为砂岩夹层和玄武岩

的磁倾角基本一致,并不能排除其是后期玄武岩的 烘烤结果,还待今后烘烤检验来进一步验证。梁雅 伦等(2017)在林周盆地设兴组背斜两翼进行了系 统的古地磁采样,从15个采点分离出了151个特征 剩磁方向,计算得到地层坐标系下的平均方向为 $Dec = 341.9^{\circ}$, $Inc = 22.9^{\circ}$, k = 56.5和 $\alpha_{os} = 5.1_{\circ}$ 但这 些特征剩磁方向在 69% 地层展平时获得最大集中. 指示为同褶皱磁化结果, 剩磁平均方向为 Dec = 339.1°、*Inc*=27.3°和 α₀₅=4.1。此外,岩石薄片镜 下分析发现携磁矿物为次生赤铁矿,岩石磁组构为 过渡型构造变形组构,指示设兴组地层遭受了一定 程度的构造变形:他们依据 E/I 分析(Tauxe and Kent, 2004)认为该剖面特征剩磁方向可能没有发 生显著的磁倾角浅化。他们根据区域白垩纪以来两 次主要构造活动(晚白垩世和古新世以后)对地层 产生的变形程度不同,认为同褶皱剩磁方向可能是 第一期晚白垩世构造活动时获得,约为72.4~64.4 Ma。该研究结果满足第1、2、3、4、5、7和8条判据, Q值为7;然而考虑到该研究对重磁化发生时间只 是大致估计,不能夯实其发生年代,可能存在一定的 不确定性,因此该结果仅作参考。值得指出的是,上 述四个研究对于该区设兴组沉积岩石是否存在磁倾 角浅化现象和遭受重磁化存在不同认识。其中 Tan Xiaodong 等(2010)认为设兴组红层存在约 18.5°的 磁倾角浅化,且经过 E/I 校正后磁倾角与火山岩结 果一致;而 Sun Zhiming 等(2012)虽然认为 E/I 分 析在识别红层磁倾角浅化中是有效的,但通过区域 综合对比已有研究结果并未采纳这种方法: Cao Yong 等(2017)和梁雅伦等(2017)则认为该区沉积 岩均未遭受磁倾角浅化影响:此外,梁雅伦等 (2017)对 Tan Xiaodong 等(2010)和 Sun Zhiming 等 (2012)的研究剖面采集平行样品进行磁组构分析, 发现这两个剖面的岩石均为过渡性构造变形组构, 指示区域遭受了一定的构造变形作用。据此他们推 测区域内设兴组红层可能广泛地遭受了后期不同时 代的重磁化作用,并且认为重磁化时代与成岩时代 的远近会直接影响岩石记录的磁倾角值高低,造成 以往研究所记录的古纬度偏差较大。因此,总的来 说,设兴组有五条通过评判的古地磁数据(Tan Xiaodong et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2012; Cao Yong et al., 2017; 梁雅伦等, 2017), 但这五条数据 差别较大。考虑到来自同一研究区相同地层却存在 显著不同的古地磁结果,其严重受影响于如磁倾角 浅化及其程度、重磁化及其程度和发生时间等,因

此,在进一步开展更加详细的岩石磁学、岩相学、古 地磁学和与区域构造活动等来夯实数据之前,尽管 上述五条数据 Q 值都很高并通过了数据标准评判, 在不能判断谁对谁错的情况下,为了避免争议和误 导,本文将它们全部排除在进一步的拉萨陆块中— 晚白垩世古纬度分析之外,仅作为参考。

(2)古新世—始新世。林子宗群火山—沉积岩 系主要出露于拉萨陆块南缘一个长约 1000 km、宽 约 200 km 的狭长区域内(Coulon et al., 1986; 潘桂 堂等, 2004; Leier et al., 2007; Mo Xuanxue et al., 2007), 岩层不整合于强烈变形的中生代地层之上。 林周盆地内林子宗群发育齐全,出露良好,地层厚度 约 3500 m (He Shundong et al., 2007), 自下而上划 分为三个组: 典中组(E₁d)、年波组(E₂n)和帕那组 (E_p),各组之间具有清晰的界线(Mo Xuanxue et al., 2003; 董国臣等, 2005; Ding Lin et al., 2014)。 林子宗群火山与沉积岩系也被划分成四个地层单 元,自下而上为 K—T、T,、T,和 T,单元(He Shundong et al., 2007),分别对应于上述划分中的典 中组 (E_1d) 、年波组 (E_n) 、帕那组一段 (E_n) 和帕 那组二段(E_2p^2)(Chen Junshan et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010)。此外,位于林周盆地以西、 日喀则市东北约50 km的南木林盆地,林子宗群厚 度约4500 m,主要出露典中组和年波组,而帕那组 可能缺失。目前围绕林子宗群火山岩开展了一系列 基于放射性同位素方法(如 U-Pb 和 Ar-Ar)的年代 学研究(西藏自治区地质矿产局, 1993; Mo Xuanxue et al., 2003; 周肃等, 2004; He Shundong et al., 2007; 李皓扬等, 2007; 梁银平等, 2010; Ding Lin et al., 2014; Chen Junshan et al., 2014; Huang Wentao et al., 2015b; Zhu Dicheng et al., 2015; 陈贝贝等, 2016)。考虑到林周盆地火山岩 Ar-Ar 年代学结果离散度较大,可能受到了盆地热 历史的影响,相比之下 U-Pb 结果可以提供更精确 的年代学约束(He Shundong et al., 2007),综合已 有年代学研究结果(尤其是 U-Pb 方法),典中组、年 波组和帕那组可能分别形成于约 69~约 60 Ma、约 60~约 54Ma 和约 54~约 44 Ma。

Achache 等(1984)报道了来自林周盆地林子宗 群火山岩的古地磁研究,从 8 个采点中获得 46 个特 征剩磁方向,具有双极性且通过褶皱检验,得到地层 校正后的平均方向为 $Dec = 170.9^{\circ}, Inc = -25.5^{\circ}, k =$ 26.4 和 $\alpha_{95} = 11.0$,满足第 1、2、3、4、5 和 7 条判据, Q 值为 6;但经查看原始数据,发现其中一个采点 (39)方向误差过大(α₉₅>16°),不满足可靠性评判 标准判据2。因此,本文剔除这一采点后重新计算 其余7个采点,获得新的平均方向为 Dec=171.6°、 $Inc = -26.9^{\circ}, k = 24.0 和 \alpha_{95} = 12.5, 通过褶皱检验,$ 满足第1、2、3、4、5和7条判据, Q值为6。Chen Junshan 等(2010)在林周盆地和南木林盆地针对林 子宗群地层开展了系统的火山岩年代学和古地磁研 究,从林周盆地典中组、年波组和帕那组分别获得了 8个采点 50个样品、9个采点 63个样品和 5个采点 88个样品的特征剩磁方向,从南木林盆地典中组和 年波组分别获得了7个采点43个样品和9个采点 50个样品的特征剩磁方向。其中林周盆地典中组 具有双极性特征剩磁方向,与南木林盆地典中组特 征剩磁方向一起通过区域褶皱检验,计算得到15个 采点地层坐标系下的平均方向为 Dec=173.5°、Inc= -14.8°、k=19.8和 α₉₅=8.8,满足第1、2、3、4、5和7 条判据,Q值为6。此外,两个盆地年波组均具有双 极性特征剩磁方向且分别通过褶皱检验,与林周盆 地帕那组特征剩磁方向一起通过区域褶皱检验,计 算得到所有23个采点地层坐标系下的平均方向为 $Dec = 355.9^{\circ}$, $Inc = 20.2^{\circ}$, k = 20.2和 $\alpha_{05} = 6.9$, 满足 第1、2、3、4、5和7条判据,Q值为6;但查看南木林 盆地年波组数据,发现有一个采点(xn04)有效样品 量不足(n<3),不满足可靠性判据的第2条。本文 剔除这一采点后重新计算获得该组及其与林周盆地 帕那组、年波组共22个采点的平均剩磁方向(Dec= 356.1°、 $Inc = 19.4^{\circ}$ 、k = 20.0和 $\alpha_{05} = 7.1$;附表 A), 通过了区域褶皱检验, Q 值为 6。Chen Junshan 等 (2014)再次报道了来自林周盆地林子宗群的火山 岩古地磁研究结果,其中从典中组获得 12 个采点 84个双极性特征剩磁方向,并与 Chen Junshan 等 (2010)该盆地典中组结果一起通过区域褶皱检验, 计算得到所有 20 个采点地层坐标系下的平均方向 为 $Dec = 183.6^{\circ}$ 、 $Inc = -12.4^{\circ}$ 、k = 17.3 和 $\alpha_{05} = 8.1$; 从年波组获得 4 个采点 27 个特征剩磁方向,与 Chen Junshan 等(2010)该盆地年波组结果一起通过 区域褶皱检验,计算得到所有13个采点地层坐标系 下的平均方向为 Dec = 1.0°、Inc = 18.1°、k = 27.0 和 α₉₅=8.1;从帕那组获得 12 个采点 88 个特征剩磁方 向,通过倒转检验,并与 Chen Junshan 等(2010) 帕 那组结果一起通过区域褶皱检验,计算得到所有17 个采点地层坐标系下的平均方向为 Dec = 12.4°、Inc =23.2°、k=23.5 和 α₉₅=7.3;依据 VGP 角标准差统 计分析(Vandamme, 1994),他们认为上述林子宗群 三个组的剩磁方向充分平均掉了地磁场的长期变. 分别满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,0值均为7。 Sun Zhiming 等(2010) 在林周盆地以西门堆地区的 年波组地层采集了15个采点的古地磁样品,经过系 统退磁从 14 个采点 104 个样品中分离出了特征剩 磁方向,具有双极性并通过褶皱检验,他们依据 VGP 离散度统计分析认为这些剩磁方向充分平均 掉了地磁场的长期变化,计算得到地层坐标系下的 平均方向为 Dec = 359.0°、Inc = 26.1°、k = 19.6 和 α₀₅ =9.2,满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值为7。 Liebke 等(2010) 对林周盆地侵入到年波组中的约 53 Ma的铁镁质岩墙群开展了古地磁研究,从10个 采点分离出了 68 个特征剩磁方向,具有双极性并通 过褶皱检验,结合显微镜下矿物学检查表明为原生 剩磁方向,经过统计分析他们认为这些结果已经平 均掉了地磁场的长期变化,计算得到地层倾斜校正 后的平均方向为 Dec=15.4°、Inc=27.2°、k=25.6 和 *α*₉₅=9.7,满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值为 7;但查看原始数据发现,其中有3个采点(LD1、4、 6)的平均方向误差过大(α_{s5}>16°),不满足可靠性 判据的第2条。因此,本文剔除这3个采点后重新 计算获得剩余7个采点52个特征剩磁的平均方向 为 $Dec = 16.2^{\circ}$ 、 $Inc = 23.6^{\circ}$ 、k = 24.0 和 $\alpha_{05} = 12.5$ (Q 值为7)。Tan Xiaodong 等(2010)从林周盆地帕那 组凝灰岩中获得了9个采点76个样品的特征剩磁 方向,通过褶皱检验,依据这些剩磁方向的分布特征 与 Tauxe 和 Kent(2004)长期变模型预测结果对比, 他们认为所获得古地磁结果可能平均掉了地磁场的 长期变化,计算得到地层坐标系下的平均方向为 $Dec = 359.5^{\circ}$, $Inc = 51.8^{\circ}$, k = 98.0 和 $\alpha_{05} = 5.2$, 满足 第1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值为7。Dupont-Nivet 等(2010)针对林周盆地林子宗群 T, 单元(帕 那组)开展了古地磁研究,从24个采点195个样品 分离出了双极性的特征剩磁方向,计算得到这些采 点地层坐标系下的平均方向为 Dec = 12.5°、Inc = 39. 4°、k = 29.0 和 $\alpha_{95} = 5.6$, 与 Tan Xiaodong 等 (2010) 帕那组结果(9个采点)和 Achache 等 (1984)林子宗群部分结果(4个采点)一起通过区 域褶皱检验,满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值 为7。Huang Wentao 等(2013)对林周盆地林子宗群 上部 T, 单元的始新世近 232 m 厚的沉积岩序列开 展了详细的古地磁研究,从119个样品中分离出了 特征剩磁方向,全部为正极性,根据这些剩磁方向投 影呈明显的东西向拉长分布特征,他们认为可能指

示了地层沉积期间或之后短时间内获得的地磁场方 向,计算得到地层坐标系下的平均方向为 Dec =10.2°、Inc = 20.5°、 $k = 25.1 和 \alpha_{95} = 2.6$;该研究通过 开展 E/I 分析(Tauxe and Kent, 2004)和各向异性 为基础的磁倾角浅化分析(Kodama, 2009),分别将 平均磁倾角方向校正至约 40°(95%的置信区间为 33.1°~49.5°)和 41.3±3.3°,这与 Dupont-Nivet 等 (2010)报道的来自这套沉积岩下伏火山岩的平均 磁倾角值一致;其中,基于非滞后剩磁各向异性为基 础的校正得到的地层坐标系下平均方向为 Dec =9.2°、Inc = 41.3°、 $k = 20.2 和 \alpha_{95} = 3.3$ (样品数 n =96),满足第1、2、3、4、5、7 和 8 条判据,Q 值为 7。

