

青藏高原中北部沱沱河盆地新生代古纬度演化及其对构造和气候的指示意义

李乐意^{1,2)}, 常宏^{1,3)}, 关冲^{1,4)}

1) 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 中国科学院地球环境研究所, 西安, 710061;

2) 西安地球环境创新研究院, 西安, 710061;

3) 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安, 710061;

4) 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054



内容提要: 古纬度演化可以为地质历史时期古气候变化以及构造变形过程等提供宏观的构造位置背景。加强青藏高原中北部可可西里盆地的古纬度研究, 对于理解青藏高原中北部的构造抬升过程历史以及机制、阐明东亚季风起源和演化与高原隆升变形的耦合关系、探讨可可西里盆地晚始新世孢粉所指示的干旱气候的动力机制等具有重要的意义。笔者等选取青藏高原腹地研究相对薄弱的可可西里盆地的一个次级沱沱河盆地(TTHC剖面)作为研究对象开展了古地磁研究, 重建其在新生代的古纬度演化历史。岩石磁学研究表明TTHC剖面的主要载磁矿物是磁铁矿和赤铁矿, 但以赤铁矿为主。与同期(约35 Ma)欧亚极期望磁倾角以及研究区西边乌兰乌拉湖地区的火山岩磁倾角对比, TTHC剖面所记录的磁倾角存在明显的浅化现象, 经E/I方法校正后, 得到在约35 Ma的古地磁方向为 $Dec = 358.5^\circ$, $Inc = 44.4^\circ$, $\alpha_{95} = 5.7^\circ$ 。综合已发表的贡觉盆地、改则盆地、尼玛盆地、囊谦盆地、下拉秀盆地和乌兰乌拉湖火山岩等古纬度数据以及本文的研究结果, 得到沱沱河盆地新生代古纬度演化历史(以TTHC剖面坐标为参考点), 沱沱河盆地在约35 Ma古纬度为 $26.1^\circ N$, 处于副热带高气压气候带内, 可以解释孢粉和岩性所指示的暖干气候。在约24 Ma沱沱河盆地到达现在的纬度位置, 盆地地壳缩短在约24 Ma减小或者停止。

关键词: 青藏高原; 沱沱河盆地; 新生代; 古纬度; 气候; 地壳缩短

印度板块与亚欧板块的碰撞形成了面积超过2500000 km², 平均海拔在5000 m以上的青藏高原(Molnar and Tapponnier, 1975; Yin An and Harrison, 2000), 自南向北主要由喜马拉雅造山带、拉萨地体、羌塘地体、松潘甘孜地体以及柴达木—祁连地体组成(常承法和郑锡澜, 1973; Yin An and Harrison, 2000)(图1a)。

青藏高原的构造隆升不仅对于新生代亚洲季风的起源与演化具有明显的作用(An Zhisheng et al., 2001; Guo Zhengtang et al., 2002; Boos and Kuang Zhiming, 2010; Molnar et al., 2010; Wu Guoxiong et al., 2012; 李乐意和常宏, 2015), 而且通过风化剥蚀对全球气候的变冷具有促进作用(Raymo and

Ruddiman, 1992)。高原的隆升不仅改变了亚洲大气环流格局(Yao Tandong et al., 2013; 李乐意等, 2021a, b), 同时也是我国、南亚、东南亚等地大江大河的“水塔”(Zheng Hongbo et al., 2013), 而且青藏高原在晚中新世达到现在的高度, 使得适应寒冷的生物“走出西藏”, 于第四纪冰期时期向周边扩散(Deng Tao et al., 2011), 因此青藏高原的隆升不仅改变了大气圈, 还对水圈、生物圈等有明显的影响, 是地球系统科学研究的绝佳场所, 是“华夏山水”研究绕不开的枢纽。

正是因为青藏高原这个“触发器(trigger)”结合季风、西风、大江大河等“连接器(connectors)”将点(青藏高原)与面(东亚、东南亚、南亚)串联起来,

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42102023)、第二次青藏高原科考项目(编号:2019QZKK0707和2019QZKK0704)、中国科学院战略先导B项目(编号:XDB40010100)和黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(编号:SKLLQGPY1804, SKLLQG2030和SKLLQG2121)的成果。

收稿日期:2021-08-23; 改回日期:2022-05-08; 网络首发:2022-06-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.011

作者简介: 李乐意, 男, 1989年生, 博士, 助理研究员, 主要从事青藏高原新生代构造隆升过程和环境效应研究; Email: lily@ieecas.cn。通讯作者: 常宏, 男, 1970年生, 博士, 研究员, 主要从事新生代地层年代学和古环境研究; Email: changh@loess.llqg.ac.cn。通讯作者: 关冲, 男, 1990年生, 博士, 工程师, 主要从事古地磁及古地理演化研究; Email: gchong@mail.cgs.gov.cn。

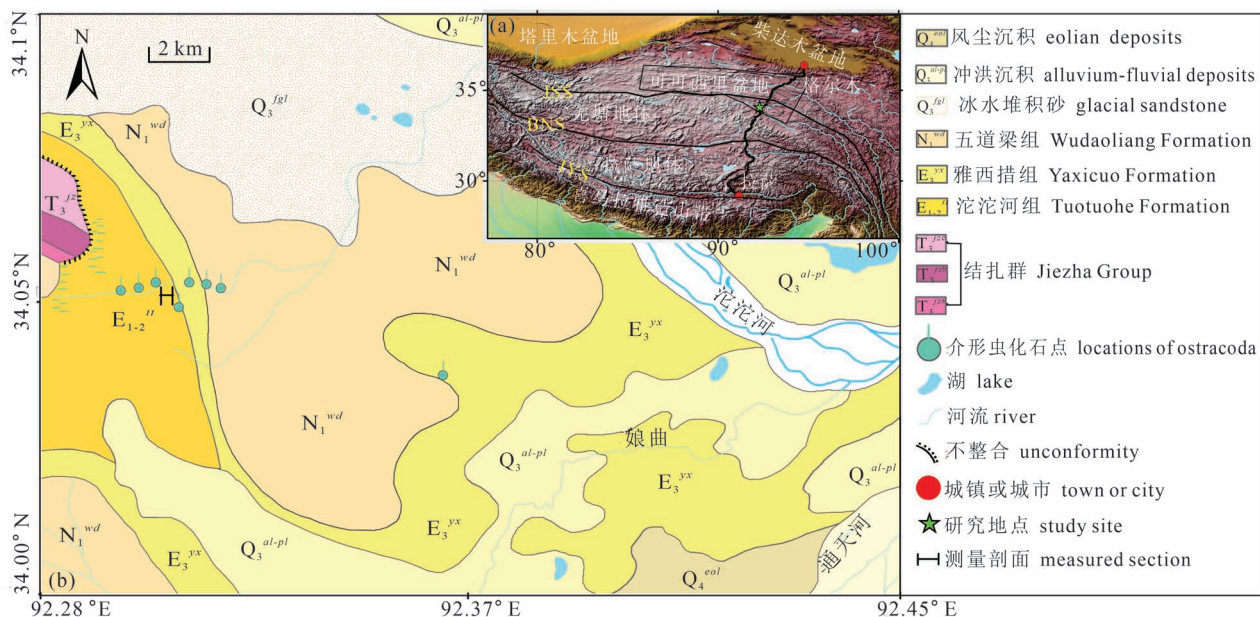


图 1 青藏高原主要块体、造山带和研究位置等分布图(a) (其中黑色的方框表示可可西里盆地的分布范围)及 TTHC 剖面所在区域地质图 (b) (据青海省地质矿产局, 1991)

Fig. 1 Main terranes, orogenic belts and research location distributed in the Xizang (Tibet) (a) (the black box represents the distribution of the Hoh Xil Basin) and regional geological map where TTHC locates (b) (from Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991)

“触发器”的构造变动通过各个“连接器”将会产生“牵一发而动全身”的效应。因此,对青藏高原在地质时期的挤压缩短,构造隆升等相关研究显的尤为重要,同时对于“点一面”的气候演化也具有重要的意义。

在讨论青藏高原在地质时期的气候效应、古高度等科学问题时,一个宏观的古地理格局背景即研究区在研究的时段内处于什么位置(古纬度)需要加以考虑,古纬度位置最近几年逐渐被重视(Zhang Ran et al., 2018; Fang Xiaomin et al., 2021; Xie Gan et al., 2021; 颜茂都等, 2021)。同时,古纬度的研究对于青藏高原南北向的地壳缩短历史等具有很好的指示作用(任海东等, 2013; Meng Jun et al., 2017)。沉积物的磁倾角是古纬度良好的记录者。目前,对于青藏高原古纬度的研究主要集中于印度板块与欧亚板块碰撞的时间(Dupont-Nivet et al., 2010; 黄宝春等, 2010; Yi Zhiyu et al., 2011; Huang Wentao et al., 2015; 孙知明等, 2019; 张大文和颜茂都, 2019; van Hinsbergen et al., 2019)以及新生代之前的地质时期(Cheng Xin et al., 2011; 任海东等, 2013; 颜茂都和张大文, 2014; Yan Maodu et al., 2016; Tong Yabo et al., 2017; 曹勇等, 2020, 2021),

虽然对新生代以来青藏高原各块体的古纬度演化研究也有不少记录,但相对新生代之前的研究仍显薄弱,尤其是高原的腹部地区,如在羌塘地体,新生代以来的古纬度研究只主要集中在可可西里盆地、贡觉盆地和囊谦盆地等(Lin Jinlu and Watts, 1988; Halim et al., 1998; Ran Bo et al., 2016; Tong Yabo et al., 2017; Zhang Weilin et al., 2020),因此强化高原腹地的新生代古纬度研究具有必要性。在青藏高原新生代的盆地中,沉积物记录的磁倾角发生了明显的磁倾角浅化(颜茂都等, 2012),但需要注意的是,高原腹地已有的新生代古纬度研究较少进行磁倾角的浅化校正(如 Lin Jinlu and Watts, 1988; Ran Bo et al., 2016),导致得到的古纬度位置偏低。

青藏高原腹部研究薄弱的可可西里盆地的次级盆地即沱沱河盆地,位于羌塘地体的东北部,保存有晚白垩到新生代中期、较连续的沉积地层,记录了印度板块与欧亚板块碰撞开始到早中新世盆地的构造变形历史(Staisch et al., 2014)。开展沱沱河盆地的古纬度研究,对于理解青藏高原中北部的构造抬升过程历史以及机制、阐明东亚季风起源和演化与高原隆升变形的耦合关系(An Zhisheng et al., 2001)、探讨可可西里盆地晚始新世孢粉所指示的

干旱气候 (Miao Yunfa et al. , 2016) 的动力机制等具有重要的意义。在本次的古纬度研究基础之上, 笔者等同时综合已发表的羌塘地体及边界的相关古地磁数据重建沱沱河盆地新生代的古纬度演化历史, 讨论古纬度研究对于解释气候成因、地壳缩短构造变形等方面的指示意义。

1 区域概况与样品采集

沱沱河盆地位于羌塘地体的东北缘, 唐古拉山逆冲断裂带的北侧, 是唐古拉逆冲断裂的前陆盆地 (李亚林等, 2006; Li Yalin et al. , 2012)。研究区域位于唐古拉山镇的东南缘, 平均海拔约 4500 m, 坐标为 34. 1° N, 92. 3° E。研究剖面的新生代地层从下而上分别为沱沱河组, 雅西措组, 五道梁组以及第四纪沉积物 (图 1b), 其中沱沱河组主要由砖红色砾岩、含砾砂岩和砂岩组成; 雅西措组主要由紫红色砂岩、泥岩和页岩交替组成, 夹杂灰色成层和结核状的石膏, 主要由河流和湖泊环境组成, 并以湖泊环境为主; 五道梁组主要由湖泊碳酸盐和局部地区一些黑色油页岩组成 (Liu Zhifei et al. , 2003; 刘志飞等, 2005; Li Yalin et al. , 2012; Staisch et al. , 2014; Jin Chunsheng et al. , 2018)。在沱沱河组之下, 地层是风火山群, 是一套河湖相紫红色碎屑岩夹泥灰岩、石膏沉积, 主要分布于唐古拉山向北延伸到昆仑山的可可西里盆地, 不整合于结扎群、巴颜喀拉山群和雁石坪群之上 (Liu Zhifei et al. , 2003; Jin Chunsheng et al. , 2018)。