由上可知,来自拉萨陆块中东部地区古近纪林 子宗群及岩墙群的13条通过评判的数据,得到的拉 萨陆块中东部地区(参考点:29°N.88°E)古纬度位 置在约4.1°~约31.5°N之间,争议很大。其中,来 自林周盆地及周边地区、南木林盆地典中组和年波 组的古地磁结果普遍约束拉萨陆块中东部在较低的 古纬度位置(约4.1~约13.0°N; Achache et al., 1984; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Liebke et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2010), 而来自林周盆 地帕那组的古地磁结果约束拉萨陆块中东部的古纬 度位置从较低到较高都有(约10.5~约31.5°N; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Dupont-Nivet et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Huang Wentao et al., 2013)。Dupont-Nivet 等(2010) 通过统计分 析,认为Tan Xiaodong 等(2010) 帕那组 9 个正极性 古地磁采点方向并没有平均掉地磁场的长期变。 Chen Junshan 等(2014) 对来自帕那组火山岩 60 个 采点的古地磁方向进行分析,发现磁倾角分布从约 10°到超过65°离散度很大,指出至少有四种可能的 原因造成这一现象:第一,采样的地层单元具有不同 的年代,导致古地磁数据记录了帕那组沉积期间拉 萨陆块快速的纬向运动:第二,部分火山岩地层产状 不明确,导致对古地磁数据进行了不正确的地层校 正;第三,部分采点方向,尤其是沉积岩地层可能经 历了显著的由压实效应造成的磁倾角浅化:第四,由 于地磁场的长期变和可能的来自极性转换时期或漂 移时期的磁场方向造成。通过分析,他们认为第四 种原因最有可能,据此认为帕那组较高的古纬度值 (约 21°~约 32°N; Dupont-Nivet et al., 2010; Liebke et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Lippert et al., 2014)可能是对来自没有平均掉地磁场长期变 的古地磁方向的过高估计:此外,他们还认为这些古

地磁采点方向在时间上重叠或者地磁场未被均匀采 样也可能是造成古纬度结果呈现较大偏差的原因。 因此仍需要在更大区域范围内开展采样和进一步多 手段验证的系统古地磁研究。Lippert 等(2014)通 过对林周盆地林子宗群上部火山岩(帕那组)已报 道的古地磁数据分析发现,这些结果之间的差异可 能来源于地磁场的长期变化没有被充分平均。为此 该研究对 Achache 等 (1984)、Dupont-Nivet 等 (2010)、Liebke 等(2010)、Sun Zhiming 等(2010)和 Tan Xiaodong 等(2010)的 62 个采点古地磁数据进 行评判筛选后,剩余的41个采点古地磁结果具有正 负极性倒转序列,通过了区域褶皱检验并且充分平 均掉了地磁场的长期变,计算得到帕那组火山岩的 平均剩磁方向为 Dec = 6.9°、Inc = 39.5°、k = 30.5 和 *α*₉₅=4.4,满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,Q值为 7。他们认为这一结果可以提供可靠的拉萨陆块古 纬度位置约束。然而,考虑到 Achache 等(1984)的 火山岩古地磁结果未给出明确的采样时代和地层单 元,直接将该结果与其他帕那组结果统一进行平均 来指示帕那组沉积时期的地磁场方向是否合适仍有 待考证。此后, Huang Wentao 等(2015b)针对南木 林盆地林子宗群的典中组和年波组开展了古地磁研 究,结合 Chen Junshan 等(2010)的古地磁结果,分 别开展了年波组沉积岩(红色粉砂岩)采点、火山岩 采点以及年波组和典中组火山岩采点的检验分析, 获得的特征剩磁方向没有通过褶皱检验,指示其为 褶皱后获得的剩磁方向。该研究进一步通过详细的 岩石磁学和岩相学分析认为年波组沉积岩的载磁矿 物为次生赤铁矿且遭受了完全重磁化,年波组顶部 凝灰岩层则发生了部分重磁化,典中组下部的部分 火山岩未遭受重磁化影响而中上部则遭受了严重的 重磁化。他们认为 Chen Junshan 等(2010) 从南木 林盆地获得的特征剩磁方向是钛磁铁矿和染色赤铁 矿携带的原生热剩磁和次生化学剩磁的混和:最后 该研究使用磁倾角线性模拟的方法从部分重磁化的 年波组上部凝灰岩中分离出了 45 个样品的原生热 剩磁磁倾角方向为约 38.1°(95% 置信区间为 35.7° ~40.5°),这一结果与林周盆地林子宗群相似时期 的火山岩和经过磁倾角浅化校正的沉积岩结果一致 (Dupont-Nivet et al., 2001; Huang Wentao et al., 2013)。考虑到对林周盆地和南木林盆地及其周边 地区林子宗群古地磁数据差别很大,且典中组和年 波组地层是否携带了原生剩磁或遭受了后期重磁化 及重磁化的程度(Chen Junshan et al., 2010, 2014;

Huang Wentao et al., 2015b)及帕那组地层虽无重磁 化但却存在地磁场长期变化是否平均掉(Chen Junshan et al., 2010, 2014; Dupont-Nivet et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Huang Wentao et al., 2013, 2015b)等争议,本文认为在目前还没有 其他验证的基础上,尽管这些数据都通过了上述严 格评判标准,但由于不知谁对谁错的情况下还是不 能直接用来限定拉萨该时段的古纬度,仅能作参考。

2.1.2 拉萨陆块中西部地区(88°E以西)

首先,来自该区的部分火山岩与沉积岩古地磁 结果(附表 A 中绿色字体数据)同样因地层单元划 分与年代学不清楚(判据1;叶祥华和李家福, 1987; Otofuji et al., 1989)、有效采点和样品数据量 不足(判据2;Klootwijk et al., 1979; Otofuji et al., 1989; Chen Yuyan et al., 1993)、可能的重磁化 (Chen Yuyan et al., 1993;判据4)和缺乏野外检验 控制(判据4;Klootwijk et al., 1979; 叶祥华和李家 福, 1987; Otofuji et al., 1989; Chen Yuyan et al., 1993)等问题,直接排除在进一步的拉萨陆块中西 部地区白垩纪—古近纪的古纬度分析之外。此外, 李阳阳(2016)针对狮泉河地区的典中组和年波组 火山岩开展了较为详细的古地磁研究(附表 A),从 典中组 13 个采点获得 80 个双极性的特征剩磁方 向,从年波组17个采点获得113个特征剩磁方向并 且通过褶皱检验和倒转检验。然而考虑到①拉萨陆 块西部典中组和年波组火山岩序列可能不同于拉萨 陆块东部林周地区的古新世—始新世林子宗群火山 岩,如Yang Tianshui 等(2015a)获得措勤地区典中 组火山岩的 U-Pb 锆石年代为约 121~约 117 Ma, 唐 祥德等(2013)通过 Ar-Ar 年代学研究约束措勤地区 典中组和年波组年代为约99~约93 Ma, Yi Zhiyu 等 (2015)则获得狮泉河盆地(典中组和年波组?)以及 亚热盆地(年波组)火山岩的 Ar-Ar 年代分别为约 93 和约 80 Ma, 而马义明(2016) 针对狮泉河盆地典 中组火山岩的 U-Pb 锆石年代结果为约 67.7 Ma,这 说明拉萨陆块西部火山岩可能形成于白垩纪时期并 且不同地区不同定年方法甚至同一地区不同剖面之 间得到的火山岩年代结果从早白垩世到晚白垩世差 异很大,因此精确的定年是开展进一步古地磁研究 的前提;然而该研究并未有精确年代学限定,而仅是 通过把这些火山岩与林周地区林子宗群火山岩进行 简单对比作为其年代学依据;②典中组结果缺乏野 外检验;③该研究得到的典中组(22.9°)和年波组 (1.8°)磁倾角平均值相差很大,在未分析原因的基 础上直接将两个组的剩磁方向求平均,方法值得商 榷;因此,这一古地磁结果也排除在进一步的古纬度 分析之外。

拉萨陆块中西部地区通过可靠性评判标准但存 在不确定性的古地磁数据主要分布在错将顶地区古 新世一始新世含凝灰岩沉积地层(Meng Jun et al., 2012;图 2,附表 A)。Meng Jun 等(2012)报道了来 自错江顶地区约 200 m 厚的古新世—始新世曲下组 和加拉孜组地层的磁性地层和古地磁研究结果,共 采集130个古地磁样品,经过系统退磁获得62个负 极性和7个正极性的有效特征剩磁方向,通过褶皱 检验:该研究依据加拉孜组地层中下部凝灰岩层 U-Pb 锆石年代学结果(54.8±0.7Ma)约束剖面沉积发 生在 53.8~56.6 Ma 之间的负极性期,并因此推测 7 个正极性方向可能遭受了重磁化。计算剩余 62 个 负极性样品获得平均特征剩磁方向为 Dec=168.1°、 *Inc* = -42.0°、*k* = 7.4 和 α₉₅ = 7.1。通过与同时期其 他地区火山岩古地磁方向(Dupont-Nivet et al., 2010; Lippert et al., 2011; van Hinsbergen et al., 2012)对比,他们认为研究区地层未遭受磁倾角浅 化影响,满足第1、2、3、4、5、7和8条判据,0值为7。 但是,因为部分样品中可能包含了重磁化结果,在没 有重磁化验证的基础上,这些负极性特征剩磁方向 的可靠性在一定程度上值得怀疑,因此本次研究仅 作参考。

2.2 特提斯喜马拉雅

首先将特提斯喜马拉雅的部分沉积岩古地磁结 果(附表 A 中绿色字体数据)因地层单元划分与年 代学不清楚(判据1;朱志文等, 1981)、有效采点和 样品数据量不足(Besse et al., 1984; Patzelt et al., 1996; Tong Yabo et al., 2008; Yi Zhiyu et al., 2011) 及特征剩磁平均方向误差过大(判据2:朱志文等, 1981; Liebke et al., 2013)、退磁不彻底(判据3;叶 祥华和李家福, 1987)、重磁化(判据4; Liebke et al., 2013)和缺乏野外检验验证(判据 4; Kloot and Bingham, 1980; 朱志文等, 1981; 叶祥华和李家福, 1987; Patzelt et al., 1996; Appel et al., 1998; 李建 忠等, 2006)等问题直接排除在进一步的古纬度分 析之外。此外,易治宇等(2016)从堆拉地区晚白垩 世宗山组下部获得5个灰岩采点的特征剩磁方向, 与 Patzelt 等(1996) 报道的来自同一地区宗山组中 上部灰岩地层中获得的4个有效采点方向一起通过 了褶皱检验,表明了宗山组特征剩磁是褶皱前获得。 依据这些结果呈现出统一的负极性,与同时期国际 标准极性柱(Ogg and Smith, 2004)约70%为正极性的特征不符,他们推测堆拉地区宗山组灰岩遭受了后期重磁化,该研究利用印度大陆视极移与重磁化纬度数值关系以及通过设定大印度范围(约1500 km),约束重磁化发生时间在51±9 Ma~64±11 Ma之间,误差很大;然而,考虑到该研究的采样层位有限、缺乏与国际标准极性柱的直接对比以及特提斯喜马拉雅与印度板块主体之间的构造关系和大印度范围仍存在很大争议(Palzelt et al., 1996; Yi Zhiyu et al., 2011; Aitchison et al., 2007; van Hinsbergen et al., 2012; Yang Tianshui et al., 2015b; Ma Yiming et al., 2016)等问题,这一古地磁结果也排除在进一步分析之外。

特提斯喜马拉雅地区通过可靠性评判标准但存 在不确定性或有争议的古地磁数据主要分布在卧龙 地区遭受重磁化的早中侏罗世灰岩地层(Huang Wentao et al., 2015a)和岗巴、堆拉地区晚白垩世宗 山组及古新世宗普组灰岩地层(Patzelt et al., 1996; Yi Zhiyu et al., 2011)。Huang Wentao 等(2015a)针 对卧龙地区早中侏罗世 Kioto 群灰岩、Laptal 组泥灰 质粉砂岩和灰岩以及 Dangar 组泥灰质灰岩序列开 展了古地磁学研究,从239个样品中分离出了特征 剩磁方向,通过褶皱检验表明为褶皱前获得的剩磁 方向,他们依据这些正极性特征剩磁方向与国际标 准极性柱(Gradstein et al., 2012)同时期频繁的极 性倒转带不符,并结合详细的岩石磁学、岩相学检查 和端元模拟等方法揭示这些灰岩中的携磁矿物主要 为自生磁铁矿,认为这些侏罗纪灰岩地层记录了褶 皱前的重磁化(Huang Wentao et al., 2017c), 重磁 化事件发生在约23.8°S:通过与印度板块视极移曲 线期望的古地磁方向对比,他们认为重磁化可能发 生在 103~84 Ma 或 77~67 Ma。同样考虑到特提斯 喜马拉雅与印度板块构造演化关系存在争议,该重 磁化年代仅具有参考价值:如果该结果可靠.那么根 据特提斯喜马拉雅白垩纪期间的古纬度演化规律. 该重磁化事件发生在 77~67 Ma 期间的可能性更大 (图3)。

宗山组主要表现为一套灰色厚层块状生物碎屑 灰岩夹页岩,产出有有孔虫、双壳类和介形类等古生 物化石,约束该组的沉积时代属于晚白垩世 Campanian 期到 Maastrichtian 期。Patzelt等(1996) 针对岗巴和堆拉地区的晚白垩世宗山组分别开展了 古地磁研究,从岗巴地区获得9个采点114个特征 剩磁方向,主要为正极性(*n*=110),从堆拉地区获得



图 3 拉萨陆块、特提斯喜马拉雅、欧亚大陆和印度板块(参考点:29°N,88°E)晚白垩世以来的古纬度演化 Fig. 3 Paleolatitude evolution of Lhasa, Tethyan—Himalaya, Eurasia and India since the Late Cretaceous (reference point: 29°N, 88°E)

红色符号代表火山岩结果,白色及黄色符号代表沉积岩结果,灰色符号代表参考数据。数字对应的古地磁数据详见附表 A 。欧亚大陆和 印度板块白垩纪以来的古地磁极数据来自 Torsvik 等(2012)(表 1);MELH—拉萨陆块中东部地区;MWLH—拉萨陆块中西部地区;K₁—早 白垩世;K₂—晚白垩世;E₁—古新世;E₂—始新世;E₃—渐新世;N—Q—新近纪—第四纪

The red symbols represent volcanic paleomagnetic results, white and yellow symbols show the sedimentary paleomagnetic results and gray symbols indicate the paleomagnetic results that used as references. Refer to the Table 1 for the details of the numbers. Paleomagnetic poles of the Eurasia and India since Cretaceous come from Torsvik et al., 2012; Table 1); MELH—Middle—east Lhasa Block; MWLH—Middle—west Lhasa Block; K₁—Early Cretaceous; K₂—Late Cretaceous; E₁—Paleocene; E₂—Eocene; E₃—Oligocene; N—Q—Neogene—Quaternary

6 个采点 46 个负极性特征剩磁方向,这些特征剩磁 方向一起通过区域褶皱检验,计算地层坐标系下的 平均方向为 $Dec = 182.9^{\circ}, Inc = 13.5^{\circ}, k = 19.0 和 \alpha_{95}$ = 8.9;但经查看原文发现,岗巴地区宗山组中有 2 个采点(A28、A86-III)和堆拉地区宗山组有 2 个采 点(D39、D53)平均方向误差过大($\alpha_{95} > 16^{\circ}$)或精度 参数值过低(k < 10),本文剔除这些采点后重新计算 获得剩余 11 个采点 122 个特征剩磁方向的平均值 为 $Dec = 183.0^{\circ}, Inc = 15.6^{\circ}, k = 17.0 和 \alpha_{95} = 11.5$, 通过区域褶皱检验,满足第1、2、3、4、5和7条判据, Q值为6。但最近,Huang Wentao等(2017a,c)依据 来自宗山组灰岩不确定的褶皱检验结果、详细的岩 石磁学和岩相学分析,认为宗山组灰岩遭受了后期 重磁化,记录了由自生磁铁矿携带的化学剩磁;考虑 到该结果重磁化的可能性和争议,本文排除该套数 据在进一步的分析之外,仅作为参考结果。

宗普组主要为一套碳酸岩沉积,厚度约 360 m, 该组可以被划分为四段,由底部向上包括块状灰岩 (Ⅰ段)、泥灰岩(Ⅱ段)、瘤状灰岩(Ⅲ段)和层状灰 岩(N段),地层中浮游有孔虫约束宗普组沉积年代 主要为古新世。Patzelt 等(1996)从岗巴和堆拉地 区宗普组灰岩地层分别获得 10 个采点 90 个特征剩 磁方向和4个采点23个特征剩磁方向,均具有双极 性并一起通过区域褶皱检验,计算得到地层坐标系 下的平均方向为 Dec = 176. 2°、Inc = -7.9°、k = 28.7 和 α_{os} = 7.5;但查看岗巴地区古地磁结果,发现宗普 组有3个采点(C18、19、31)和堆拉地区宗普组有2 个采点(F34、35)平均方向误差过大(α₉₅>16°)。本 文剔除这5个采点后重新计算了剩余9个采点81 个特征剩磁方向的平均值为 Dec = 176.9°、Inc = -11.0°、k=32.0和α₉₅=9.3,通过区域褶皱检验,满 足第1、2、3、4、5和7条判据,Q值为6。Yi Zhiyu 等 (2011)针对岗巴地区基堵拉组和宗普组灰岩(I-Ⅳ段)开展了详细的古地磁研究,分别从约356.4 m 厚的宗普组地层 170 个层位和约 123.8 m 厚的基堵 拉祖地层 30 个层位采集了古地磁样品,经过系统退 磁和特征剩磁统计分析,从167个层位获得的339 个特征剩磁方向通过了褶皱检验和倒转检验。通过 对这些剩磁方向的 E/I 分析 (Tauxe and Kent, 2004)和结合区域已有结果(Dupont-Nivet et al., 2010),他们认为沉积压实效应造成的磁倾角浅化 对该地区灰岩影响并不显著(Huang Wentao et al., 2017a)。通过计算得到宗普组 I 段 18 个采点 171

个特征剩磁方向在地层坐标系下的平均值为 Dec = 180.8°、*Inc* = -11.1°、*k* = 68.3 和 α₉₅ = 4.2, 宗普组 Ⅱ—Ⅳ段14个采点141个特征剩磁方向在地层坐 标系下的平均值为 Dec = 177.0°、Inc = -19.6°、k = 128.2 和 α₉₅ = 3.5, 均满足所有判据, Q 值均为 8。 然而,最近 Huang Wentao 等(2017a)通过对 Yi Zhiyu 等(2011) 报道的古地磁方向重新进行野外检 验分析,认为宗普组灰岩记录了同褶皱或褶皱后剩 磁方向,通过全面的岩石磁学分析得出沉积物中超 过70%的铁磁性矿物为对剩磁没有贡献的超顺磁 颗粒磁铁矿,而岩相学结果揭示灰岩中磁铁矿颗粒 是由早期成岩作用下铁的硫化物(如黄铁矿)氧化 而来,这指示了岗巴地区宗普组灰岩遭受了化学重 磁化,并指出造山带氧化流体引起的自生磁铁矿生 长可能是重磁化的一种机制。随后 Yi Zhiyu 等 (2017)结合 Yi Zhiyu 等(2011)和 Patzelt 等(1996) 结果开展了进一步褶皱检验分析,再次强调了宗普 组特征剩磁方向为褶皱之前获得,认为宗普组次生 磁铁矿记录的剩磁方向发生在灰岩早期成岩阶段或 沉积之后很短的时间内,岗巴地区的古地磁结果仍 然可用于大印度古地理重建。考虑到岗巴地区灰岩 是否记录原生地磁场方向或遭受广泛重磁化仍存在 争议(Yi Zhiyu et al., 2011, 2017; Huang Wentao et al., 2017a,b,c),上述古地磁结果在使用前还需进 一步的验证。因此,总的来说,到目前为止,特提斯

表1印度和欧亚板块晚白垩世—古近纪古地磁极和古纬/

	6- 15		古地磁极		参考点		6- 15		古地磁极		参考点
板 块	年代 (Ma)	纬度 (°N)	经度 (°E)	误差 (A95)	(29°N,88°E) 古纬度	 枚 块	年代 (Ma)	纬度 (°N)	经度 (°E)	误差 (A95)	(29°N,88°E) 古纬度
	0	88.5	173.9	1.9	29.1+1.6/-1.5		0	88.5	173.9	1.9	29.1+1.6/-1.5
	10	87.2	240.4	1.8	26.5+1.5/-1.4		10	86.7	150.0	1.8	30.5+1.5/-1.5
	20	83.7	254.7	2.6	22.8+2.1/-2.0		20	84.4	152.1	2.6	31.3+2.2/-2.1
	30	79.7	281.7	2.6	19.0+2.0/-1.9		30	83.1	146.5	2.6	32.4+2.2/-2.1
	40	74.7	286.8	2.9	14.4+2.2/-2.1		40	81.1	144.3	2.9	33.7+2.5/-2.3
	50	65.1	278.4	2.8	4.4+2.0/-2.0		50	78.9	164.7	2.8	31.0+2.4/-2.3
印	60	48.5	280.8	2.1	-11.6+1.5/-1.5	欧	60	78.2	172.6	2.1	29.5+1.8/-1.7
度板	70	36.4	280.7	2.5	-23.5+1.9/-2.0	业	70	79.2	175.7	2.5	28.9+2.1/-2.0
块	80	29.0	283.5	2.9	-30.2+2.3/-2.4	块	80	79.7	177.9	2.9	28.5+2.4/-2.3
	90	20.9	291.4	2.5	-35.2+2.1/-2.1		90	80.4	167.2	2.5	30.3+2.1/-2.0
	100	19.7	293.0	3.3	-35.6+2.7/-2.9		100	80.8	152.3	3.3	32.6+2.8/-2.6
	110	11.1	295.9	3.3	-41.7+2.8/-3.0		110	81.2	193.1	3.3	26.4+2.7/-2.5
	120	8.6	296.4	2.6	-43.5+2.3/-2.3		120	79.0	190.1	2.6	26.2+2.1/-2.0
	130	-1.0	297.1	2.8	-50.6+2.5/-2.5		130	75.0	183.4	2.8	26.6+2.3/-2.2
	140	-5.3	297.9	6.0	-53.1+5.3/-5.8		140	72.4	187.9	6.0	24.6+5.0/-4.5

注:资料来源:Torsvik et al., 2012。

喜马拉雅古近纪还没有一个稳定的没有争议的有效 古地磁数据,上述三条古地磁数据仅能作为参考。

最近, Appel 和 Yi Zhiyu(2017)在 2017 年 7 月 昆明第三极科学峰会(Third Pole Science Summit)上 对来自特提斯喜马拉雅地区的晚白垩世—古近纪已 有古地磁结果进行了评析。他们认为岗巴地区部分 灰岩古地磁数据(Patzelt et al., 1996; Yi Zhiyu et al., 2011),在缺乏其他有效古地磁结果的情况下, 尽管还存在一些问题,仍然可以看作是可靠的,而早 白垩世以来的其他已有数据都存在问题,如重磁化 (Liebke et al., 2013)和有效采点与样品数不足 (Besse et al., 1984; Appel et al., 1998; Tong Yabo et al., 2008)等,这与本文的评判和分析基本吻合, 但是本文选择了严格评判标准,将可能也存在重磁 化的岗巴地区部分灰岩古地磁数据(Patzelt et al., 1996; Yi Zhiyu et al., 2011)也排除在有效数据之 外,仅供参考。

3 古地磁结果与讨论

本文通过对拉萨陆块和特提斯喜马拉雅晚白垩 世一古近纪古地磁数据进行严格的可靠性评判和争 议数据筛选后,共获得 10 条有效数据(其中拉萨陆 块9条、特提斯喜马拉雅1条)和24条参考数据(其 中拉萨陆块19条、特提斯喜马拉雅5条)。将上述 古地磁数据以及欧亚和印度大陆的古地磁极数据 (Torsvik et al., 2012),统一转换到位于雅鲁藏布缝 合带上的同一参考点(29°N,88°E),计算古纬度(附 表 A;表1)并获得了拉萨和特提斯喜马拉雅晚白 垩世—古近纪古纬度演化历史及其与欧亚、印度板 块古纬度演化的关系(图 3)。