在本次研究中, 笔者等主要集中在沱沱河组, 剖面命名为 TTHC, 实测剖面约 180 m, 岩性主要为一套砖红色、紫红色、黄褐色复成分砾岩, 含砾砂岩、砂岩、粉砂岩, 局部夹有泥岩和灰岩, 以山麓冲积相、洪积相为主, 兼有少量河湖相沉积。TTHC 剖面为单斜地层, 倾向东北偏东, 剖面的底部有一小的褶皱 (图 2), 应该是在地层形成之后产生。野外 0~136 m 采样间距为 1 m, 其中底部褶皱处采样位于岩层褶皱上部, 避开褶皱变形的影响, 136~180 m 因为覆盖严重, 采样间距为 2~4 m。为了获得新鲜的岩石样品, 我们把表面的风化部分刨去, 用罗盘测量其走向和倾角, 野外共采集样品 146 个。手采样品在实验室被加工成 2 cm×2 cm×2 cm 方块, 用来进行退磁实验。

关于可可西里盆地风火山群、沱沱河组、雅西措组和五道梁组的地层时代以及风火山群与雅西措组和沱沱河组等之间的地层接触关系, 基于目前已经

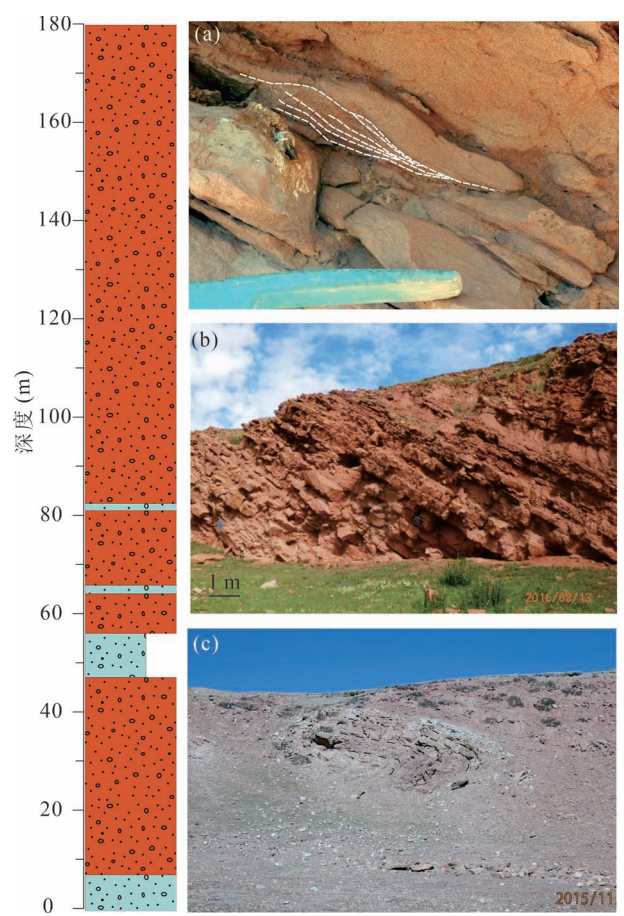


图 2 TTHC 剖面岩性变化以及部分野外照片 [(c) 图表示剖面底部的小褶皱; (a) 图为交错层理]
Fig. 2 Lithological change and some photos of the TTHC Section [the fig. (c) represents a small fold, which locates at the bottom of the section; the fig. (a) indicates the cross layers of the section]

发表的研究结果来看还存有一定的争议 (Liu Zhifei et al. , 2003; 安勇胜等, 2004; 伊海生等, 2004; 刘志飞等, 2005; Staisch et al. , 2014; Jin Chunsheng et al. , 2018; 李乐意, 2019), 在这篇文章里不详细赘述。但是目前相对确定的是风火山群的地层年龄。通过在风火山群上部地层发现的火山灰以及综合前人的生物地层、磁性地层年龄等, 风火山群的沉积年龄被限定在 85~51 Ma (Staisch et al. , 2014)。最近, 通过可可西里最新的高精度磁性地层学研究以及在地层中发现的火山灰的绝对定年结果, 风火山群沉积的年龄被确定为约 72~51 Ma (Jin Chunsheng et al. , 2018)。目前相对可以确定的认为风火山群的顶部年龄至少应该在 51 Ma。同时, 通过我们近几年在沱沱河地区所开展的工作, 雅西措组的地质时代是渐新世, 五道梁组为早中新世 (Lin Jie et al. ,

2020;李乐意,2019;下文阐述),与前人在周边地区的研究结果基本一致(如 Wang Chengshan et al., 2008),所以目前来看,将风火山群与沱沱河组作为两套独立的地层单元相对比较合理,即可西里盆地新生代地层从老到新分别是:风火山群、沱沱河组、雅西措组和五道梁组。

2 实验方法

所有样品通过 ASC Scientific TD-48 型热退磁仪对样品进行系统的退磁,退磁的温度以 10~50℃ 为间隔一直加热到 690℃,然后使用 2G-755R 型超导磁力仪进行剩磁的测量,所有的测量工作都在磁屏蔽室(<300 nT)进行。部分选取样品的等温剩磁获得曲线采用 ASC IM-10-30 脉冲磁力仪加场,最大脉冲磁场为 2500 mT。用 AGICO 公司生产的 JR-6A 双速自动旋转磁力仪在零磁空间进行剩磁的测量,采用两个方向模式。磁化率随温度变化曲线采用 AGICO 公司生产的 MFK1-FA 多频各向异性磁化率仪完成,仪器的灵敏度为 10^{-7} SI,采用配套的 CS3/CS3-L 温度控制系统,精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$,加热区间为 40~700℃,加热速率为 $11^\circ/\text{min}$,频率为 976 Hz,磁场强度为 200 A/m。磁滞回线在 VSM 3900 梯度磁力仪上完成,样品测量所加最大场为 1.5 T 和 2 T,测量间隔为 5 mT。以上实验在中科院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成。

3 结果

3.1 地层年代确定

TTHC 剖面属于我们已开展的沱沱河剖面的最下面部分。已开展的沱沱河剖面长度为 1176 m,野外我们用任意面手采法采样,用罗盘测量样品的方向,后在实验室开展热退磁实验。所建立的古地磁极性柱由 29 个正极性带和 29 个负极性带组成(Li et al., under review;李乐意,2019)。另外,我们在沱沱河剖面开展了生物地层年代学,如介形虫、孢粉、轮藻和腹足类等,碎屑锆石年代学和附近火山岩绝对年龄等研究,限定了地层年代学框架。在以上地层年代学框架基础上,将沱沱河剖面的古地磁结果与标准极性柱(GTS 2012)进行了匹配(Gradstein et al., 2012),最终限定沱沱河组的年龄为约 37.0~32.7 Ma,雅西措组的年龄约为 32.7~23.6 Ma,五道梁组的年龄是 23.6~19.7 Ma(Li Leyi et al., under review;李乐意,2019)。本文 TTHC 剖面中用来重建古纬度段的沱沱河组年龄约为 37.0~34.3

Ma。

3.2 载磁矿物鉴别

样品中载磁矿物的确定是确定退磁方法,磁倾角浅化等古地磁学研究的基础。为了确定 TTHC 剖面的主要磁性矿物,笔者等采用磁化率随温度变化曲线($k-T$),等温剩磁获得曲线(IRM)以及磁滞回线(Hys)等方法共同确定剖面的主要载磁矿物。

各种磁性矿物的居里或尼尔温度点提供了一种简单快捷的方法来确定岩石中的磁性矿物(McElhinny and McFadden, 1999),磁性矿物在其居里温度或尼尔温度点附近,磁化率会显著的下降(Butler, 1992)。在 TTHC 剖面代表性样品 C0 和 C132 中,样品的磁化率在 580℃ 附近急剧下降,说明磁铁矿是主要载磁矿物。但是 C0 样品在 700℃ 左右磁化率才降低到接近零,而 C132 样品的磁化率在 700℃ 左右始终也没有降低到零,说明这两个样品中不仅磁铁矿是载磁矿物之一,还有更高矫顽力的磁性矿物存在,如赤铁矿等,而这也与野外地层的颜色显示为红色相符合(刘秀铭等, 2014)。

等温剩磁获得曲线显示在磁场为 300 mT 的时候,其强度只达到饱和值约 30%~40%,直到磁场加到 1.5 T 时其磁化强度才逐渐接近饱和,说明了高矫顽力磁性矿物的存在,如赤铁矿等,这与磁化率随温度变化曲线一致。

样品中磁性矿物颗粒在不同的外加磁场下,其磁学性质也会发生相应的变化。磁滞回线是一种方便快捷的手段来表示这种变化。原则上,通过等温剩磁获得曲线得到的信息在磁滞回线中也有反应(Tauxe et al., 2010)。图 3 显示两个样品的磁滞回线特征为“蜂腰型”(wasp-waisted),在磁场加到 300 mT 之前,两个样品的磁化强度迅速增加到饱和磁化强度的约 40%,但是直到磁场加到约 1.5 T 才闭合,这种特征可能是因为不同矫顽力的磁性矿物混合所导致,如磁铁矿和赤铁矿(Roberts et al., 1995)。

为了定量分析样品中主要载磁矿物磁铁矿和赤铁矿的贡献,运用累计对数高斯模型来对样品进行磁组份的分离(Kruiver et al., 2001),选取的是两种组份分离。如表 1 和图 3 所示,在 C0 和 C132 两个样品中,软磁性矿物的矫顽力都小于 300 mT,所占的比例小于 41%,而矫顽力大于 450 mT 的硬磁性矿物对全岩等温剩磁的贡献度大于 59%。结合磁化率随温度变化曲线,等温剩磁获得曲线以及磁滞回线,TTHC 剖面样品中的载磁矿物为磁铁矿和赤铁矿,但是赤铁矿为主要的磁性矿物。