3.1 拉萨陆块

晚白垩世时期,拉萨陆块中东部地区 2 条有效 数据(镜柱山组)得出的古纬度值(约 10.5+3.9/-3.7°N和 15.8+5.2/-4.7°N)与中西部地区 6 条有 效数据得出的古纬度值(约 10.0+2.0/-1.9°N和 13.8+7.7/-6.7°N)基本一致,可能指示了晚白垩世 时期拉萨陆块具有跟现代相似的近东—西向展布特 征,并且总体稳定在约 10.0~15.8°N之间。当然, 部分通过评判的参考数据有争议,如设兴组的一些 古地磁结果揭示的古纬度有高(22.3~23.8°N;Tan Xiaodong et al., 2010)有低(9.5+3.6/-3.4°N,Cao Yong et al., 2017;14.8~17.0°N,梁雅伦等,2017和 Sun Zhiming et al., 2012)。这些数据主要基于是否 存在磁倾角浅化及其程度(Sun Zhiming et al., 2012; Tan Xiaodong et al., 2010; Cao Yong et al., 2017: 梁雅伦等, 2017)、重磁化及其程度(梁雅伦 等,2017)和发生时间等存在很大分歧或不确定性, 仅被用作参考。其中 Tan Xiaodong 等(2010)的磁 倾角结果在校正前(23.5°),与其他同时期沉积岩 结果一致(叶亚坤, 2016; Sun Zhiming et al., 2012; 梁雅伦等, 2017; Cao Yong et al., 2017), 而校正后 则偏高(42.0°),但与同套地层中所夹的火山岩平均 磁倾角(41.9°)一致,并有很高的 Q 值(Q=7)。尽 管一些研究认为该地层的磁倾角未遭受浅化影响 (梁雅伦等, 2017; Cao Yong et al., 2017), 或认为可 能在 72.4~64.4 Ma 遭受重磁化等(梁雅伦等, 2017),目前并不能排除这个经过磁倾角浅化校正 后的结果不对,也即说明拉萨陆块中东部地区在晚 白垩世早期也可能位于较高的古纬度位置(22.3~ 23.8°N),高于中西部地区(10.0~13.8°N)。如果 上述结果是对的话,考虑到印度板块碰撞前的展布 形态,高纬度指示碰撞晚,低纬度指示碰撞早,那该 结果将对于限定印度——欧亚板块碰撞时限以及在哪 部分(中部、东部或者西部)先发生碰撞等提供新的 认识,亟待新的进一步的古地磁研究去验证。

拉萨陆块古近纪仅获得1条有效数据,约束陆 块中西部地区在始新世晚期—渐新世早期位于 21.8+2.5/-2.3°N。而对于参考的数据中, Meng Jun 等(2012)的负极性古地磁方向主要考虑其受到 了重磁化的影响未被采用;如果这一结果是正确的 话,那么说明拉萨陆块中西部地区在古新世末期— 始新世早期已经到达 22.7+4.8/-4.3°N。而拉萨 陆块中东部地区来自林子宗群火山岩—沉积岩系的 13条古地磁数据得到的古纬度值范围较大(31.5~ 4.1°N; Tan Xiaodong et al., 2010; Dupont-Nivet et al., 2010; Huang Wentao et al., 2013, 2015b; Lippert et al., 2014; Achache et al., 1984; Chen Junshan et al., 2010, 2014; Liebke et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2010),主要考虑这些数据由于在磁 倾角浅化、重磁化和地球磁场长期变等问题上存在 很大争议,结果具有很大的不确定性而未被采用。 尤其关于重磁化问题,在造山带地区,相对较老地层 中部分重磁化肯定很正常,但我们认为整个区域所 有地层都发生全部重磁化的可能性应该相对较小。 如果上述结果是对的话,那么如上所述,高纬度指示 碰撞晚,低纬度指示碰撞早,亟待进一步的有效古地 磁数据的验证。

3.2 特提斯喜马拉雅

特提斯喜马拉雅唯一的有效古地磁数据显示其 在晚白垩世中期(约80 Ma)位于34.2+4.4/-5.0°S (张波兴等,2017),与同时期印度板块的古纬度基 本一致,结合其他已有古地磁结果(Huang Wentao et al.,2015a; Yang Tianshui et al.,2015b; Ma Yiming et al.,2016),说明至少在早白垩世—晚白垩世中期 期间特提斯喜马拉雅可能属于印度板块的北部组成 部分。晚白垩世中期(约80 Ma)之后,特提斯喜马 拉雅暂时并无有效的高质量古地磁数据。尽管由参 考的古地磁结果指示特提斯喜马拉雅在晚白垩世晚 期—始新世期间与印度板块发生分离并快速北向漂 移的可能,但目前的有限古地磁数据并不充分。

4 结论

可靠的古地磁数据是约束拉萨陆块和特提斯喜 马拉雅古地理位置和开展印度——欧亚大陆碰撞时限 及缩短变形研究的前提。本文通过开展严格的古地 磁数据可靠性评判,从拉萨陆块和特提斯喜马拉雅 筛选出了有效的晚白垩世—古近纪古地磁数据。得 到以下认识和结论:① 拉萨陆块在晚白垩世期间基 本稳定在约10.0°~15.8°N之间,并无显著南北向 运动:拉萨陆块在始新世晚期---渐新世早期位于 21.8+2.5/-2.3°N。②特提斯喜马拉雅在晚白垩 世中期(约80 Ma)位于34.2+4.4/-5.0°S,并与印 度板块有基本一致的古纬度,可能指示二者至少在 晚白垩世中期以前作为统一陆块位移。③来自拉萨 陆块中东部林周盆地及周边地区和南木林盆地晚白 垩世—始新世的古地磁结果,是目前关于印度—欧 亚板块碰撞时限及其他相关问题争论的关键。但是 目前关于这些数据是否存在磁倾角浅化及浅化的程 度(Tan Xiaodong et al., 2010; Sun Zhiming et al., 2012; Cao Yong et al., 2017)、是否携带了原生剩磁 或遭受了重磁化及重磁化的程度(Chen Junshan et al., 2010, 2014; Sun Zhiming et al., 2010; Huang Wentao et al., 2015b)和地磁场长期变是否平均掉 (Chen Junshan et al., 2010, 2014; Dupont-Nivet et al., 2010; Liebke et al., 2010; Tan Xiaodong et al., 2010; Lippert et al., 2014) 等争议很大。在上述问 题的原因查明之前这些有争议的古地磁数据不能很 好地用来确定其古纬度演化,因此仅能用作参考:特 提斯喜马拉雅该时段的古地磁数据,主要来自灰岩 地层,而不同研究对于不同灰岩地层是否记录原生 剩磁方向或遭受了重磁化存在很大争议(Yi Zhiyu

et al., 2011, 2017; Huang Wentao et al., 2017a,b, c),因此在甄别其是否记录了原生剩磁前,也不能 用来确定特提斯喜马拉雅该时段的古纬度演化及其 与印度板块的构造演化关系,仅能用作参考。也即, 特提斯喜马拉雅在晚白垩世期间是否与印度板块分 离先行与拉萨陆块发生碰撞也不能很好地确定。

总的来说,现有的古地磁数据,真正有效数据太 少,并不能很好地限定特提斯喜马拉雅与拉萨陆块 发生碰撞的时限及碰撞后的缩短变形以及大印度的 范围等。要真正确定特提斯喜马拉雅与拉萨陆块的 碰撞时限等上述主要科学问题,还亟待针对存在争 议的岩石单元开展更详细深入的古地磁学、岩石磁 学和非磁学方法相结合的研究,以检验、查证和解决 存在争议的原因和问题,并在两个陆块更多地区 (尤其是特提斯喜马拉雅中西部)进一步获得更可 靠的高质量古地磁数据(尤其是晚白垩世--古近 纪)。此外,考虑到现今两个陆块均呈近东西向大 于 2000 km 的狭长条带,轻微的旋转就会造成东西 部显著不同的古纬度,二者放在一起研究可能对精 确限定碰撞时限有一定影响。因此,对于拉萨陆块 和特提斯喜马拉雅,必须对东、西部地区分别进行精 细古地磁研究和对比分析,才能真正准确地限定其 碰撞发生的时限和位置。

综上所述,通过开展严格的可靠性评判(满足 判据1~5)而筛选出的古地磁数据仍然是可靠的, 至少在宏观上对于限定青藏高原—喜马拉雅造山带 地区的大地构造格局是有效的,开展古地磁学研究 在定量约束不同陆块古地理位置演化中发挥着不可 替代的作用。但是由于岩石记录地球磁场的方向是 一个复杂的过程,其获得剩磁过程和之后会受到多 种因素(如沉积压实、地球磁场长期变化、重磁化 等)综合作用的影响,尤其是喜马拉雅造山带地区, 上述问题可能具有更加复杂的机理,必须开展更加 系统的包括区域构造控制、岩石磁学、岩石学和可靠 性检验等在内的全方位的古地磁研究。

致谢:感谢审稿专家和期刊编辑的建设性意见 和建议,很好地提高了本文的质量。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

曹勇, 孙知明, 刘栋梁, 张蕾, 叶小舟, 郑勇, 何祥丽. 2017. 拉萨地 块北缘尼玛地区晚白垩世古地磁结果及其构造意义. 岩石学 报, 33(12): 3989~3998.

陈贝贝, 丁林, 许强, 岳雅慧, 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(5): 1037~1054.

- 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(3): 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(6):549~557.
- 胡修棉, 王建刚, 安慰, Garzanti E, 李娟. 2017. 利用沉积记录精确 约束印度—亚洲大陆碰撞时间与过程. 中国科学: 地球科学, 47(3): 261~283.
- 黄宝春,陈军山,易治宇.2010.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,53(9):2045~2058.
- 李皓扬,钟孙霖,王彦斌,朱弟成,杨进辉,宋彪,刘敦一,吴福元. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据:岩石学报,23(2):493~500.
- 李建忠, 冯心涛, 朱同兴, 庄忠海, 潘忠习, 邹光富. 2006. 藏南特提 斯喜马拉雅构造古地磁新结果. 自然科学进展, 5(16): 578~ 583.
- 李阳阳. 2016. 拉萨地块狮泉河地区古近纪林子宗群火山岩古地磁 学研究. 导师: 吴汉宁. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~67.
- 梁雅伦,黄宝春,易治宇,张也,闫永刚,张东海.2017.印欧大陆碰 撞前亚洲大陆南缘古位置再研究:林周盆地上白垩统红层的古 地磁新结果.地球物理学报,60(5):1811~1824.
- 梁银平,朱杰,次邛,何卫红,张克信.2010. 青藏高原冈底斯带中 部朱诺地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 中国地质大学学报,(2):211~223.
- 马义明. 2016. 拉萨地体与特提斯喜马拉雅白垩纪古地磁学和年代 学研究. 导师:杨天水. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论 文: 1~152.
- 莫宣学,赵志丹,周肃,董国臣,廖忠礼.2007.印度—亚洲大陆碰 撞的时限.地质通报,26(10):10~14.
- 潘桂棠,王立全,朱弟成.2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大 科学问题的思考. 地质通报,23(1):12~19.
- 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(1):136~149.
- 王二七. 2017. 关于印度与欧亚大陆初始碰撞时间的讨论. 中国科学: 地球科学, 47(3): 284~292.
- 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):1~30.
- 西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质 出版社: 1~707.
- 叶祥华,李家福.1987.古地磁与西藏板块及特提斯的演化.成都地 质学院学报,14(1):68~82.
- 叶亚坤. 2016. 拉萨地块上白垩统镜柱山组古地磁学研究. 导师:吴 汉宁. 西安:西北大学硕士学位论文:1~64.
- 易治宇,梁雅伦,赵杰,闫永刚,陈力为,唐祥德.2016.碰撞前印度 大陆北缘古地理轮廓—藏南晚白垩世堆拉灰岩古地磁研究.地 质学报,90(11):3282~3292.
- 张波兴,李永祥,胡修棉.2017.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,62(4):298~311.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与 深部动力过程. 中国科学: 地球科学, 38(9): 1041~1056.
- 张也,黄宝春.2017.特提斯喜马拉雅地块白垩纪古纬度变化对印欧 碰撞模式的制约.中国科学:地球科学,47(6):674~683.
- 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 (20):2095~2103.