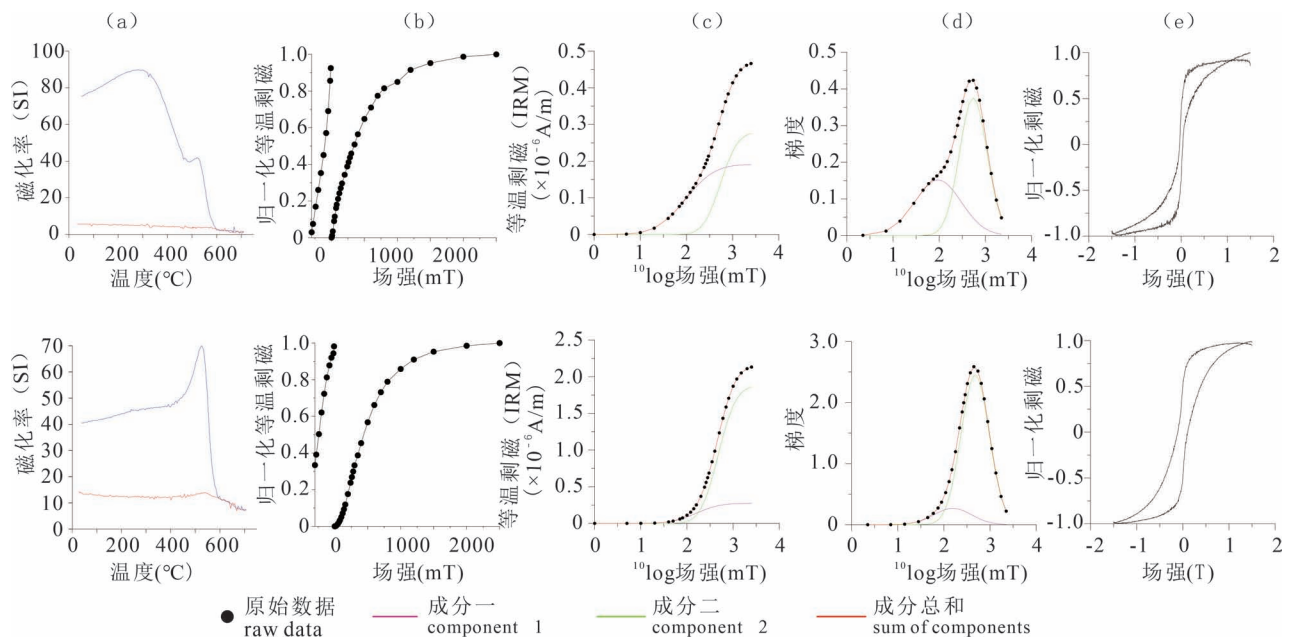


图 3 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面代表性样品的磁化率随温度变化曲线、等温剩磁获得曲线、等温剩磁分解以及磁滞回线
Fig. 3 Magnetic susceptibility dependent on temperature curves, isothermal remnant magnetization and de-component curves as well as hysteresis of selected samples from TTHC Section, Tuotuohe Basin

表 1 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面部分样品
梯度获得曲线(GAP)结果

Table1 Gap results of the selected samples from the
TTHC Section, Tuotuohe Basin

样品号	磁组分	B _{1/2} (mT)	M _{ri} (%)	DP
C0	组分 1	94.4	41	0.5
	组分 2	547.5	59	0.3
C132	组分 1	156.4	13	0.4
	组分 2	476.3	87	0.31

注: B_{1/2}, 获得饱和等温剩磁值一半的时候所加的磁场; M_{ri}, 每个矫顽力对全岩等温剩磁的贡献度; DP, 矫顽力的离散程度
B_{1/2}: the applied field at which mineral phase acquires half of its saturation IRM; M_{ri}: an indication of the component SIRM and therefore its contribution to the bulk IRM curve; DP: the dispersion parameter, expressing the coercivity distribution of a mineral phase

3.3 古地磁结果

所有样品经过热退磁以后,对古地磁数据采用主成分分析法(principal component analysis)来确定样品的特征剩磁方向(Kirschvink, 1980),选取至少连续 4 个退磁步骤及最大角偏差(maximum angular deviation)≤15°的点用来进行拟合特征剩磁的方向(图 4)。所有样品的特征剩磁方向用 Fisher(1953)统计方法进行计算。从图 4 中可以看出,样品退磁温度加热到 500℃左右时,低温次生组分基本已清洗干净,从 500℃左右开始以后,退磁曲线基本开始

稳定走向原点,代表样品特征剩磁方向。在本次研究中,为了排除可能存在的极性转换数据,我们选取 VGP≥45°的数据用来进行统计计算和古纬度的求取,最后共有 74 个古地磁数据满足要求。

运用 Fisher 统计方法(Kirschvink, 1980),对 VGP≥45°的磁性地层样品数据进行地层的校正,地层校正前的特征剩磁方向为:Dec = 338.3°, Inc = 36°, a95 = 6°, k = 9,地层校正后的特征剩磁平均方向为 Dec = 358.5°, Inc = 28°, a95 = 5.7°, k = 9(图 5a,b)。同时期基于欧亚极预期(35 Ma)的平均方向为 Dec = 10.6°, Inc = 54.5°, a95 = 3.9°(图 5b)(Besse and Courtillot, 2002)。

为了确定获得的特征剩磁是否为原生剩磁,笔者等对样品进行了倒转检验(Tauxe et al., 2010)。倒换方向被转换至其对趾方向,两组数据各分量的 95%置信区间相互重叠,正、负极性在 95%置信水平上无法区分(图 5c),因此,通过了倒转检验(Tauxe et al., 2010),表明样品热退磁剔除了次生剩磁,获得了原生剩磁。

在用特征剩磁平均值方向计算古纬度之前,对磁倾角浅化问题需要进行校正,因为倾角的浅化会导致古纬度结果存在大的偏差。许多研究表明沉积岩所记录的磁倾角存在浅化现象,尤其是在中亚地区(Gilder et al., 2001; Dupont-Nivet et al., 2002;

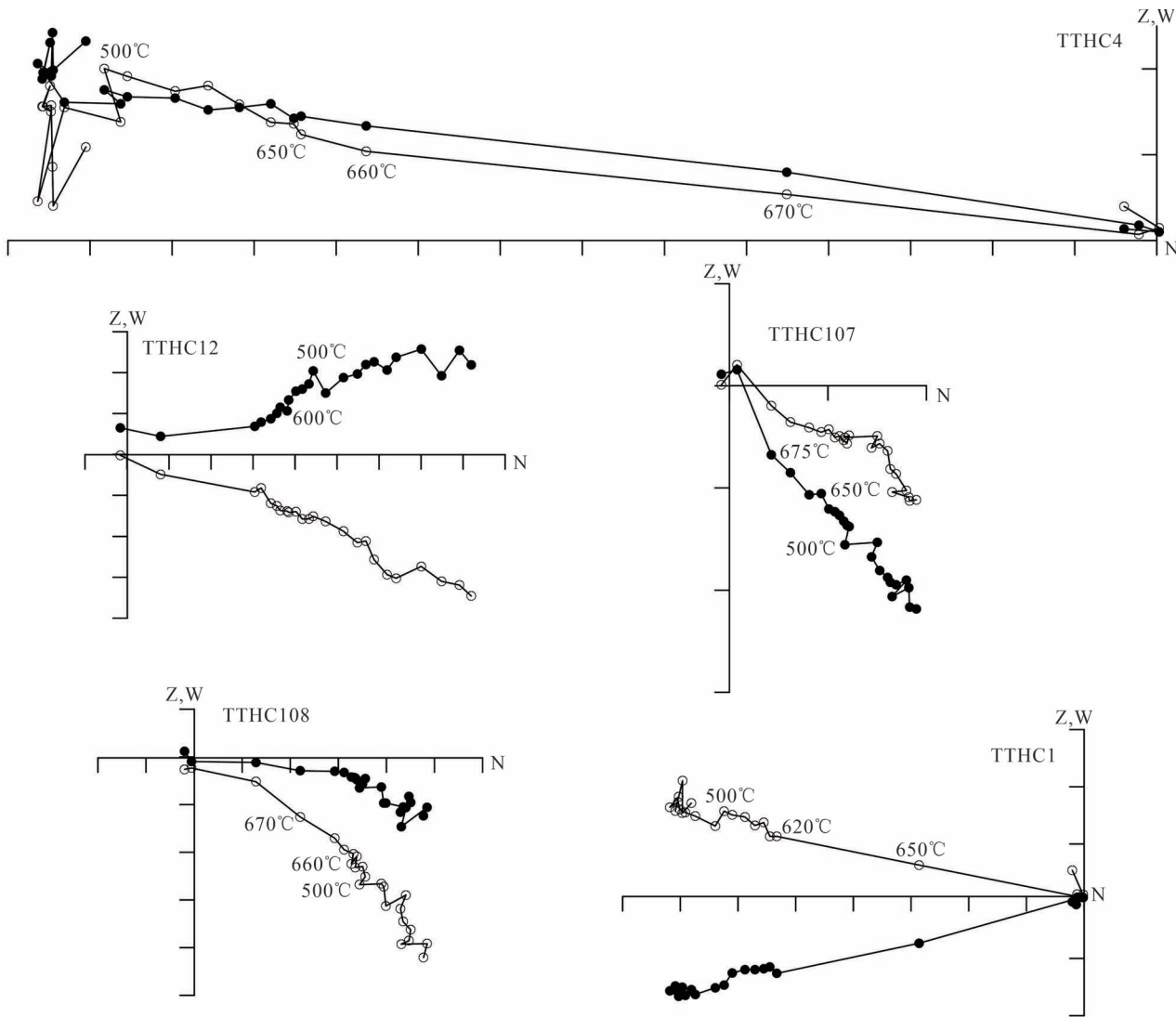


图 4 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面沱沱河组部分样品退磁曲线(其中空心圆代表垂直方向投影,实心为水平方向投影)
Fig. 4 Demagnetization curves of some selected samples(Open circle represents vertical projection while solid circle represents horizontal projection) from the TTHC Section, Tuotuohe Basin

Tan Xiaodong et al. , 2003; Yan Maodu et al. , 2005; Kodama, 2012; 颜茂都等,2012; Meng Jun et al. , 2017)。沉积岩磁倾角浅化的主要原因一般有:

沉积时的倾角浅化:一般发生在获得沉积碎屑剩磁的过程中,尤其是颗粒较粗的沉积物容易发生倾角浅化;压实作用:沉积岩的倾角浅化也可以是因为压实作用,尤其是对于细颗粒沉积物;变形作用:沉积岩的褶皱变形包含应力作用,在应力的作用下磁性颗粒有可能会重新排列,从而导致倾角浅化;胶结作用:沉积岩沉积后迅速的被胶结有可能阻止后期因为压实等作用导致的磁倾角浅化 (Butler, 1992)。关于磁倾角浅化的原因还有很多其它的解释,目前仍然在争议中 (Kodama, 2012),有一点肯

定的是在运用沉积岩的古地磁数据进行古纬度重建时,磁倾角的浅化需要被考虑进去。

目前对于磁倾角浅化校正有岩石磁学和 E/I (Elongation—Inclination) 等方法 (Tauxe and Kent, 2004;Kodama, 2012)。近几年 E/I 校正方法在青藏高原被普遍的应用 (Yan Maodu et al. , 2005; Tan Xiaodong et al. , 2010; 颜茂都等, 2012;Meng Jun et al. , 2017)。在我们的剖面中,地层校正后实测的磁倾角为 28°,而同时期相对于欧亚极期望的倾角为 54.5°,实测的倾角发生了明显的浅化现象,本文笔者等采用 E/I 方法对磁倾角进行浅化校正。

如图 6 所示,图中的绿线与按统计法模型 f 等于 0.5 时所预测的磁倾角为 44.4°, 95% 置信区间

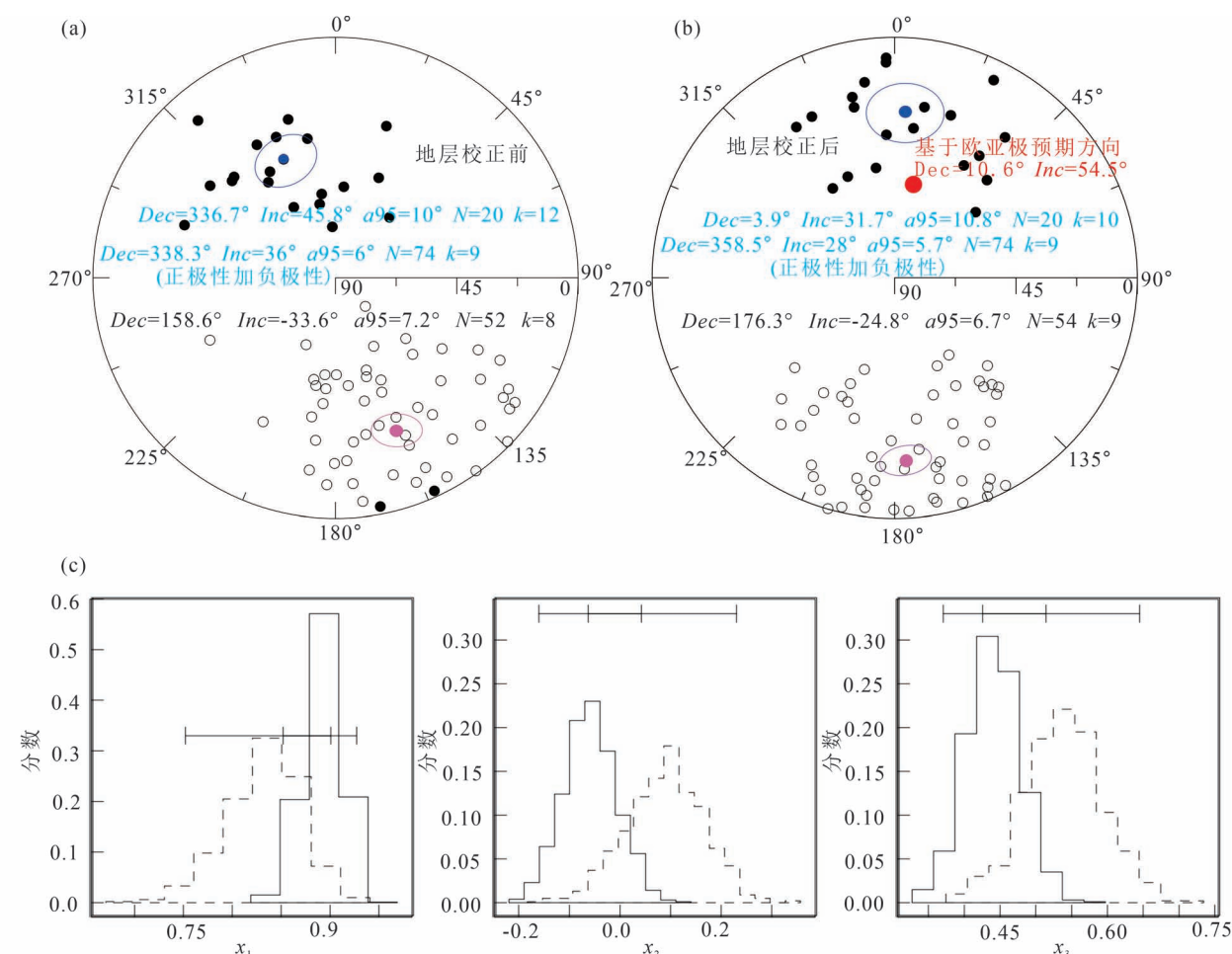


图5 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面地层校正前特征剩磁等面积投影及 95%置信水平上的 Fisher 平均方向(a)、地层校正后特征剩磁等面积投影及 95%置信水平上的 Fisher 平均方向(b) (红色的表示同时期, 35 Ma, 的期望方向)以及倒转检验结果(c)

Fig. 5 (a) Equal area projection of the characteristic remnant magnetization of the TTHC, Tuotuohe Basin, before tilt correction. (b) Equal area projection of the characteristic remnant magnetization of the TTHC, Tuotuohe Basin, after tilt correction. Red represents the expected direction at ~35 Ma. (c) Reversal test of the TTHC, Tuotuohe Basin

为 $35.4^\circ\sim51.8^\circ$ 。校正后的磁倾角与附近大致同时期 (38.6 ± 0.5 Ma) 的乌兰乌拉湖 (34.5°N , 90.2°E) 地区的火山岩磁倾角 ($46.1^\circ\pm7.6^\circ$) 结果基本一致, 因为火山岩不受沉积浅化等因素的影响, 所以火山岩的磁倾角数据是比较可靠的 (Lippert et al., 2011)。通过与附近同时期火山岩的磁倾角数据对比说明用 E/I 方法成功校正了 TTHC 剖面的沉积浅化现象。

对 TTHC 剖面所有的数据进行倒转检验以及磁倾角浅化校正后, 我们可以用校正后的结果来计算约 35 Ma 的古纬度, 以剖面坐标 (34.1°N , 92.3°E) 为参考点, 计算出古地磁极为 81.9°N , 281.9°E , $dp/dm=7.2/4.5$, 古纬度为 26.1°N 。乌兰乌拉湖地

区, 在约 38.6 Ma 的火山岩数据得到的古纬度为 27.5° , 转换到 TTHC 剖面的参考点, 其结果为 26.9°N , 与剖面沉积岩浅化校正后得到的古纬度数据基本一致。

4 讨论

4.1 古地理位置(古纬度)对沱沱河盆地晚始新世气候成因解释的意义

现在赤道的年平均温度约 25°C , 两极地区约为 -25°C 。虽然在地质历史时期赤道到两极地区温度的变化范围可能会不一样, 但是最基本的原理和事实是一致的, 那就是赤道地区一年的太阳辐射量最大, 两极地区最少, 因此温度的变化遵循同样的趋

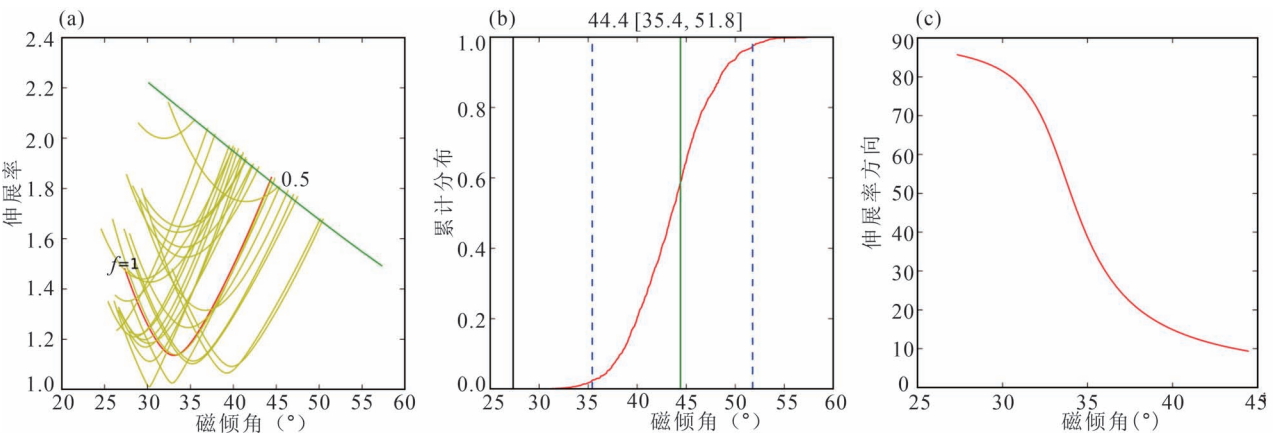


图6 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面磁倾角 E/I 校正。(a) 伸展率和倾角随浅化因子 f 的变化关系,绿线与浅化因子 f 的交点对应的是校正后的倾角。(b) 倾角校正的累积分布图,平均校正的倾角以及 95%置信度范围。(c) 伸展率方向与倾角的关系

Fig. 6 Inclination correct based on E/I method of the TTHC Section, Tuotuohe Basin. (a) E/I trajectories (yellow lines) plotted as a function of inclination flattening factor f . The intersection point on the model E/I curve represents the corrected inclination. (b) Histogram of boot-strapped data sets, the mean corrected inclination, and the 95% confidence limits. (c) Relationship between elongation and inclination

势。热带气候环境作用下的沉积物在赤道地区分布最多,向两极地区逐渐减少甚至消失,如珊瑚,碳酸盐,蒸发岩等,而另外一些气候敏感性指标则在两极或者高中纬度地区分布较多,赤道很少或者没有,如冰川,落叶林等。古气候学家在过去几十年已经证明这些气候敏感性指标的分布与现在的气候区分布是基本一致的,大致与纬线平行 (Habicht, 1979; Parrish et al., 1982)。因此,计算出来的古纬度与古气候敏感性指标两者之间可以相互印证和解释,如计算出某一地块在某一地质历史时期的古纬度为 80°N,但是古气候敏感性指标出现的是珊瑚等分布于热带的沉积物,那么此时求取的古纬度应该是值得怀疑的。

在 TTHC 剖面中,在底部发现了孢粉,其主要种属为 *xerophytic Ephedripites*, *Nitrariadites* (*Nitrariapollis*) and *Chenopodipolli* 以及少量的针叶林,与柴达木盆地、西宁盆地、吐哈盆地、酒泉盆地以及河套盆地同时期的孢粉种类相似,指示当时的气候干旱 (Miao et al., 2016),结合红色的岩性地层,说明在晚始新世 (约 37 Ma) 气候相对炎热干旱。孢粉的结果间接证明了我们计算的 TTHC 剖面晚始新世古纬度 (26.1°N) 是合理的,同时,因为 TTHC 剖面在晚始新世处于副热带高压带范围内,可以很合理的解释孢粉和岩性结果显示的炎热干旱气候。

4.2 对沱沱河地区地壳缩短历史的指示意义

为了重建沱沱河地区新生代古纬度,我们根据

Van der Voo (1990) 提出的等权评判标准来评判已发表古地磁数据的可靠性。该方法用 quality factor (Q) 值来判断数据的质量,其 7 条评判标准为: 采样地层的年代有较好的控制; 有足够样品的数量以有效地平均掉样品的定向误差和地球磁场长期变化的影响。一般而言: 一个可靠的古地磁极要求独立样品数 ≥ 24 , 精度参数 $k \geq 10$, 95% 置信区间 ≤ 16 ; 特征剩磁分量是经过有效退磁之后获得的; 特征剩磁有相关的野外检验; 处于构造稳定区; 通过倒转检验或存在双极性; 显著区别于现今地磁极的位置。在以上判别标准中,古地磁极每通过一条判断依据,得到一个点数,最后所有点数的和为该古地磁极的质量因子 (Q 值), 其变化范围为 0~7。一般而言,要求古地磁极的质量因子 Q 值 ≥ 4 。最近, Meert 等 (2020) 根据最新的古地磁研究进展对 Van der Voo (1990) 提出的等权评判标准进行了适当的修改,提出了新的可靠性判别标准,即 Reliability (R) 指标。新的 R 指标和之前的 Q 指标相比没有大的差别,但增加了几个新的判断标准,如载磁矿物的评价、碎屑沉积岩的磁倾角校正等。本文将会综合这两个评判标准,在选取评判古地磁数据时所依据的标准为: Van der Voo (1990) 的 7 条标准同时加上: 沉积岩磁倾角浅化校正; 载磁矿物的确定。

目前在羌塘地块内部或者边缘取得了部分新生代的古地磁数据,笔者等收集了 20 条古地磁记录 (表 2)。在羌塘乌兰乌拉湖地区, Lippert 等 (2011)

表 2 新生代羌塘地块内部或边缘地区已发表的古地磁数据及本文结果

Table 2 Published Cenozoic paleomagnetic data distributed in the inner and marginal Qiangtang terrane and this study