- 朱志文,朱湘元,张一鸣. 1981. 西藏高原古地磁及大陆漂移. 地球 物理学报,24(1):40~49.
- Achache J, Courtillot V, Zhou Yaoxiu. 1984. Paleogeographic and tectonic evolution of southern Tibet since Middle Cretaceous time, new paleomagnetic data and synthesis. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B12): 10311~10340.
- Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. 2007. When and where did India and Asia collide? Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112: B05423.
- Ali J R, Aitchison J C. 2008. Gondwana to Asia: plate tectonics, paleogeography and the biological connectivity of the Indian subcontinent from the Middle Jurassic through latest Eocene (166~35 Ma). Earth-Science Reviews, 88(3~4): 145~166.
- 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 Tingdong, Xiao Xuchang, Chang Chengfa, Li Guangqin, Li Baoyu, Teng Jiwen, Wang Naiwen, Chen Guoming, Han Tonglin, Wang Xibin, Den Wanming, Sheng Huaibin, Cao Yougong, Zhou Ji, Qiu Hongrong, Bao Peisheng, Wang Songchan, Wang Bixiang, Zhou Yaoxiu, Xu Ronghua. 1984. Structure and evolution of the Himalaya—Tibet orogenic belt. Nature, 307(5946): 17~22.
- An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya—Tibetan plateau since late Miocene times. Nature, 411(6833): 62~66.
- Appel E, Li H, Patzelt A, Wang J. 1998. Palaeomagnetic results from Late Cretaceous and early Tertiary limestones from Tingri area, southern Tibet, China. Journal of Nepal Geological Society, 18: 113 ~124.
- Besse J, Courtillot V. 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B11): EPM-6.
- Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, Westphal M, Zhou Yaoxiu. 1984. Palaeomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture. Nature, 311(5987), 621~626.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Tibet. 1993 #. Regional Geology of Tibet Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House: 1~707.
- Cao Yong, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Zhang Lei, Ye Xiaozhou, Zheng Yong, He Xiangli. 2017&. Late Cretaceous paleomagnetic results in the Nyima area from the northern margin of the Lhasa block and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 33 (12): 3989~3998.
- Cao Yong, Sun Zhiming, Li Haibing, Pei Junling, Jiang Wan, Xu Wei, Zhao Laishi, Wang Leizhen, Li Chenglong, Ye Xiaozhou, Zhang Lei. 2017. 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 Research, 41: 337~351.
- Chen Beibei, Ding Lin, Xu Qiang, Yue Yahui, Xie Jing. 2016&. U-Pb age framework of the Linzizong volcanic rocks from the Linzhou Basin, Tibet. Quaternary Sciences, 36(5): 1037~1054.
- Chen Junshan, Huang Baochun, Sun Lisha. 2010. New constraints to the onset of the India—Asia collision, paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa block, China. Tectonophysics, 489 (1~4): 189~209.
- Chen Junshan, Huang Baochun, Yi Zhiyu, Yang Liekun, Chen Liwei. 2014. Paleomagnetic and ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar geochronologic results from the Linzizong Group, Linzhou Basin, Lhasa Terrane, Tibet: implications to Paleogene paleolatitude and onset of the India—Asia

collision. Journal of Asian Earth Sciences, 96(57): 162~177.

- Chen Yuyan, Cogné J, Courtillot V, Tapponnier P, Zhu X Y. 1993. Cretaceous paleomagnetic results from western Tibet and tectonic implications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 981 (B10): 17981~17999.
- 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 and Planetary Science Letters, 79(3~4): 281~302.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang Chengfa, Sun Yiyin. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series A): Mathematical and Physical Sciences, 327(1594): 379~413.
- Ding Jikai, Zhang Shihong, Chen Weiwei, Zhang Junhong, Yang Tianshui, Jiang Gaolei, Zhang Kexin, Li Haiyan, Wu Huaichun. 2015. Paleomagnetism of the Oligocene Kangtuo Formation red beds (central Tibet): inclination shallowing and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 104(1): 55~68.
- Ding Lin, Maksatbek S, Cai Fulong, Wang Houqi, Song Peiping, Ji Weiqiang, Xu Qiang, Zhang Liyun, Muhammad Q, Upendra B. 2017#. Processes of initial collision and suturing between India and Asia. Science China Earth Sciences, 47(3): 293~309.
- Ding Lin, Xu Qiang, Yue Yahui, Wang Houqi, Cai Fulong, Li Shun. 2014. The Andean-type Gangdese mountains: paleoelevation record from the Paleocene—Eocene Linzhou Basin. Earth and Planetary Science Letters, 392: 250~264.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Wang Liang, Zhou Su. 2005&. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Lhünzhub basin, northern Lhasa, Tibet, China. Geological Bulletin of China, 24(6): 549~557.
- Dupont-Nivet G, Lippert P C, Van Hinsbergen D J J, Merjers M, Kapp P. 2010. Paleolatitude and age of the Indo—Asia collision. Geophysical Journal Internation, 182: 1189~1198.
- Enkin R J.2003. The direction correction tilt test: an all-purpose tilt test for paleomagnetic studies. Earth and Planetary Science Letters, 212: 151~160.
- Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M. 2012. The Geological Time Scale 2012. Elsevier, Waltham, 1144.
- He Shundong, Kapp P, DeCelles, P G, Gehreis G E, Herzier M. 2007. Cretaceous - Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet. Tectonophysics, 433(1~4): 15~37.
- Hu Xiumian, Wang Jiangang, An Wei, Garzanti E, Li Juan. 2017#. Constraining the timing of the India—Asia continental collision by the sedimentary record. Science China Earth Sciences, 47(3): 261 ~283.
- Hu Xiumian, Wang Jiangang, Boudagher-Fadel M, Garzanti E, An Wei. 2015. 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 Research, 32: 76~92.
- Hu X M, Garzanti E, Wang J G, Huang W T, An W, Webb A.2016. The timing of India—Asia collision onset - Facts, theories, controversies. Earth-Science Reviews, 160:264~299.
- Huang Baochun, Chen Junshan, Yi Zhiyu. 2010&. Paleomagnetic discussion of when and where India and Asia initially collided. Chinese Journal of Geophysics, 53(9): 2045~2058.
- Huang Wentao, Dupont-Nivet G, Lippert P C, van Hinsbergen D J J, Dekkers M J, Guo Zhaojie, Waldrip R, Li Xiaochun, Zhang Xiaoran, Liu Dongdong, Kapp Paul. 2015b. Can a primary remanence be retrieved from partially remagnetized Eocence volcanic rocks in the Nanmulin Basin (southern Tibet) to date the India—

Asia collision?. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120 (1): 42~66.

- Huang Wentao, 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. Geophysical Journal International, 194(3): 1390~1411.
- Huang Wentao, Lippert P C, Jackson M J, Dekkers M J, Zhang Yang, Li Juan, Guo Zhaojie, Kapp P, van Hinsvergen D J J. 2017a. Remagnetization of the Paleogene Tibetan Himalayan carbonate rocks in the Gamba area: implications for reconstructing the lower plate in the India—Asia collision. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(2): 808~825.
- Huang Wentao, Lippert P C, Jackson M J, Dekkers M J, Zhang Yang, Li Juan, Guo Zhaojie, Kapp P, van Hinsbergen D J J. 2017b.
 Reply to comment by Z. Yi et al. on "Remagnetization of the Paleogene Tibetan Himalayan carbonate rocks in the Gamba area: Implications for reconstructing the lower plate in the India—Asia collision". Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(7): 4859~4863.
- Huang Wentao, Lippert P C, Zhang Yang, Jackson M J, Dekkers M J, Li Juan, Hu Xiumian, Zhang Bo, Guo Zhaojie, van Hinsbergen D J J. 2017c. Remagnetization of carbonate rocks in southern Tibet: perspectives from rock magnetic and petrographic investigations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(4): 2434 ~ 2456.
- Huang Wentao, Van Hinsbergen D J J, Dekkers M J, Garzanti E, Dupont-Nivet G, Lippert P C, Li Xiaochun, Maffion M, Langereis C G, Hu Xiumian. 2015a. Paleolatitudes of the Tibetan Himalaya from primary and secondary magnetizations of Jurassic to Lower Cretaceous sedimentary rocks. Geochemistry Geophysics Geosystem, 16 (1): 77~100.
- Klootwijk C T, Sharma M L, Gergan J, Tirkey B, Shah S K, Agarwal V. 1979. The extend of Greater India, II. Paleomagnetic data from the Ladakh intrusives at Kargil, Northwestern Himalayas. Earth and Planetary Science Letters, 44: 47~64.
- Klootwijk C T, Bingham D K. 1980. The extent of greater India, III. Palaeomagnetic data from the Tibetan Sedimentary series, Thakkhola region, Nepal Himalaya. Earth and Planetary Science Letters, 51(2): 381~405.
- Kodama K P. 2009. Simplification of the anisotropy-based inclination correction technique for magnetite- and haematite-bearing rocks: a case study for the Carboniferous Glenshaw and Mauch Chunk Formations, North America. Geophysical Journal International, 176 (2): 467~477
- Leier A L, DeCelles P G, Kapp P, Ding Lin. 2007. The Takena Formation of the Lhasa terrane, southern Tibet: The record of a Late Cretaceous retroarc foreland basin. Geological Society of America Bulletin, 119(1~2): 31~48.
- Li Guangcen, Mercier J L. 1980#. News Achievements in the Sino— French Himalayan Expedition. Beijing: Geological Publishing House: 25~37.
- Li Haoyang, Chung Sunlin, Wang Yanbin, Zhu Dichen, Yang Jinhui, Song Biao, Liu Dunyi, Wu Fuyuan. 2007 &. Age, petrogenesis and geologica significance of the Linziong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet: evidence from zircon U-Pb dates and Hf Isotopes. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 493~500.
- Li Jianzhong, Feng Xintao, Zhu Tongxing, Zhuang Zhonghai, Pan Zhongxi, Zou Guanfu. 2006#. New paleomagnetic results from the southern Tibet of the Tethyan Himalaya. Progress in Natural

Science, 16(5): 578~583.

- Li Yangyang. 2016&. The paleomagnetical research on Linzizong volcanic in Shiquanhe area, Lhasa terrane in Paleogene. Xi ' an: A Dissertation Submitted to Northwest University: 1~67.
- Liang Yalun, Huang Baochun, Yi Zhiyu, Zhang Ye, Yan Yonggang, Zhang Donghai. 2017&. Reconnaissance of pre-collisional paleolatitudes of the southern margin of Eurasia: new paleomagnetic results from Upper Cretaceous red beds in the Linzhou basin, Tibet. Chinese Journal of Geophysics, 60(5): 1811~1824.
- Liang Yinping, Zhu Jie, Ci Qiong, He Weihong, Zhang Kexin. 2010&. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rock from Linzizong Group in Zhunou area in middle Gandise belt, Tibet Plateau. Journa of China University of Geosciences——Earth Science, 35(2): 211 ~223.
- Liebke U, Appel E, Ding Lin, Neumann U, Antolin B, Xu Qiang. 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. Geophysical Journal International, 182(3): 1199~1215.
- Liebke U, Appel E, Ding Lin, Zhang Qinghai. 2013. Age constraints on the India—Asia collision derived from secondary remanences of Tethyan Himalayan sediments from the Tingri area. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 329~340.
- Lin Jinlu, Watts D R. 1988. Paleomagnetic results from the Tibetan Plateau. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 327(1594): 239~262.
- Lippert P C, Van Hinsbergen D J J, Dupont-Nivet G. 2014. The Early Cretaceous to present latitude of the central Lhasa-plano (Tibet), a paleomagnetic synthesis with implications for Cenozoic tectonics, paleogeography, and climate of Asia. Special Paper of the Geological Society of America, 507(1): 1~21.
- Lippert P C, Zhao Xixi, Coe R S, Lo Chinghua. 2011. Palaeomagnetism and ⁴⁰Ar/³⁹ Ar geochronology of upper Palaeogene volcanic rocks from central Tibet: implications for the central Asia inclination anomaly, the palaeolatitude of Tibet and post-50 Ma shortening within Asia. Geophysical Journal International, 184(1): 131~161.
- Ma Yiming. 2016&. Paleomagnetism and geochronology of Cretaceous rocks from the Lhasa Terrane and the Tethyan Himalaya. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences: 1~152.
- Ma Yiming, Yang Tianshui, Bian Weiwei, Jin Jingjie, Zhang Shihong, Wu Huaichun, Li Haiyan. 2016. Early Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results from the Tethyan Himalaya, insights into the Neotethyan paleogeography and the India—Asia collision. Scientific Reports, 6: 21605.
- Ma Yiming, Yang Tianshui, Yang Zhenyu, Zhang Shihong, Wu Huaichun, Li Haiyan, Li Huaikun. 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. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(10): 7404~7424.
- McElhinny M. 1964. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. Geophysical Journal of International, 8:338~340.
- McFadden P.1990.A new fold test for palaeomagnetic studies. Geophysical Journal of International, 103:163~169.
- McFadden P L, McElhinny M W.1990. Classification of the reversal test in paleomagnetism. Geophysical Journal of International, 103:725~729.
- Meng Jun, Wang Chengshan, Zhao Xixi, Coe R, Li Yalin, Finn D. 2012. India—Asia collision was at 24°N and 50 Ma: palaeomagnetic proof from southernmost Asia. Scientific Report, 2: 925.

- Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Niu Yaoling, Dong Guochen, Qu Xiaoming, Zhao Zhidan, Yang Zhiming. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. Lithos, 96(1~2): 225~ 242.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Dong Guochen, Zhou Su, Guo Tieying, Zhang Shuangquan, Wang Liangliang. 2003. Response of volcanism to the India—Asia collision. Earth Science Frontiers, 10 (3): 135~148.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, Dong Guochen, Liao Zhongli. 2007&. On the timing of India—Asia continental collision. Geological Bulletin of China, 26(10): 1240~1244.
- Molnar P, England P. 1990. Late cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?. Nature, 346(6279): 29~ 34.
- 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(4201): 419~426.
- Ogg J G, Smith A G. 2004. The geomagnetic polarity time scale. In: Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, eds. A Geological Time Scale. Cambridge, Cambridge University Press: 63~86.
- Otofuji Y, Funahara S, Matsuo J, Murata F, Nishiyama T, Zheng Xilan, Yaskawa K. 1989. Paleomagnetic study of western Tibet, deformation of a narrow zone along the Indus Zangbo suture between India and Asian. Earth and Planetary Science Letters, 92(3~4): 307~316.
- Otofuji Y, Inoue Y, Funahara S, Murata F, Zheng Xilan. 1990. Paleomagnetic study of eastern Tibet——deformation of the Three Rivers region. Geophysical Journal International, 103(1): 85~94.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Zhu Dicheng. 2004&. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai—Tibet Plateau. Geological Bulletin of China, 23(1): 12~ 19.
- Patriat P, Achache J. 1984. India—Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. Nature, 311(5987): 615~621.
- Patzelt A, Li Huamei, Wang Junda, 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(4): 259~284.
- Pozzi J P, Westphal M, Zhou Yaoxiu, Xing Lisheng, Chen Xianyao. 1982. Position of the Lhasa block, South Tibet during the Late Cretaceous. Nature, 297: 319~321.
- Raymo M E, Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. Nature, 359(6391): 117~122.
- Rowley D B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: a review of stratigraphic data. Earth and Planetary Science Letters, 145(1~4): 1~13.
- Sun Zhiming, Jiang Wan, Li Haibing, Pei Junling, Zhu Zongmin. 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 Zhiming , Pei Junling, Li Haibing, Xu Wei, Jiang Wan, Zhu Zongmin, Wang Xisheng, Yang Zhenyu. 2012. Paleomagnetism of Late Cretaceous sediments from southern Tibet, evidence for the consistent paleolatitudes of the southern margin of Eurasia prior to the collision with India. Gondwana Research, 21: 53~63.
- Tauxe L, Watson G S.1994. The fold test: an eigen analysis approach. Earth and Planetary Science Letters, 122(3~4):331~341.

1267

- Tan Xiaodong, Gilder S, Kodama K P, Jiang Wan, Han Yulin, Zhang Hui, Xu Hehua, Zhou Di. 2010. New paleomagnetic results from the Lhasa block: Revised estimation of latitudinal shortening across Tibet and implications for dating the India—Asia collision. Earth and Planetary Science Letters, 293(3~4): 396~404.
- Tang Xiangde, Huang Baochun, Yang Likun, Yi Zhiyu, Qiao Qingqing, Chen Liwei. 2013&. Paleomagnetism and Ar-Ar geochronology of Cretaceous volcanic rocks in the middle Lhasa terrane, China and tectonic implications. Chinese Journal of Geophysics, 56(1): 136~ 149.
- 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(12): 611~616.
- Tauxe L, Kent D V. 2004. A Simplified Statistical Model for the Geomagnetic Field and the Detection of Shallow Bias in Paleomagnetic Inclinations, was the Ancient Magnetic Field Dipolar?. Timescales of the Paleomagnetic Field, Geophysical Monograph Series 145, American Geophysical Union.
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Pei Junling, Wang Heng, Xu Yinchao, Pu Zongwen. 2017. 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 Research, 48: 86~100.
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Zheng Liandi, Yang Tianshui, Shi Linfeng, Sun Zhiming, Pei Junling. 2008. Early Paleocene paleomagnetic results from southern Tibet, and tectonic implications. International Geology Review, 50 (6): 546~562.
- Torsvik T H, Voo R V D, Preeden U, Niocaill C M, Steinberger B, Doubrovine P V, van Hinsbergen D J J, Domeier M, Gaina C, Tohver E, Meert J G, McCausland P J A, Cocks L R M. 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. Earth-Science Reviews, 114(3~4): 325~368.
- Van der Voo R. 1990. The reliability of paleomagnetic data. Tectonophysics, 184 (1): 1~9.
- 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. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (20): 7659~7664.
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li Shihu, Huang Wentao, Advokaat E L, Spakman W.2018. Reconstructing greater India: paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives. Tectonophysics, 760: 69 ~ 94.
- Vandamme D. 1994. A new method to determine paleosecular variation. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 85(1~2): 131~142.
- Wang Er'chie. 2017#. A discussion on the timing of the initial collision between the Indian and Asian continents. Science China Earth Sciences, 47: 284~292.
- Watson G S. 1956. A test for randomness of directions. Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 7(4):160~161.
- Watson G S, Enkin R J. 1993. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. Geophysical Research Letters, 20: 2135~2137.
- Westphal M, Pozzi J P, Zhou Yaoxiu, 1983. Palaeomagnetic data about southern Tibet (Xizang), I, the Cretaceous formations of the Lhasa Block. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 73: 507~521.
- Wu Fuyuan, Huang Baochun, Ye Kai, Fang Aimin. 2008&. Collapsed Himalayan—Tibetan orogeny and the rising Tibetan Plateau. Acta

Petrologica Sinica, 24(1): 1~30.

- Yang Tianshui, Ma Yiming, Bian Weiwei, Jin Jingjie, Zhang Shihong, Wu Huaichun, Li Haiyan, Yang Zhenyu, Ding Jikai. 2015b. Paleomagnetic results from the Early Cretaceous Lakang Formation lavas, constraints on the paleolatitude of the Tethyan Himalaya and the India—Asia collision. Earth and Planetary Science Letters, 428: 120~133.
- Yang Tianshui, Ma Yiming, Zhang Shihong, Bian Weiwei, Yang Zhenyu, Wu Huaichun, Li Haiyan, Chen Weiwei, Ding Jikai. 2015a. New insights into the India—Asia collision process from Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results in the Lhasa terrane. Gondwana Research, 28(2): 625~641.
- Ye Xianghua, Li Jiafu. 1987&. Palaeomagnetism and evolution of Tibet plates and tethys. Journal of Chengdu College of Geology, 14(1): 65~79.
- Ye Yakun. 2016&. Paleomagnetical research on the Upper Cretaceous Jingzhushan Formation in the Lhasa terrane. Xi'an: A Dissertation Submitted to Northwest University: 1~64.
- Yi Zhiyu, Appel E, Huang Baochun. 2017. Comment on "Remagnetization of the Paleogene Tibetan Himalayan carbonate rocks in the Gamba area: Implications for reconstructing the lower plate in the India—Asia collision" by Huang et al. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(7): 4852~4858.
- Yi Zhiyu, Huang Baochun, Chen Junshan, Chen Liwei, Wang Hailong. 2011. Paleomagnetism of early paleogene marine sediments in southern Tibet, China, implications to onset of the India—Asia collision and size of greater India. Earth and Planetary Science Letters, 309(1): 153~165.
- Yi Zhiyu, Huang Baochun, Yang Liekun, Tang Xiangde, Yan Yonggang, Qiao Qingqing, Zhao Jie, Chen Liwei. 2015. A quasilinear 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(7): 1431~1451.
- Yi Zhiyu, Liang Yalun, Zhao Jie, Yan Yongang, Chen Liwei, Tang Xiangde. 2016&. Paleogeography of the northern margin of Indian continent prior to its collision: an investigation of the Late Cretaceous limestones in south Tibet. Acta Geologica Sinica, 90 (11): 3282~3292.
- Yin An. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: a preliminary synthesis. Tectonophysics, 488(1): 293~325.
- Yin An, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan— Tibetan orogen. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28 (28): 211~280.
- Zhang Boxing, Li Yongxiang, Hu Xiumian. 2017&. Paleomagnetic results from Jurassic—Cretaceous strata in the Chuangde area of southern Tibet constrain the nature and timing of the India—Asia collision system. Chinese Science Bulletin, 62: 298~311.
- Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, Ran Yongkang. 2008&. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Chinese Journal of Geophysics, 51(4): 1066~1073.
- Zhang Ye, Huang Baocun. 2017 #. The influence of Creteceous paleolatitude variation of the Tethyan Himalaya on the India—Asia collision patterns. Science China Earth Sciences, 60: 1057~1066.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Qiu Ruizhao, Wang Liangliang, Guo Tieying. 2004#. ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications. Chinese Science Bulletin,

49(20): 2095~2103.

Zhu Dicheng, Wang Qing, Zhao Zhidan, Chung Sunlin, Cawood P A, Niu Yaoling, Liu Shen'ao, Wu Fuyuan, Mo Xuanxue. 2015. Magmatic record of India—Asia collision. Scientific Reports, 5: 14289.

Zhu Zhiwen, Zhu Xiangyuan, Zhang Yiming. 1981&. Palaeomagnetic observation in Xizang and continental drift. Acta Geophysica Sinica, 24(1): 40~49.

Paleomagnetic constraints on the onset of India-Eurasia collision: a synthesis

ZHANG Dawen^{1, 2)}, YAN Maodu^{2, 3)}

1) College of Tourism and Environmental Resource, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong, 277160;

2) Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research,

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101;

3) Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101

Abstract: Paleomagnetism played key roles in understanding the onset of India-Eurasia collision. However, the quality of the existing paleomagnetic data varies tremendously, such as due to inclination-shallowing, paleosecular variation and remagnetization issues, etc., yielding controversial India—Eurasia collision time ranging from 65 to 20 Ma. In this paper, we carried out strict reliability assessments on the available Late Cretaceous-Paleogene paleomagnetic data from the Lhasa Block and Tethyan-Himalaya and obtained 10 pieces of reliable paleomagnetic data. The results suggested that: (1) the Lhasa Block has been stabilized at ~ 10° to 16° N during Late Cretaceous and was located at ~21.8+2.5/-2.3°N in the late Eocene—early Oligocene; 2)the Tethyan—Himalaya was located at $\sim 34.2+4.4/-5.0^{\circ}$ S during the middle Late Cretaceous, similar to that of the India Plate, indicating that the Tethyan—Himalaya might have belonged to the northern part of the India Plate at least during between the Early Cretaceous and middle Late Cretaceous; 3the present late Late Cretaceous—early Oligocene paleomagnetic data can only be regarded as references and are not qualified enough to constrain India-Asia collision before the inclination shallowing, paleosecular variation and remagnetization issues have been fully addressed. It is urgent to carry out further comprehensive magnetic and non-magnetic researches on the disputed rock units to check and validate the above factors and to acquire more reliable paleomagnetic data (especially the late Late Cretaceous-Paleogene) from wider areas around the Lhasa Block and Tethyan-Himalaya (especially the middle and western parts). Additionally, given the huge E-W trending long and narrow shape of the two blocks, slight rotation might cause significant difference in paleolatitudes between the east and west parts, future paleomagnetic analyses should be carried out on both the east and west parts of the region.

Keywords: Lhasa Block; Tethyan—Himalaya; Late Cretaceous—Paleogene; collision time; paleomagnetism; reliability assessment

Acknowledgements: This study was supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No. 2019QZKK0707), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA20070201), the Doctor Research Fund of Zaozhuang University (No. 2018BS064), and the open fund for collaboration research of the Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (LCPU) (No. LCPU201905)"

First author: ZHANG Dawen, male, born in 1988, doctor, mainly engaged in magnetostratigraphic research. Email: zhangdawen@uzz.edu.cn

Corresponding author: YAN Maodu, male, born in 1973, professor, mainly engaged in paleomagnetism and structural geology. Email: maoduyan@itpcas.ac.cn

Manuscript received on: 2018-09-24; Accepted on: 2019-06-28; Edited by: Liu Zhiqiang **Doi**: 10.16509/j.georeview.2019.05.014

	采样点				ž ž			剩磁	方向	0		古地磁相	汲		·· 参考点				
位置	纬度 (%N)	经度 (%E)	组	年代 (Ma)	岩性	样品 (N/n)	磁偏角 (?	磁倾角 ()	精度 (k)	误差 α 95 ()	纬度 (N)	经度 (℃)	误差 (A95)	- 古纬度 (?)	(29°N,88°E) 古 纬度	野外检验	评判标准(Q)	参考文献	编号
拉萨陆块()	LH)																		
	中东部北	虹 (MF	LH)																
林周盆地	30.0	91.2	帕那组 (中部)	43~40	凝灰岩	9/76	359.5	51.8	98.0	5.2	87.5	81.4	5.9	32.4	31.5+5.1/-4.5	F2	1,2,3,4,5,7,8? (7 ?)	Tan Xiaodong et al., 2010*	1
林周盆地	30.0	91.1	帕那组上部	54~44 (50~44)	凝灰岩,安山岩	5/35	3.3	12.3	36.0	12.9	66.0	263.0	9.4	6.2	-	F2(r)	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010*	
林周盆地	30.0	91.1	帕那组	54~44 (50~44)	(流纹质)熔结凝为 岩,流纹岩,凝灰 岩,(流纹质)安山 岩	к 12/88	15.8	26.6	27.4	8.4	68.4	225.2	6.7	14.1	-	R	1,2,3,4,5,6,7 (7)	Chen Junshan et al., 2014*	
林周盆地	30.0	91.1	帕那组	54~44 (50~44)	(流纹质)熔结凝刻 岩,流纹岩,凝灰 岩,(流纹质)安山 岩	K 17/123	12.4	23.2	23.5	7.3	68.7	235.8	5.7	12.1	10.5+4.3/-4.0	F2	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Chen Junshan et al., 2014*	2
林周盆地	30.0	91.1	林子宗群上部 和顶部 (帕那 组?)	54~44 (约 55~43)	沉积岩	-/96	9.2	41.3	20.2	3.3	78.2	215.7	2.7	18.8	21.4+2.2/-2.0	T(P)	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Huang Wentao et al., 2013	3
林周盆地	30.0	91.1	林子宗群 T2 部 分 (帕那组?)	54~47	凝灰岩,硅质凝灰 质层	² 24/195	12.5	39.4	29.0	5.6	76.4	212.6	5.0	22.3	20.8+4.1/-3.7	F2,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Dupont-Nivet et al., 2010*	4
林周盆地	30.0	91.1	帕那组?	约 51.5±4.5	凝灰岩	41PP/-	6.9	39.5	30.5	4.4	80.2	230.4	4.1	22.4	21.1+3.2/-3.0	F2,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Lippert et al., 2014*	5
南木林盆地	29.8	89.2	年波组	60~54 (51.98±0.79)	凝灰岩	-/45	-	38.1	-	2.4	-	-	-	21.4	~20.6+1.7/-1.7	T(R)	1,2,3,4,5 (5)	Huang Wentao et al., 2015b*	6