地名 (编号)	坐 标	年 代 (Ma)	地层校正后平均 剩磁方向(°)				古地磁极位置 (°)				转换到 TTHC 剖面坐 标下的剩磁方向(°)			古纬度 (°)	N/n	野外 检验	数据质量 评价(Q+R)	参考文献
			Dec	Inc	k	a95	Lat	Lon	dp	dm	Dec	Inc	a95					
贡觉盆地(1)	30.9°N;98.3°E	61~55.4	53	43.6	-	3.9	43.4	181.2	4.9	3	52.3	40.8	4	23.4	-/104	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Li Shihu et al. , 2020
贡觉盆地(2)	31°N;98.2°E	56~43.2	35.5	41.6	45.9	3.2	57.9	192.1	3.9	2.4	34.8	41.1	3.3	23.6°N	43/-	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Tong Yabo et al. , 2017
贡觉盆地(3)	30.9°N;98.3°E	55.4~53.2	50	46.09	-	4.6	46.6	179.7	5.9	3.8	49.6	43.9	4.8	25.7	-/68	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Li Shihu et al. , 2020
下拉秀盆地(4)	32.6°N;96.6°E	51~49	11.9	41.6	-	8	76.4	223.2	9.8	6	11.3	42.6	7.8	24.6	21/-	-	1,2,3,5(4)	Roperch et al. , 2017
贡觉盆地(5)	30.9°N;98.3°E	47.1~45.3	34	48.93	-	2.7	60.8	181.5	3.6	2.4	34.2	48.7	2.7	29.7	-/162	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Li Shihu et al. , 2020
贡觉盆地(6)	30.9°N;98.3°E	45.3~41.5	30	47.28	-	2.7	63.9	186	3.5	2.3	30	47.6	2.7	28.7	-/196	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Li Shihu et al. , 2020
囊谦盆地(7)	32.1°N;96.5°E	45~40	16.8	40.8	407	4.6	72.8	212.8	5.6	3.4	16.2	42.1	4.8	24.3	95/-	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Zhang Weilin et al. , 2020
乌兰乌拉湖(8)	34.5°N;90.2°E	38.6±0.5	355.8	46.1	141.2	7.8	82.1	298.4	10	6.4	356.1	45.5	7.9	26.9°N	4/-	-	1,2,3,7,9(5)	Lippert et al. , 2011
TTHC 剖面(9)	34.1°N;92.3°E	37~34.3	358.5	44.4	9	5.7	84.9	293.6	7.2	4.5	358.5	44.4	5.7	26.1°N	-/74	R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	本次研究
改则盆地(10)	32.2°N;84.3°E	30~28.5	340.3	44.2	54.9	3.3	71.7	340.3	4.1	2.6	341.1	44	3.3	25.8°N	35/-	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	丁继凯, 2014
尼玛盆地(11)	31.78°N;87.17°E	25.1~22.3	13	53.1	13.3	2.7	78.9	164.1	3.7	2.6	13.2	56.3	2.2	36.9	-/223	F,R	1,2,3,4,6,7,8,9(8)	Meng Jun et al. , 2017
风火山—二道沟 盆地(12)	34.4°N;92.5°E	古新世— 早始新世	25.5	34.6	32.7	6	62.6	210.5	3.9	6.8	25.3	33.8	7	18.5	7/-	F,R	2,3,4,6,7,9(6)	Halim et al. , 1998
风火山—二道沟 盆地(13)	34.4°N;92.5°E	古新世— 早始新世	215	34	79	4.9	55	201	3.2	5.6	34.8	32.8	5.7	17.9	12/-	-	2,3,4,6,7,9(6)	Lin and Watts, 1988
通天河盆地(14)	33.9°N;92.6°E	32~24	354.9	29.3	33	13.5	71.2	288	14.9	8.2	354.8	29.7	13.5	15.9	5/-	R	2,3,4,6,7,9(6)	Ran et al. , 2016
通天河盆地(15)	33.9°N;92.6°E	24~15	3.6	36.4	161	9.7	76	258.5	11.3	6.6	3.5	36.7	9.6	20.5	3/-	R	2,3,4,6,7,9(6)	Ran et al. , 2016
西可可西里 盆地(16)	35.1°N;88.1°E	50~40	4	44.3	10.7	16.5	80.3	246.3	20.1	13	4.7	43.4	16.7	25.3	-/9	F	2,3,4,6,7,9(6)	Dai et al. , 2012
二道沟— 桑恰山(17)	34.6°N;92.9°E	51~31	9.9	39.5	61.8	17.8	75	234.9	21.3	12.8	9.7	38.6	18	21.8	-/176	F,R	2,3,4,6,7,9(6)	Liu et al. , 2003
五道梁盆地(18)	34.98°N;93°E	31~30	37.2	40.8	54.1	10.5	55.7	192.7	12.7	7.7	36.8	39.3	10.7	22.3	-/59	F,R	2,3,4,6,7,9(6)	Liu et al. , 2003
可可西里盆地(19)	36.05°N;89.27°E	中新世	20.7	47	30.2	10.2	71	196.3	13.2	8.5	20.9	46.4	10.6	27.7	8/-	F	2,3,4,7,9(5)	Chen et al. , 2002
乌兰乌拉湖(20)	34.3°N;91°E	52~42	11	41.4	24	5.3	75.6	226.3	3.9	6.5	11.3	41.1	5.3	23.6	32/-	F	2,3,4,6,7,9(6)	伊海生等, 2004

注: Dec, Inc, k 和 a95 表示地层校正后磁偏角、磁倾角、精度系数和 Fisher 统计 95% 置信度。Lon 和 Lat 表示古地磁极纬度和经度。dp 和 dm 为置信椭圆的半短轴和半长轴。N/n 表示采点数/样品数。F, R 分别表示褶皱检验和倒转检验。

Dec, Inc, k 和 a95 表示地层校正后磁偏角、磁倾角、精度系数和 Fisher 统计 95% 置信度。Lon 和 Lat 表示古地磁极纬度和经度。dp 和 dm 为置信椭圆的半短轴和半长轴。N/n 表示采点数/样品数。F, R 分别表示褶皱检验和倒转检验。

采集了能够平均掉古地磁场长期变化火山岩古地磁样品,对典型样品进行了岩石磁学分析,确定钛磁铁矿为主要的载磁矿物;进行了系统的热退磁实验,退磁曲线较好;火山岩的绝对年龄为 38.6 ± 0.5 Ma。根据上述的古地磁评判标准, $Q+R$ 值为 5。以剖面坐标 (34.5°N , 90.2°E) 为参考点,计算出的古地磁极为 82.1°N , 298.4°E , $a95 = 7.8^\circ$, 古纬度为 27.5°N , 转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 356.1^\circ$, $Inc = 45.5^\circ$, $a95 = 7.9^\circ$, 古纬度为 26.9°N 。

在改则县城东约 30 km 的改则盆地,丁继凯等 (2014) 在康托组采集了磁性地层样品 (32.2°N , 84.3°E), 有效古地磁样品 (690 块) 足以平均掉古地磁场长期变化;对典型样品进行了岩石磁学实验,确定磁铁矿和赤铁矿为主要的载磁矿物;进行了系统的热退磁实验,退磁曲线较好;用 E/I 方法进行了磁倾角浅化校正;特征剩磁通过了褶皱检验;根据凝灰岩的绝对年龄,将磁性地层年龄定为 $30 \sim 28.5$ Ma。根据上述的古地磁评判标准, $Q+R$ 值为 8。以剖面坐标 (32.2°N , 84.3°E) 为参考点,计算出的古地磁极为 71.7°N , 340.3°E , $a95 = 3.3^\circ$, 古纬度为 25.9°N , 转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 341.1^\circ$, $Inc = 44^\circ$, $a95 = 3.3^\circ$, 古纬度为 25.8°N 。

在尼玛盆地 (31.78°N , 87.17°E), Meng Jun 等 (2017) 在丁青湖组晚渐新世到早中新世的红层中进行了古地磁采样,在尼玛向斜的南翼丁青湖组的上部,采集了 352 个样品用于磁性地层研究,在向斜的两翼采集了 36 个样品用于褶皱检验,样品经过系统的热退磁且对特征剩磁进行了褶皱检验和倒转检验;在凝灰岩绝对定年的基础上,确定磁性地层的年代为 $25.1 \sim 22.3$ Ma, 样品平均掉古地磁场的长期变化;用 E/I 方法进行了磁倾角浅化校正。 $Q+R$ 值为 8。以剖面坐标 (31.78°N , 87.17°E) 为参考点,计算出的古地磁极为 78.9°N , 164.1°E , $dp = 3.7^\circ$, $dm = 2.6^\circ$, 古纬度为 $33.7^\circ (-6.8^\circ/+5.2^\circ) \text{N}$ 。转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 13.2^\circ$, $Inc = 56.3^\circ$, $a95 = 2.2^\circ$, 古纬度为 36.9°N 。

在羌塘地体东部贡觉盆地始新世的贡觉组和然木沟组, Tong Yabo 等 (2017) 在褶皱的两翼采集了 584 块样品, 53 个采点, 岩石磁学研究表明红层的主要载磁矿物是赤铁矿和磁铁矿;所有样品都经过逐步的系统热退磁;通过了倒转检验和褶皱检验;基于火山岩的年龄,确定地层的年龄在 $56.0 \sim 43.2$ Ma;对古地磁样品进行了磁倾角浅化校正。 $Q+R$ 值为 8。以剖面坐标 (31°N , 98.2°E) 为参考点,计算出的

古地磁极为 57.9°N , 192.1°E , $a95 = 2.9^\circ$, 古纬度为 $23.9^\circ \pm 2.9^\circ \text{N}$ 。转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 34.8^\circ$, $Inc = 41.1^\circ$, $a95 = 3.3^\circ$, 古纬度为 23.6°N 。

同样在贡觉盆地 (30.9°N , 98.3°E), Li Shihu 等 (2020) 在贡觉县周边采集了三个剖面, 1766 块古地磁样品, 总厚度 3325 m。剖面的主要载磁矿物是赤铁矿和磁铁矿;所有样品都经过逐步的系统热退磁;通过了倒转检验和褶皱检验;高分辨率的磁性地层学研究显示地层的年龄在 $69.0 \sim 41.5$ Ma。需要注意的是构造旋转研究显示 $69 \sim 68$ Ma, $52 \sim 48$ Ma 两个时间段存在 $>15^\circ$ 的旋转。因构造旋转对古纬度的重建存在大的影响且对沉积岩而言,一般用于重建古纬度的古地磁数据要求其旋转量不超过 15° (Vaes et al., 2021), 所以本文选取 Li Shihu 等 (2020) 文章中以下四个年龄段且经过 E/I 倾角校正的古地磁数据来转换到 TTHC 剖面参考点之下, 分别是: $61.0 \sim 55.4$ Ma, $55.4 \sim 53.2$ Ma, $47.1 \sim 45.3$ Ma, $45.3 \sim 41.5$ Ma, 对应的磁偏角和磁倾角参见表 2, $Q+R$ 值为 8。将以上数据转换到 TTHC 剖面参考点之下分别为: $Dec = 52.3^\circ$, $Inc = 40.8^\circ$, $a95 = 4^\circ$, 古纬度为 23.4°N ($61.0 \sim 55.4$ Ma); $Dec = 49.6^\circ$, $Inc = 43.9^\circ$, $a95 = 4.8^\circ$, 古纬度为 25.7°N ($55.4 \sim 53.2$ Ma); $Dec = 34.2^\circ$, $Inc = 48.7^\circ$, $a95 = 2.7^\circ$, 古纬度为 29.7°N ($47.1 \sim 45.3$ Ma); $Dec = 30^\circ$, $Inc = 47.6^\circ$, $a95 = 2.7^\circ$, 古纬度为 28.7°N ($45.3 \sim 41.5$ Ma)。

在羌塘下拉秀盆地, Roperch 等 (2017) 采集了能够平均掉古地磁场长期变化火山岩古地磁样品;进行了系统的热退磁实验;火山岩的绝对年龄为 $51 \sim 49$ Ma。根据上述的古地磁评判标准, $Q+R$ 值为 4。以剖面坐标 (32.6°N , 96.6°E) 为参考点,计算出的磁偏角为 11.9° , 倾角为 41.6° , $a95$ 是 8.0° , 转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 11.3^\circ$, $Inc = 42.6^\circ$, $a95 = 7.8^\circ$, 古纬度为 24.6°N 。

在青藏高原中部地区的囊谦盆地, Zhang Weilin 等 (2020) 在 1046 m 厚的新生代地层采集了 740 块古地磁样品, 主要载磁矿物是赤铁矿;所有样品都经过了逐步的系统热退磁;通过了倒转检验和褶皱检验;基于高分辨率的磁性地层学结果,确定地层的年龄在 $52.5 \sim 35.0$ Ma。同时,旋转结果显示囊谦盆地在 $52 \sim 46$ Ma 经历了约 26° 的逆时针旋转、 $40.5 \sim 35.0$ Ma 存在约 25° 的顺时针旋转、 $46.0 \sim 40.5$ Ma 期间旋转不显著 (Zhang Weilin et al., 2020)。因此,囊谦剖面 $46.0 \sim 40.5$ Ma 的古地磁数据用来重

建古纬度较为合适。Zhang Weilin 等 (2020) 对囊谦剖面第三段(约 46~35 Ma)的磁倾角开展了浅化校正,由之前的 36.5°校正到 47.5°,浅化系数是 0.69。但需要注意的是磁倾角校正过的第三段中间(40.5~35.0 Ma)有约 25°的旋转,所以笔者等将第三段中 46.0~40.5 Ma 没有旋转的这一小段的古地磁数据重新进行了计算得到: $Dec = 16.8^\circ$, $Inc = 40.8^\circ$, $a95 = 4.6^\circ$,但是这里的磁倾角结果是没有经过校正的,因原始数据限制,不能对这一小段的数据开展 E/I 校正。笔者等基于已知的第三段浅化系数(flattening factor) $f = 0.69$,通过公式 $\tan I = f \times \tan \lambda$ (Butler, 1992),计算得到校正后的倾角为 39° ,与校正之前磁倾角几乎一致,这里还是用之前的磁倾角 40.8° ,转换到 TTHC 剖面参考点之下为: $Dec = 16.2^\circ$, $Inc = 42.1^\circ$, $a95 = 4.8^\circ$,古纬度为 $24.3^\circ N$ 。

除了以上的研究, Lin Jinlu 和 Watts (1988) 以及 Halim 等 (1998) 在风火山—二道沟盆地的古新世—早始新世地层开展了古地磁研究,但是地层的年代没有很好的限定且没有磁倾角浅化的校正;Liu

Zhifei 等 (2003) 对风火山—二道沟盆地的风火山群和五道梁盆地的雅西措组等开展了较为详细的磁性地层学工作,但是构建的风火山群地层年代学后续被修正 (Staisch et al., 2014; Jin Chunsheng et al., 2018) 且同样没有尝试开展磁倾角浅化校正;Chen Yan 等 (2002) 在可可西里盆地中新世地层、Dai Jingen 等 (2012) 在西可可西里盆地康托组、Ran Ranbo 等 (2016) 在通天河盆地雅西措组和五道梁组以及伊海生等 (2004) 在乌兰乌拉湖风火山群等所开展的古地磁工作都存在着地层年龄的模糊和不可靠性以及缺乏地层的倾角浅化校正问题。虽然以上的研究工作的 Q+R 值都 ≥ 5 ,但是考虑到中亚地区存在着明显的沉积岩所记录的磁倾角浅化现象(颜茂都等,2012),所以对沉积岩磁倾角浅化进行校正后来重建古纬度显得尤为必要,基于此,本文将上述的 9 项古地磁的结果排除,不参与 TTHC 剖面所在地区沱沱河盆地新生代古纬度重建恢复。

最终,根据以上通过古地磁评判标准的新生代羌塘地体或者地体边界的古地磁极研究结果(共 11

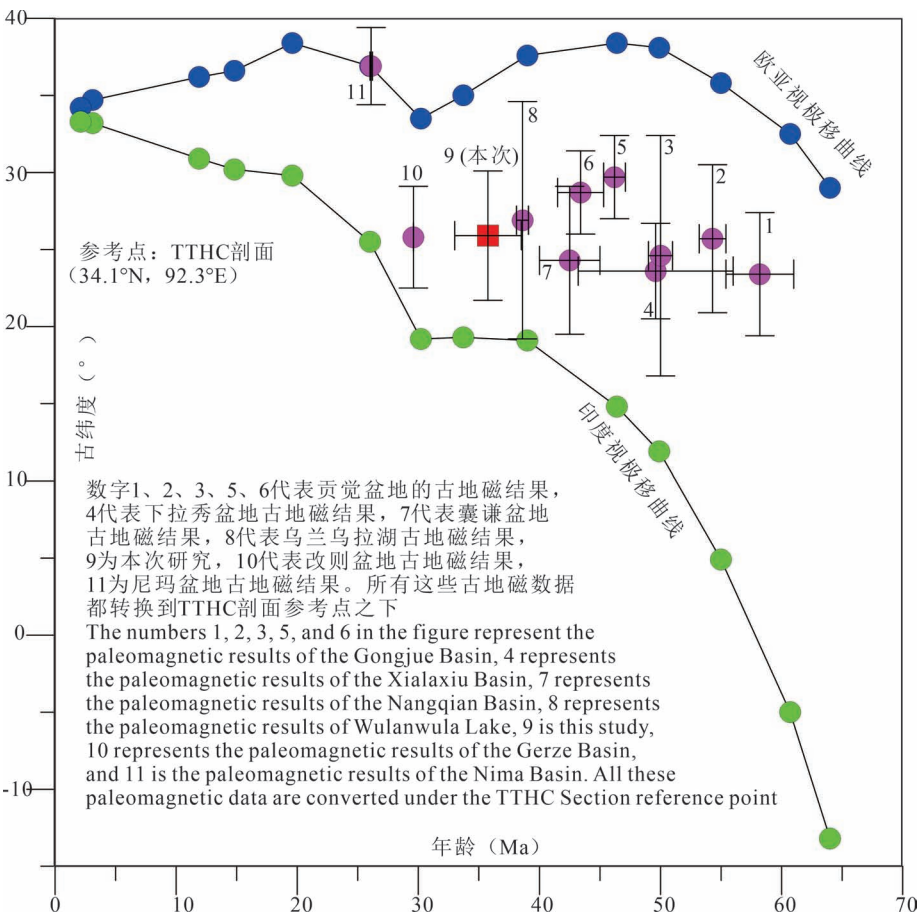


图 7 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面位置新生代古纬度演化历史

Fig. 7 Cenozoic paleolatitude evolution history of the TTHC location, Tuotuohe Basin

条) (Lippert et al., 2011; 丁继凯, 2014; Meng Jun et al., 2017; Roperch et al., 2017; Tong Yabo et al., 2017; Li Shihu et al., 2020; Zhang Weilin et al., 2020), 将这些古地磁结果转换到 TTHC 剖面的坐标系统下(表 2), 结合本次的研究结果, 重建 TTHC 剖面所在的沱沱河盆地的新生代古纬度演化历史(图 7)。

印度板块与欧亚板块的碰撞形成了现在平均海拔约 5000 m 的青藏高原 (Molnar and Tapponnier, 1975; Yin An and Harrison, 2000)。从图 7 中可以看出沱沱河盆地从新生代早期(约 60 Ma)到约 24 Ma, TTHC 剖面或者高原的上地壳一直处于纬向挤压缩短进程当中, 以 TTHC 剖面为缩短时间起点, 晚始新世以来沱沱河盆地纬向地壳缩短了 1100 ± 627 km, 与羌塘地体东部昌都地区的缩短量基本一

表 3 青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面 $VGP \geq 45^\circ$ 的古地磁结果

Section, Tuotuohe Basin							
校正前(°)		校正后(°)		校正前(°)		校正后(°)	
磁偏角	磁倾角	磁偏角	磁倾角	磁偏角	磁倾角	磁偏角	磁倾角
156.7	-33.2	157.2	-1.2	186.2	-53.5	212.2	-24.6
184.9	-48.3	177.1	-18.3	350.7	58.2	34.5	34.6
243.4	-37.9	222.8	-28.2	155.3	2.2	156.2	-4.4
206.5	-29.8	199.2	-6	191.9	-51.1	217.5	-20.8
134	-74.6	150.7	-43.7	117	-30.6	154.4	-53.5
144.2	-0.9	152	-19.2	173.8	-28.2	190.6	-13.7
173.1	-5.7	176.5	-2.6	18.4	30.2	26.4	7.4
135	-49.5	198.1	-53.9	23.2	49.3	37.9	23.4
125	-8.7	141	-37.5	41.5	59.8	53.1	29.7
161.7	-53.6	211.5	-39.5	356.5	70.9	50.7	51.2
186.9	-28.7	202.1	-9.7	123	-13.5	136.7	-33.8
348	61.8	43.1	39.9	144.3	-15.7	157.4	-23.6
169.1	-30.3	187.2	-22.4	175.2	-12.7	180.2	-3.2
166.9	-42.7	195.9	-35.3	163.8	-13.2	170.1	-6.2
156.4	-21.6	172	-25.2	154.8	-11.5	161.8	-10
182.4	-12.5	187.3	-3.3	151	-4.8	154.8	-6.8
158.6	-7.8	166.3	-19.1	5.2	55.8	31.4	40.7
169	2.8	169.5	-4.7	319.1	12.1	327.1	22.8
125.8	-13.3	137.9	-36.2	329.6	59.4	18.9	25.7
343.5	28.2	7.1	33.6	337.3	32.9	357.8	7.6
315.1	36.7	350.4	48.3	289.4	30.6	310.3	30.7
329.6	32.3	356.7	36.4	348.7	36.9	357.7	9.3
306.5	32.1	335.3	48.3	336.5	41.6	351.3	16
180.3	-20.5	189	-9.7	325.1	46.4	346.7	24.4
147.8	-32.7	171.3	-36.6	328.5	43.4	346.9	20.6
162.8	-51.2	203.9	-41.5	313.4	37.2	333	22.3
127.2	-8.9	139.1	-32.3	156.2	-25.6	163.3	-2.1
176.5	-21.4	185.6	-13.7	131.1	-55.4	158.4	-31.3
125.2	-24.1	140.9	-40.2	144.9	-27.4	152.1	-2.1
190.2	-49	211.2	-32	185.6	-42.7	187.3	-7.9
203.6	-62.7	227.8	-39.9	179.5	-53.7	184.2	-19.2
163.7	-32.4	181.2	-29	158.1	-43.9	167.6	-13
173.3	-49.4	200.6	-40.4	156.2	-48.2	167.8	-17.5
123.9	-42.4	145.1	-54.8	151.1	-60.7	202.5	-47.1
133.8	-1.5	136.3	-13.5	135.7	-12.9	146.7	-25.5
116.8	-21.6	133.7	-42.4	187.7	-17.4	192.9	-2
134.6	-35.1	161.9	-43.9	189.6	-37.2	203.8	-13.4

致(Fu Qiang et al., 2022),形成众多的逆冲断裂带,如唐古拉山逆冲断裂等(Li Yalin et al., 2012),在约 24 Ma 地壳缩短减小或者停止。这个结论也得到了青藏高原早中新世基本水平沉积的五道梁组,早中新世古大湖,不整合覆盖于风火山群之上未变形的玄武岩,风火山地区断层泥低温热年代学以及风火山、唐古拉山、囊谦等逆冲断层结束时间等地质证据的支持(Wu Zhenhan et al., 2008; Staisch et al., 2014; Li Yalin et al., 2015; Staisch et al.,

2016;李乐意,2019)。

5 结论

(1) 岩石磁学研究表明青藏高原沱沱河盆地 TTHC 剖面的主要载磁矿物是磁铁矿和赤铁矿,但以赤铁矿为主。与同期(约 35 Ma)欧亚极期期望磁倾角相比以及火山岩对比,TTHC 剖面存在明显的磁倾角浅化现象,经 E/I 方法校正后,得到在约 35 Ma 古地磁方向为 $Dec = 358.5^\circ$, $Inc = 44.4^\circ$, $a_{95} = 5.7^\circ$, 古纬度为 $26.1^\circ N$ 。

(2) 综合贡觉盆地,改则盆地,尼玛盆地,囊谦盆地、下拉秀盆地和乌兰乌拉湖火山岩古纬度数据以及本文的结果,得到青藏高原沱沱河盆地新生代古纬度演化历史,结果表明在约 24 Ma 沱沱河盆地到达现在的纬度位置,印度与欧亚板块碰撞所导致的沱沱河盆地上地壳缩短在约 24 Ma 减小或者停止。

致谢:感谢两位评审专家和编辑部的宝贵建议和辛勤工作。

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)

安勇胜, 邓中林, 庄永成. 2004. 风火山群的物质特征及时代讨论. 西北地质, 37(1): 63~68.