附表 A 拉萨陆块和特提斯喜马拉雅晚白垩世-古近纪古地磁数据

1

附表A续	
------	--

	采样点					NK 17		剩磁	方向			古地磁	汲	1. <i>6</i> 4	参考点				
位置	纬度 (%N)	经度 (%E)	组	年代 (Ma)	岩性	梓品 (N/n)	磁偏角 ()	磁倾角 (?	精度 (k)	误差 α 95 (°)	纬度 (N)	经度 (℃)	误差 (A95)	- 古纬度 (9	(29°N,88°E)古 纬度	野外检验	评判标准(Q)	参考文献	编号
林周盆地	30.0	91.1	-	约 53	铁镁质岩墙	7/52	16.2	23.6	24.0	12.5	66.8	227.3	9.7	12.3	10.6+7.6/-6.7	F3,F5,D,T(M)	1,2,3,4,5,7,8? (7?)	Liebke et al., 2010*^	7
林周盆地	30.0	91.2	年波组中部和 下部	60~54 (60~50)	砂岩,凝灰岩,灰 岩	9/63	356.5	20.1	23.8	10.8	70.3	279.5	8.2	10.4	-	F2,F3,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010**	
南木林盆地	29.8	89.2	年波组	60~54 (60~50)	凝灰岩,砂岩	8/48	350.6	23.2	15.0	14.8	70.3	297.4	11.5	12.1	11.5+9.2/-7.5	F2,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010**^	8
林周盆地	30.0	91.1	年波组	60~54 (60~50)	熔结凝灰岩	4/27	10.4	13.8	171.6	7.0	65.0	246.0	5.1	7.0	-	F2(r),F3(r)	1,2,3,4,5 (5)	Chen Junshan et al., 2014**	
林周盆地	30.0	91.2	年波组	60~54 (60~50)	砂岩,凝灰岩,灰 岩,熔结凝灰岩	13/90	1.0	18.1	27.0	8.1	69.3	268.4	6.1	9.3	8.3+4.5/-4.2	F2,F3,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Chen Junshan et al., 2014**	9
门堆	30.1	90.9	年波组	约 55.7±3.4 (剖 面中部)	流纹质凝灰岩	14/104	359.0	26.1	19.6	9.2	73.6	274.3	7.3	13.8	12.7+5.6/-5.1	F2,F3,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Sun Zhiming et al., 2010*	10
南木林盆地 林周盆地	² 29.8~30.	0 <mark>89.2~</mark> 91.2	年波组, 帕那组	60~44	凝灰岩,砂岩,灰 岩,安山岩	22/146	356.1	19.4	20.0	7.1	69.8	281.4	5.4	10.0	-	F1,F2,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010**^	
林周盆地	30.0~31.	5 91.0~ 92.0	林子宗群	约 69~44 (60~45)	安山岩, 熔结凝办 岩, 花岗岩	^ζ 7/41	351.6	26.9	24.0	12.5	72.4	299.0	10.0	14.2	13.6+8.0/-6.9	F1,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Achache et al., 1984*^	11
林周盆地	30.0	91.2	典中组	69~60 (64~60)	凝灰岩, 安山岩	8/50	185.5	-21.1	43.8	8.5	70.4	252.9	6.5	10.9	-	D,F1(r), F2(r),F3(r)	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010*	
林周盆地	30.0	91.1	典中组	69~60 (64~60)	安山岩	12/84	182.2	-6.4	14.1	12.0	63.1	266.2	8.5	3.2	-	D,F2(r),F3(r)	1,2,3,4,5 (5)	Chen Junshan et al., 2014*	
林周盆地	29.9	91.1	典中组	69~60 (64~60)	安山岩,凝灰岩	20/134	183.6	-12.4	17.3	8.1	66.4	262.5	6.3	6.3	5.5+4.6/-4.4	F2,F3,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Chen Junshan et al., 2014*	12
南木林盆地	29.8	89.2	典中组	69~60 (64~60)	安山岩,英安岩	7/43	159.6	-9.0	47.9	8.8	58.2	310.5	6.3	4.5	4.1+4.5/-4.4	F1(r), F2(r),F3(r)	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010*	13

附表	А	续	
111-112		~~	

	采样点					ם את		剩磁	方向			古地磁相	R		参考点				
位置	纬度 (%N)	经度 (%E)	组	年代 (Ma)	岩性	杆品 (N/n)	磁偏角 ()	磁倾角 ()	精度 (k)	误差 α95(᠀	纬度 (N)	经度 (℃)	误差 (A95)	- 古纬度 (9	(29°N,88°E) 古 纬度	前 野外检验	评判标准(Q)	参考文献	编号
南木林盆地 林周盆地	' 29.8~30.	0 ^{89.2~} 91.2	典中组	69~60(64~60)	安山岩,英安岩, 凝灰岩	15/93	173.5	-14.8	19.8	8.8	66.0	284.9	8.5	7.5	-	F1,F2,F3,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Chen Junshan et al., 2010*	
林周盆地	29.9	91.3	设兴组	K2	红层	15/151	339.1	27.3	-	4.1	65.4	327.5	3.5	14.5	14.8+2.7/-2.5	F(syn)	1,2,3,4,5,7,8 (7)	梁雅伦等, 2017	14
林周盆地	29.9	91.1	设兴组上部	约 75~68	红层, 玄武质熔岩 流	21/164	0.5	20.2	25.5	6.4	70.5	269.6	4.9	10.4	9.5+3.6/-3.4	F2,R	1,2,3,4,5,6,7,8 (8)	Cao Yong et al., 2017**	15
扎木	29.2	95.9	-	约 76.3	花岗闪长岩	-/18	30.4	52.0	-	5.1	63.8	171.3	6.3	32.6	-	-	1,5 (2)	朱志文等, 1981*	
林周	29.9	91.2	-	K2~E1	红色砂岩	-/42	338.0	40.3	-	5.0	69.0	347.0	5.7	23.0	-	-	2?,5 (2 ?)	朱志文等, 1981	
波密	29.8	95.7	-	95~65	花岗岩	12/53	8.8	47.1	19.6	10.2	82.2	194.7	10.6	28.3	-	-	2,3,5 (3)	Otofuji et al.,1990*	
Qelico	31.7	90.9	-	95~85	安山岩	4/20	347.0	36.0	32.0	16.5	74.0	318.0	16.7	20.0	-	F(in)	1,3,5 (3)	Lin Jinlu and Watts, 1988*	
那曲	31.5	92.0	-	100~95	安山岩	9/33	358.0	35.0	54.0	6.0	78.0	282.0	0.0	19.3	-	F(in)	1?,2,3,5? (4?)	Lin Jinlu and Watts, 1988*	
林周	30.0	90.0	-	K2	粉砂岩	-	332.2	22.5	41.0	12.1	58.4	330.6	6.6	11.7	-	-	1,2?,3,5 (4?)	叶祥华和李家福 1987	,
班戈	31.8	90.0	镜柱山组	K2	粉砂岩, 砂岩, 含 砾砂岩	9/103	328.3	31.8 (E/I)	29.0	9.8	57.9	340.6	6.6	17.2	15.8+5.2/-4.7	D,F(r)	1,2,3,4,5,7 (6)	叶亚坤, 2016^	16
林周盆地	29.9	91.2	设兴组	约 110~65	红层	43/377	350.2	42.0	75.0	2.5	79.6	330.5	2.4	24.2	23.8+1.9/-1.8	F1,F2,F5,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Tan Xiaodong et al., 2010	17
林周盆地	29.9	91.2	设兴组	约 110~65	熔岩流	32/136	202.6	-41.9	52.0	4.4	69.1	191.7	4.2	24.2	22.3+3.4/-3.1	F2	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Tan Xiaodong et al., 2010*	18
马乡	29.9	90.7	设兴组	约 110~72.4	红层,安山岩	20/126	350.8	32.1	17.3	8.1	75.0	306.7	6.8	17.5	17.0+5.4/-4.8	F2,F3,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Sun Zhiming et al.,2012**	19

附表	А	续	

	采样点							剩磁	方向			古地磁	汲	مىلىر بارى	参考点			
位置	纬度 (%N)	经度 (%E)	组	年代 (Ma)	岩性	样品 (N/n)	磁偏角 ()	磁倾角 (?)	精度 (k)	误差 α 95 (°)	纬度 (N)	经度 (°E)	误差 (A95)	- 古纬度 (⁹	(29°N,88°E)古 纬度	ī 野外检验	评判标准(Q)	参考文献 编号
丁青	31.3	95.9	镜柱山组	Cenomanian~ Santonian? (K2)	红层	15/150	0.9	24.3	46.8	5.6	71.4	273.1	5.2	12.7	10.5+3.9/-3.7	F1,F2,F3	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Tong Yabo et al., 20
八宿	30.0	96.7	-	127~69	花岗岩	2/8	343.7	12.1	-	-	61.6	312.6	-	6.1	-	D	3,5 (2)	Otofuji et al.,1990*
安多	32.0	92.0	-	Mid-K	红色砂岩	-	340.0	33.1	49.8	10.6	67.4	328.5	10.4	18.1	-	-	2?,3,5 (3 ?)	Li Guangcen and Mercier, 1980
安多	32.2	91.8	-	Mid-K	红色砂岩	-	346.6	51.7	3.5	24.7	78.7	355.0	25.2	32.3		-	3,5 (2)	Li Guangcen and Mercier, 1980
比如	31.5	93.7	-	Κ	红色砂岩	-/41	325.0	44.5	-	3.9	59.0	2.4	4.4	26.2	-	-	2,5 (2)	朱志文等, 1981
	中西部均	虹 (M)	WLH)															
改则盆地	32.2	84.4	康托组	40~30	红层	35/550	340.3	44.2	63.0	3.1	71.7	339.3	3.1	25.9	21.8+2.5/-2.3	F1,F2,R	1,2,3,4,5,6,7,8 (8)	Ding Jikai et al., 1 2015
卡基尔	34.6	76.1	拉达克侵入岩	49~45	花岗闪长岩, 辉绿 岩墙	3/27	3.0	14.6	53.4	3.8	62.7	249.7	3.3	7.4	-	D	1,3,5 (3)	Klootwijk et al., 1979*
卡基尔	34.6	76.1	拉达克侵入岩	49~45	花岗闪长岩, 辉绿 岩墙	3/23	354.9	19.4	13.6	8.5	64.9	268.0	7.6	10.0	-	D	1,3,5 (3)	Klootwijk et al., 1979*
错将顶	29.9	84.3	曲下组, 加拉孜 组	57~约 54	砂岩, 灰岩, 凝灰 岩	-/62	168.1	-42.0	7.4	7.1	78.0	329.0	5.9	24.2	22.7+4.8/-4.3	F2,F5	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Meng Jun et al., 2 2012**
狮泉河	32.5	80.1	-	Ter	红色页岩	-/9	195.4	-22.7	19.3	12.0	64.9	222.2	10.9	11.8	-	-	3,5 (2)	Otofuji et al.,1989
门图	31.3	80.9	-	Ter	砂岩	-/10	298.5	52.0	7.5	18.9	38.6	9.7	23.5	32.6	-	-	3,5 (2)	Otofuji et al.,1989
狮泉河	32.3	80.1	典中组	约 67.7	火山岩	36/308	43.9	31.4	51.2	3.4	47.7	180.3	3.1	17.0	13.7+2.2/-2.1	F1,F2	1,2,3,4,5,7,8 (7)	马义明, 2016* 3