曹勇, 孙知明, 裴军令, 李海兵, 许伟, 张蕾. 2021. 柴达木地块早奥陶世古地理位置的古地磁学约束. 地质学报, 95(5): 1448~1458.

曹勇, 孙知明, 李海兵, 曹新文, 刘晨光, 叶小舟, 李成龙, 张蕾. 2020. 班公湖—怒江缝合带东段晚白垩世红层古地磁研究及其构造意义. 岩石学报, 36(10): 3243~3255.

常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区构造特征. 地质科学, 8(1): 1~12.

丁继凯. 2014. 青藏高原渐新世康托组红层古地磁结果及其大地构造意义. 硕士论文. 导师: 张世红. 中国地质大学(北京).

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.

李乐意. 2019. 青藏高原沱沱河盆地晚始新世—早中新世古环境记录及对高原中北部隆升历史的指示意义. 博士论文. 导师: 安芷生, 常宏. 中国科学院地球环境研究所.

李乐意, 常宏. 2015. 六盘山东西两侧红粘土沉积起源年代差异原因初探. 地质论评, 61(4): 861~872.

李乐意, 常宏, 关冲, 陶亚玲, 沈俊杰, 权春艳, 秦秀玲, 常小红. 2021a. 晚渐新世以来青藏高原北部东昆仑山构造隆升对亚洲内陆干旱化的潜在影响——基于现代地质观测证据. 地质论评, 67(3): 655~666.

李乐意, 常宏, 关冲, 陶亚玲, 沈俊杰, 秦秀玲, 权春艳, 常小红. 2021b. 青藏高原新生代古高度研究: 现状与展望. 地质论评, 67(5): 1406~1440.

李亚林, 王成善, 伊海生, 刘志飞, 李勇. 2006. 西藏北部新生代大

- 型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起. 地质学报, 80(8): 1118~1130.
- 刘秀铭, 吕镔, 毛学刚, 温昌辉, 俞鸣同, 郭雪莲, 陈家胜, 王涛. 2014. 风积地层中铁矿物随环境变化及其启示. 第四纪研究, 34(3): 443~457.
- 刘志飞, 王成善, 金玮, 伊海生, 郑洪波, 赵西西, 李亚林. 2005. 青藏高原沱沱河盆地渐新—中新世沉积环境分析. 沉积学报, 23(2): 210~217.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~662.
- 任海东, 颜茂都, 孟庆泉, 宋春晖, 方小敏. 2013. 羌塘盆地磁倾角浅化校正及其在构造上的应用——中侏罗纪以来约 1000 km 的南北向缩短. 地质科学, 48(2): 543~556.
- 孙知明, 曹勇, 李海兵, 裴军令, 仝亚博, 叶小舟, 吴百灵, 曹新文, 刘晨光. 2019. 青藏高原形成和演化的古地磁研究进展综述. 地球学报, 40(1): 17~36.
- 颜茂都, 方小敏, 张伟林, 宋春晖. 2012. 青藏高原东北部沉积物磁倾角浅化之成因探究. 第四纪研究, 32(4): 588~596.
- 颜茂都, 张大文. 2014. 中国主要陆块特定时段的漂移演化历史及其对海相钾盐成矿作用的制约. 矿床地质, 33(5): 945~963.
- 颜茂都, 张大文, 方小敏, 张伟林, 宋春晖, 刘成林, 笄金波, 申苗苗. 2021. 特提斯构造域东南端思茅盆地勐野井组地层年代学及其地质意义. 中国科学(地球科学), 51(4): 537~559.
- 伊海生, 林金辉, 时志强, 李保华, 赵兵. 2004. 藏北乌兰乌拉湖地区第三纪陆相红层古地磁研究的初步结果及地质意义. 地球学报, 25(6): 633~638.
- 张大文, 颜茂都. 2019. 印度与欧亚大陆碰撞时限的古地磁研究进展与问题. 地质论评, 65(5): 1251~1268.
- 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.
- An Yonghseng, Deng Zhonglin, Zhuang Yongcheng. 2004. Characteristics of Fenghuoshan Group's material and its era discussion. *Northwestern Geology*, 37(1): 63~68.
- 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): 1~31.
- Boos W R, Kuang Zhiming. 2010. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. *Nature*, 463(7278): 218~222.
- Butler R F. 1992. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications.
- Cao Yong, Sun Zhiming, Li Haibin, Cao Xinwen, Liu Chenguang, Ye Xiaozhou, Li Chenglong, Zhang Lei. 2020. Paleomagnetic study of the late Cretaceous red beds in the eastern segment of the Bangong—Nujiang suture zone and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 36(10): 3243~3255.
- Cao Yong, Sun Zhiming, Pei Junling, Li Haibing, Xu Wei, Zhang Lei. 2021. Paleomagnetic constraints on the early Ordovician paleogeographical position of the Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1448~1458.
- Chang Chengfa, Zheng Xilan. 1973. Tectonic features of the Mount Jolmo Lungma region in the southern Tibet, China. *Scientia Geologica Sinica*, 8(1): 1~12.
- Chen Yan, Gilder S, Halim N, Cogne J P, Courtillot V. 2002. New paleomagnetic constraints on central Asian kinematics: Displacement along the Altyn Tagh fault and rotation of the Qaidam Basin. *Tectonics*, 21(5): 1~19.
- Cheng Xin, Wu Hanning, Guo Qiang, Hou Baoning, Xia Lingyan, Wang Haijun, Diao Zongbao, Huo Feifei, Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, Zhao Zhenming, Liu Xiaojie. 2011. Paleomagnetic results of Late Paleozoic rocks from northern Qiangtang Block in Qinghai—Tibet Plateau, China. *Science China Earth Sciences*, 55(1): 67~75.
- Dai Jingen, Zhao Xixi, Wang Chengshan, Zhu Lidong, Li Yalin, Finn D. 2012. The vast proto-Tibetan plateau: New constraints from paleogene Hoh Xil basin. *Gondwana Research*, 22(2): 434~446.
- Deng Tao, Wang Xiaoming, Fortelius M, Li Qiang, Wang Yang, Tseng Z J, Takeuchi G T, Saylor J E, Säilä L K, Xie Guangpu. 2011. Out of Tibet: Pliocene woolly rhino suggests high—plateau origin of ice age megaherbivores. *Science*, 333(6047): 1285~1288.
- Ding Jikai. 2014. Paleomagnetism and its tectonic implication of the red beds of Oligocene Kangtuo Formation in the Qinghai—Tibetan Plateau. Supervisor: Zhang Shihong. Master degree dissertation of China University of Geosciences (Beijing).
- Dupont-Nivet G, Butler R F, Yin An, Chen Xuanhua. 2002. Paleomagnetism indicates no Neogene rotation of the Qaidam Basin in northern Tibet during Indo—Asian collision. *Geology*, 30: 263~266.
- Dupont-Nivet G, Lippert P C, Van Hinsbergen D J J, Meijers M J M, Kapp P. 2010. Palaeolatitude and age of the Indo—Asia collision: palaeomagnetic constraints. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1189~1198.
- Fang Xiaomin, Yan Maodu, Zhang Weilin, Nie Junsheng, Han Wenxia, Wu Fuli, Song Chunhui, Zhang Tao, Zan Jinbo, Yang Yongpeng. 2021. Paleogeography control of Indian monsoon intensification and expansion at 41 Ma. *Science Bulletin*, 66(22): 2320~2328.
- Fisher R A. 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 217(1130): 295~305.
- Fu Qiang, Yan Maodu, Dekkers M J, Guan Chong, Yu Liang, Xu Wanlong, Li Bingshuai, Feng Zhantao, Xu Zunbo, Shen Miaomiao, Zhang Dawen. 2022. Remagnetization of the Jurassic limestones in the Zaduo area, Eastern Qiangtang Terrane (Tibetan Plateau, China): implications for the India—Eurasia collision. *Geophysical Journal International*, 228(3): 2073~2091.
- Gilder S, Chen Yan, Sen S. 2001. Oligo—Miocene magnetostratigraphy and rock magnetism of the Xishuigou section, Subei (Gansu Province, western China) and implications for shallow inclinations in central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B12): 30505~30521.
- Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M B, Ogg G M. 2012. The Geologic Time Scale 2012. Elsevier.
- Guo Zhengtang, Ruddiman W F, Hao Qingzhen, Wu Haibin, Qiao Yansong, Zhu Rixiang, Peng Shuzhen, Wei J J, Yuan Baoying, Liu Tungsheng. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159~163.
- Habicht J K A. 1979. Paleoclimate, paleomagnetism, and continental drift. Okla: American Association of Petroleum Geologists.
- Halim N, Cogné J P, Chen Y, Atasiei R, Besse J, Courtillot V, Gilder S, Marcoux J, Zhao R L. 1998. New Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic results from Xining - Lanzhou basin, Kunlun and Qiangtang blocks, China: Implications on the geodynamic evolution of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B9): 21025~21045.