附丰	٨	4步	
削衣	А	头	

	采样点							剩磁	方向			古地磁	极	1 11.24	参考点				
位置	纬度 (%N)	经度 (%E)	组	年代 (Ma)	岩性	样品 (N/n)	磁偏角 ()	磁倾角 ()	精度 (k)	误差 α 95 (°)	纬度 (N)	经度 (飞)	误差 (A95)	- 古纬度 ([°])	(29°N,88°E) 古 纬度	î 野外检验	评判标准(Q)	参考文献	编号
亚热盆地	31.6	82.2	晚白垩世火山 岩 (年波组?)	约 80 (剖面中 部)	玄武岩, 火山岩团 块(agglomerate)	15/136	346.6	25.6	123.6	3.5	68.4	298.8	2.7	13.5	10.0+2.0/-1.9	F1,F2,F3	1,2,3,4,5,7 (6)	Yi Zhiyu et al., 2015*	4
亚木	29.4	87.7	日喀则群	K~Ter	砂岩	-/11	293.1	-2.6	3.6	27.9	19.3	344.7	23.5	-1.3	-	-	3,5 (2)	Otofuji et al.,198	9
狮泉河盆地	32.3	80.1	典中组	K2?(约60~58)	火山岩	13/80	26.2	22.9	22.2	9.0	58.5	204.4	7.0	11.9	-	D	2,3,5 (3)	李阳阳, 2016*	
狮泉河盆地	32.4	80.1	年波组	K2?(约 60~58)	火山岩	17/113	20.8	1.8	39.6	6.4	53.0	224.0	4.5	0.9	-	R,F3	2,3,4,5 (4)	李阳阳, 2016*	
狮泉河盆地	32.4	80.1	典中组, 年波组	K2?(约 60~58)	火山岩	30/193	24.6	14.6	12.3	7.8	56.2	211.2	5.7	7.4	-	D	2,3,5 (3)	李阳阳, 2016*	
尼玛	31.8	87.2	镜柱山组	K2	红层	8/59	8.2	27.4	37.6	9.2	71.2	241.9	7.4	14.5	11.9+5.7/-5.2	R	1,2,3,4,5,6,7 (7)	曹勇等, 2017	5
措勤	31.2	84.7	镜柱山组	K2	红层	33/291	316.8	30.2	22.4	5.4	49.0	344.3	5.3	16.2	13.3+4.1/-3.7	F1,F2,D	1,2,3,4,5,7,8 (7)	Yang Tianshui et al., 2015a	6
噶尔,狮泉河 盆地	^{]]} 32.4	80.1	晚白垩世火山 岩 (典中组和年 波组?)	三约 93~<84	铁镁质熔岩,凝灰 岩,火山岩团块 (agglomerate)	10/78	21.1	26.8	24.3	10.0	64.1	209.0	9.6	14.2	13.8+7.7/-6.7	F1,F2,R,C	1,2,3,4,5,6,7 (7)	Yi Zhiyu et al., 2015*	7
措勤	30.2	85.3	年波组	约 92.7±4.8	火山岩	6/44	12.2	23.0	258.6	4.0	68.6	230.9	3.1	12.0	-	F1,F2,F3	1,2,3,4,5,7 (6)	唐祥德等,2013*	:
措勤	31.0	85.1	典中组	约 98.5±1.8~ 92.9±3.1	火山岩	8/68	21.5	13.7	35.4	9.4	58.7	220.7	6.9	6.9	-	F1,F3	1,2,3,4,5,7 (6)	唐祥德等,2013*	:
措勤	30.2~31.	0 85.1~ 85.3	典中组, 年波组	约 99~93	火山岩	10/82	15.3	21.8	143.0	4.1	66.1	225.6	3.1	11.3	10.5+2.3/-2.2	F2	1,2,3,4,5,7,8 (7)	唐祥德等, 2013*	:^ 8
狮泉河	32.7	80.2	-	120~80	灰岩	3/22	9.8	23.5	29.9	23.0	67.7	234.2	21.0	12.3	-	-	1,3,5 (3)	Chen Yuyan et al.,1993	
南列荣	32.1	80.5	-	Mid-K	玄武岩	-	320.4	25.1	38.1	8.4	49.2	332.3	6.9	13.2	-	-	2?,3,5 (3 ?)	叶祥华和李家福 1987*	Ι,

阳衣 A 珙	附表	Α	续	
--------	----	---	---	--

附表A续																			
	采样点					њ <u>к</u> п		剩磁方向				古地磁	汲		参考点				
位置	生 ・ 年度 经度 (?N) (?E)	组	年代 (Ma)	岩性	作前 (N/n)	磁偏角 ()	磁倾角 (9	精度 (k)	误差 a95(?)	纬度 (N)	经度 (°E)	误差 (A95)	- 西纬度 (⁹	(29°N,88°E) 纬度	5 野外检验	评判标准(Q)	参考文献 编	号	
江巴	32.6	80.4	-	K	石英闪长岩	-/11	294.7 (g)	-17.5 (g)) 58.3 (g) 6 (g)	15.3	328.9	5.3	-9.0	-	-	3,5 (2)	Otofuji et al.,1989*	
拉昂错	30.7	81.4	-	Κ	辉长岩	-/11	298.9 (g)	6.7 (g)	5 (g)	22.7 (g)	26.4	338.8	19.3	3.4	-	-	3,5 (2)	Otofuji et al.,1989*	
特提斯喜马	b拉雅(TH	I)																	
曲松	29.2	92.3	-	E1	超基性岩	-	320.0	-37.5	63.0	10.5	26.7	314.5	11.8	-21.0	-	-	1,2?,5 (3 ?)	引自叶祥华和李 家福, 1987	
定日	28.7	86.7	遮普惹山组?	Late E1~ early E2	灰岩	8/60	353.8	-5.1	5.6	25.5	58.2	284.5	6.4	-2.6	-	F5-	1?,3,4,5 (4)	Liebke et al., 2013	
定日	28.7	87.2	宗普组	58~56	灰岩,砂岩	4/28	335.5	-5.9	76.0	10.6	50.6	307.9	5.3	2.8	-	F1,D	1,3,4,5 (4)	Besse et al., 1984	
定日	86.8	28.7	基堵拉组, 宗谱 组	E1(E1~E2)	灰岩	8/95	340.1	15.9	6.5	5.6	62.2	31	3 4.2	8.1	-	-	1,3,5 (3)	李建忠等, 2006	
岗巴	28.3	88.5	宗普组 II-IV 段	59~56	灰岩	14/141	177.0	-19.6	128.2	3.5	71.6	277.8	2.5	10.1	10.8+1.9/-1.8	F2(r),F3(r),R(r)	1,2,3,4,5,6,7,8 (8)	Yi Zhiyu et al., 1 2011	
堆拉,岗巴	28.0~28	.3 <mark>88.5~</mark> 89.2	宗普组	E1 ² ~E1 ³	灰岩	9/81	176.9	-11.0	32.0	9.3	67.2	276.8	6.7	5.6	11.4+5.0/-3.6	F1,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Patzelt et al., 2 1996^	
岗巴	28.3	88.5	宗普组I段	约 62~59	灰岩	18/171	180.8	-11.1	68.3	4.2	67.3	266.3	3.5	5.6	8.9+2.6/-2.4	F2(r),F3(r),R(r)	1,2,3,4,5,6,7, 8 (8)	Yi Zhiyu et al., 3 2011	
岗巴	28.3	88.5	基堵拉组	<63~61.8	灰岩	-/20	200.4	4.1	20.3	7.4	53.9	232.3	6.2	2.1	-	F2(r),F3(r),R(r)	1,3,4,5 (4)	Yi Zhiyu et al., 2011	
定日	28.7	86.8	宗普组下部	约 65.5~61.7	灰岩	3/15	162.4	29.1	352.6	6.6	42.6	280.1	6.3	-15.6	-	F(r)	1,3,4,5 (4)	Tong Yabo et al., 2008	
岗巴	28.3	88.5	基堵拉组 Ⅱ 和 Ⅲ 段	66~63	灰岩,砂岩	4/56	358.6	14.4	160.0	7.3	69.0	272.4	5.3	7.3	-	D	1,2?,3,5 (4?)	Patzelt et al., 1996	

附表A续

	采样点		采样点		采样点		采样点		采样点		(H	6 . DS		样品	剩磁方向					古地磁极			参考点				
位置	纬度 (⁹ N)	经度 (%E)	- 组	年代 (Ma)	岩性	(<i>N</i> / <i>n</i>)	磁偏角 ()	磁倾角 (?	精度 (k)	误差 α95(°)	纬度 (N)	经度 (℃)	误差 (A95)	()	(29°N,88°E) 7 纬度	ī 野外检验	评判标准(Q)	参考文献	编号								
堆拉,岗巴	28.0~28.3	3 88.5~ 89.2	宗山组	Campanian~ Maastrichtian (Late Maastrichtian)	灰岩	11/122	183.0	15.6	17.0	11.5	53.7	263.8	8.5	-7.9	-7.2+6.4/-5.9	F1,D	1,2,3,4,5,7 (6)	Patzelt et al., 1996^	4								
堆拉	28.1	89.1	宗山组	约 84~66	灰岩	9/70	172.5	-4.0	34.6	8.9	62.9	285.8	6.3	-2.0	-	F1,F3	1?,2,3,4,5 (5?)	易治宇等,2016									
定日	86.3	28.8	宗山组	约 84~66 (K3)	灰岩,碎屑岩	-/46	152.4	21.8	6.5	8.1	41.8	30	4 6.2	-11.3	-	-	1,3,5 (3)	李建忠等,2006									
堆拉	89.1	28.1	宗山组下部	约 84~76	灰岩	5/38	168.2	-7.3	105.5	7.5	63.1	295.9	5.4	-3.7	-	F1(r),F3(r)	1?,2,3,4,5 (5?)	易治宇等, 2016									
卧龙	28.5	87.0	Kioto 群, Laptal 组和 Dangar 组	¹ 约 191~164	灰岩	-/239	334.2	-41.5	18.5	2.2	32.0	295.0	2.2	-23.8	-23.9+1.7/-1.7	F4	1,2,3,4,5 (5)	Huang Wentao et al., 2015a	t 5-1, 5-2								
江孜	28.9	89.7	床得组	86.3~74.0	灰岩,泥灰岩	7/35	152.0	-52.9	18.0	5.9	-65.7	197.6	5.6	-33.1	-34.2+4.4/-5.0	R	1,2,3,4,5,6,7 (7)	张波兴等, 2017	6								
堆拉	28.0	89.1	岗巴村口组	94~84	灰岩	1/5	135.2	-18	40.6	12.2	43.9	344	9.1	-9.2	-	-	1,3,5 (3)	易治宇等,2016									
定日	28.8	86.9	Zhepure Shanbe	i Late Campanian	灰岩	1/24	7.1	-50.2	8.6	10.7	29.9	259.9	12.9	-30.7	-	D	1,3,5 (3)	Appel et al., 1998	3								
定日	86.6	28.7	岗巴群	K1~K3	灰岩,碎屑岩	-/89	153.9	33	6	6	36.9	298.	1 5.2	-18	-	-	1,3,5 (3)	李建忠等,2006									
定日	28.6	87.2	-	K	灰岩	-/13	331.0	-37.0	13.0	16.5	33.0	299.0	16.6	-20.6	-	-	5 (1)	朱志文等, 1981									

注: (1) EI²-EI³-古新世中、晚期; K-白垩纪; K1-早白垩世; K2-晚白垩世; mid-K-白垩纪中期; Ter-古近纪-新近纪; *N/n*-用于统计的采点/样品数; g-地理坐标; PP-古地磁极. A95-古地磁极 95%置信圆锥半顶角。

(2) 野外检验: C-Watson (1956) 砾岩检验; D-特征剩磁方向具有双极性; F1-McElhinny (1964)褶皱检验; F2-McFadden (1990)褶皱检验; F3-Watson and Enkin (1993)去褶皱检验; F4-Tauxe and Watson (1994) 非参数褶皱检验; F5-Enkin (2003)褶皱检验; F(in)-不确定的褶皱检验; F(syn)-同褶皱检验; F(-负的褶皱检验; F(r)-广义的或区域褶皱检验; R-McFadden and McElhinny (1990) 倒转检验; R(r)-广义的或区域倒转检验。

(3) T-使用其它方法约束剩磁年代或排除了重磁化 (R-详细的岩石磁学分析; M-矿物学检查; P-特征剩磁方向分布特征)。

(4)参考文献:*-火山岩古地磁结果;**-火山岩和沉积岩古地磁结果.^-本文按照评判标准对原数据筛选并重新计算的古地磁结果。

(5) 括号内、外的年代分别为原文使用的年代和本文使用的年代,详见正文部分.?-根据原文无法确定的结果或结论。

(6) 对原文中不确定的中文地名仍使用其英文名。

(7) 绿色字体为未通过可靠性评判的古地磁数据,蓝色字体为通过评判标准的有效古地磁数据,其余为供参考的古地磁数据。