- Hunag 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, van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Guo Zhaojie, Dupont-Nivet G. 2015. Paleomagnetic tests of tectonic reconstructions of the India—Asia collision zone. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2642~2649.
- Jin Chunsheng, Liu Qingsong, Liang Wentian, Andrew R B, Sun Jimin, Hu Pengxiang, Zhao Xiangyu, Su Youliang, Jiang Zhaoxia, Liu Zhifeng, Duan Zongqi, Yang Huihui, Yuan Sihua. 2018. Magnetostratigraphy of the Fenghuoshan Group in the Hoh Xil Basin and its tectonic implications for India—Eurasia collision and Tibetan Plateau deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 486: 41~53.
- Kirschvink J L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3): 699~718.
- Kodama K P. 2012. Paleomagnetism of sedimentary rocks: Process and interpretation. John Wiley & Sons.
- Kruiver P P, Dekkers M J, Heslop D. 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189(3~4): 269~276.
- Li Leyi. 2019&. Late Eocene—early Miocene paleoenvironment evolution of the Tuotuohe Basin and its tectonic uplift implications for the central—northern Tibetan Plateau. Supervisor: An Zhisheng, Chang Hong. Doctor degree dissertation of Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences.
- Li Leyi, Chang Hong. 2015&. Preliminary interpretation to diachroneity of the red clay in two flanks of the Liupan Mountain. *Geological Review*, 61(4): 861~872.
- Li Leyi, Chang Hong, Farnsworth A, Niemi N, Clift P, Qiang X K, Jin Chunshen, Sun Jimin, Guan Chong, Zhang Peng, Peng Lu, Miao Yunfa, An Zhisheng. Revised Chronology of the Middle—Upper Sequence of the Cenozoic Stratigraphy in the Hoh Xil Basin, central—northern Tibet and its Paleoenvironmental Implications. under review.
- Li Leyi, Chang Hong, Guan Chong, Tao Yaling, Shen Junjie, Quan Chunyan, Qin Xiuling, Chang Xiaohong. 2021a&. Potential role of the late Oligocene tectonic uplift in the eastern Kunlun Mountains of the Xizang (Tibet) in the formation of inner Asia aridification—Based on present geological observational evidence. *Geological Review*, 67(3): 655~666.
- Li Leyi, Chang Hong, Guan Chong, Tao Yaling, Shen Junjie, Qin Xiuling, Quan Chunyan, Chang Xiaohong. 2021b&. Cenozoic paleoaltitude research on the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau: Current status and prospects. *Geological Review*, 67(5): 1406~1440.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Dai Jingen, Xu Ganqing, Hou Yunling, Li Xiaohan. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan—Himalayan orogen: A review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36~61.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, Liu Zhifei, Li Yong. 2006&. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, Northern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1118~1130.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Zhao Xixi, Yin An, Ma Chao. 2012. Cenozoic thrust system, basin evolution, and uplift of the Tanggula Range in the Tuotuohe region, central Tibet. *Gondwana Research*, 22(2): 482~492.
- Li Shihu, van Hinsbergen D J J, Najman Y, Liu-Zeng Jing, Deng Chenglong, Zhu Rixiang. 2020. Does pulsed Tibetan deformation correlate with Indian plate motion changes? *Earth and Planetary Science Letters*, 536: 116144.
- Lin Jie, Dai Jingen, Zhuang Guangsheng, Jia Guodong, Zhang Laiming, Ning Zijie, Li Yalin, Wang Chengshan. 2020. Late Eocene—Oligocene high relief paleotopography in the north central Tibetan Plateau: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology and leaf wax hydrogen isotope studies. *Tectonics*, 39(2): e2019TC005815.
- Lin Jinlu, Watts D R. 1988. Palaeomagnetic constraints on Himalayan—Tibetan tectonic evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 326(1589): 177~188.
- Lippert P C, Zhao Xixi, Coe R S, Lo H. 2011. Palaeomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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.
- Liu Xiuming, Lv Bing, Mao Xuegang, Wen Changhui, Yu Mintong, Guo Xuelian, Chen Jiasheng, Wang Tao. 2014&. Iron minerals of aeolian deposits vary with environment and its significances. *Quaternary Sciences*, 34 (3): 443~457.
- Liu Zhifei, Zhao Xixi, Wang Chengshan, Liu Shun, Yi Haisheng. 2003. Magnetostratigraphy of Tertiary sediments from the Hoh Xil Basin: implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan Plateau. *Geophysical Journal International*, 154(2): 233~252.
- Liu Zhifei, Wang Chengshan, Jin Wei, Yi Haisheng, Zheng Hongbo, Zhao Xixi, Li Yalin. 2005&. Oligo—Miocene depositional environment of the Tuotuohe Basin, central Tibetan Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(2): 210~217.
- McElhinny M W, McFadden P L. 1999. Paleomagnetism: continents and oceans. Elsevier.
- Meert J G, Pivarunas A F, Evans D A D, Pisarevsky S A, Pesonen L J, Li Zhengxiang, Elming, S-Å, Miller S R, Zhang Shihong, Salminen J M. 2020. The magnificent seven: a proposal for modest revision of the quality index. *Tectonophysics*, 790: 228549.
- Meng Jun, Coe R S, Wang Chengshan, Gilder S A, Zhao Xixi, Liu Hao, Li Yalin, Ma Pengfei, Shi Kai, Li Shuai. 2017. Reduced convergence within the Tibetan Plateau by 26 Ma? *Geophysical Research Letters*, 44(13): 6624~6632.
- Miao Yunfa, Wu Fuli, Chang Hong, Fang Xiaomin, Deng Tao, Sun Jimin, Jin Chunsheng. 2016. A Late-Eocene palynological record from the Hoh Xil Basin, northern Tibetan Plateau, and its implications for stratigraphic age, paleoclimate and paleoelevation. *Gondwana Research*, 31: 241~252.
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic Controls on Climate and Paleoclimate of Asia: Thermal and Mechanical Roles for the Tibetan Plateau. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38: 77~102.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419~426.
- Parrish J T, Ziegler A, Scotese C R. 1982. Rainfall patterns and the distribution of coals and evaporites in the Mesozoic and Cenozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 40(1~3): 67~101.
- Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991&. Regional Geology of Qinghai Province. Beijing: Geological Publishing House;

- 1~662.
- Raymo M E, Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359(6391): 117~122.
- Ran Bo, Zhao Xixi, Liu Zhifei, Wang Chengshan, Zhu Lidong, Jin Wei, Li Yalin. 2016. Cenozoic Vertical—Axis Rotations of the Hoh Xil Basin, Central—Northern Tibet. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 90(3): 858~869.
- Ren Haidong, Yan Maodu, Meng Qingquan, Song Chunhui, Fang Xiaomin. 2013&. “E/I” corrected paleomagnetic inclination indicates 1000 km N—S shortening of the Qiangtang terrane since the middle Jurassic. *Chinese Journal of Geology*, 48(2): 543~556.
- Roberts A P, Cui Y, Verosub K L. 1995. Wasp - waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9): 17909~17924.
- Roperch P, Dupont-Nivet G, Guillot S, Goussin F, Huang Wentao, Replumaz A, Yang Zhang, Guo Zhaojie, Song Bowen. 2017. Paleomagnetic constraints on early collisional deformation along the eastern margin of the Qiantang terrane (Tibetan plateau) at 50 and 37 Ma. *EGU general assembly conference abstracts*. 9476.
- Staish L M, Niemi N A, Clark M K, Chang Hong. 2016. Eocene to late Oligocene history of crustal shortening within the Hoh Xil Basin and implications for the uplift history of the northern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 35(4): 862~895.
- Staish L M, Niemi N A, Chang Hong, Clark M K, Rowley D B, Currie B. 2014. A Cretaceous—Eocene depositional age for the Fenghuoshan Group, Hoh Xil Basin: Implications for the tectonic evolution of the northern Tibet Plateau. *Tectonics*, 33(3): 281~301.
- Sun Zhiming, Cao Yong, Li Haibin, Pei Junling, Tong Yabo, Ye Xiaozhou, Wu Bailing, Cao Xinwen, Liu Chenguang. 2019&. A Review of paleomagnetic study of the formation and evolution of the Tibetan Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 40(1): 17~36.
- 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: 396~404.
- Tan Xiaodong, Kodama K P, Chen Hanlin, Fang Dajun, Sun Dongjiang, Li Yongan. 2003. Paleomagnetism and magnetic anisotropy of Cretaceous red beds from the Tarim basin, northwest China: Evidence for a rock magnetic cause of anomalously shallow paleomagnetic inclinations from central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2): 2107.
- Tauxe L, Butler R F, Van d V R, Banerjee S K. 2010. *Essentials of paleomagnetism*. USA: University of California Press.
- 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*, 145: 101~116.
- Tong Yabo, Yang Zhengyu, Mao Changping, Pei Junling, Pu Zongwen, Xu Yingchao. 2017. Paleomagnetism of Eocene red-beds in the eastern part of the Qiangtang Terrane and its implications for uplift and southward crustal extrusion in the southeastern edge of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 475: 1~14.
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li Shihu, Huang Wentao, Advokaat E, Spakman W. 2019. Reconstructing Greater India: Paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives. *Tectonophysics*, 760: 69~94.
- Vaes B, Li Shihu, Langereis C G, van Hinsbergen D J J. 2021. Reliability of palaeomagnetic poles from sedimentary rocks. *Geophysical Journal International*, 225(2): 1281~1303.
- Van der V R. 1990. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 184(1): 1~9.
- Wang Chengshan, Zhao Xixi, Liu Zhifei, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi Haisheng, Zhu Lidong, Liu Shun, Li Yalin. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13): 4987~4992.
- Wu Guoxiong, Liu Yimin, He Bian, Bao Qing, Duan Anmin, Jin Feifei. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Scientific Reports*, 2(1): 1~7.
- Wu Zhenhan, Patrick J B, Wu Zhonghai, Hu Daogong, Zhao Xun, Ye Peisheng. 2008. Vast early Miocene lakes of the central Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 120(9~10): 1326~1337.
- Xie Gan, Li Jinfeng, Wang Shiqi, Yao Yifeng, Sun Bin, Ferguson D K, Li Chengsen, Deng Tao, Liu Xiaodong, Wang Yufei. 2021. Bridging the knowledge gap on the evolution of the Asian monsoon during 26~16 Ma. *The Innovation*, 2(2): 100110.
- Yan Maodu, Van der V R, Tauxe L, Fang Xiaomin, Parés J. 2005. Shallow bias in Neogene palaeomagnetic directions from the Guide Basin, NE Tibet, caused by inclination error. *Geophysical Journal International*, 163(3): 944~948.
- Yan Maodu, Zhang Dawen. 2014&. Drifting history of China’s main blocks during specific periods and its tectonic constraints on marine potash formation. *Mineral Deposits*, 33(5): 945~963.
- Yan Maodu, Zhang Dawen, Fang Xiaomin, Ren Haidong, Zhang Weilin, Zan Jinbo, Song Chunhui, Zhang Tao. 2016. Paleomagnetic data bearing on the Mesozoic deformation of the Qiangtang Block: Implications for the evolution of the Paleo- and Meso—Tethys. *Gondwana Research*, 39: 292~316.
- Yan Maodu, Fang Xiaomin, Zhang Weilin, Song Chunhui. 2012&. Inclination bias in the sedimentary rocks of the northeast Tibetan Plateau and its possible causes. *Quaternary Sciences*, 32(4): 588~596.
- Yan Maodu, Zhang Dawen, Fang Xiaomin, Zhang Weilin, Song Chunhui, Liu Chenglin, Zan Jinbo, Shen Miaomiao. 2021&. New insights on the age of the Mengyejing Formation in the Simao Basin, SE Tethyan domain and its geological implications. *Science China Earth Sciences*, 64(2): 231~252.
- Yao Tandong, Masson-Delmotte V, Gao Jing, Yu Wusheng, Yang Xiaoxin, Risi C, Sturm C, Werner M, Zhao Huabiao, He You, Ren Wei, Tian Lide, Shi Chunming, Hou Shugui. 2013. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. *Reviews of Geophysics*, 51(4): 525~548.
- Yi Haisheng, Lin Jinhui, Shi Zhiqiang, Li Baohua, Zhao Bin. 2004&. Magnetostratigraphic studies of Tertiary continental redbeds in Wulanwula Lake area of northern Tibetan Plateau and their geologic significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(6): 633~638.
- 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(1~2): 153~165.

Yin An, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211~280.

Zhang Dawen, Yan Maodu. 2019. Paleomagnetic constraints on the onset of India—Eurasia collision: a synthesis. *Geological Review*, 65(5): 1251~1268.

Zhang Ran, Jiang Dabang, Ramstein G, Zhang Zhongshi, Lippert P, Yu Entao. 2018. Changes in Tibetan Plateau latitude as an important factor for understanding East Asian climate since the Eocene: A

modeling study. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 295~308.

Zhang Weilin, Fang Xiaomin, Zhang Tao, Song Chunhui, Yan Maodu. 2020. Eocene rotation of the northeastern central Tibetan Plateau indicating stepwise compressions and eastward extrusions. *Geophysical Research Letters*, 47(17): e2020GL088989.

Zheng Hongbo, Clift P D, Wang Ping, Tada R, Jia Juntao, He Mengying, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(19): 7556~7561.

Paleolatitude evolution of the Tuotuohe Basin, central northern Xizang (Tibet) during the Cenozoic and its tectonic, climate implications

LI Leyi^{1, 2)}, CHANG Hong^{1, 3)}, GUAN Chong^{1, 4)}

1) *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710061;*

2) *Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an, 710061;*

3) *CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an, 710061;*

4) *Xi'an Center of Geological Survey (Northwest China Center of Geoscience), China Geological Survey, Xi'an, 710054*

Objectives: Paleolatitude evolution could provide a general paleo location framework for explaining the paleoclimate change and tectonic deformation in geological time. Strengthening the paleolatitude study of the Hoh Xil Basin in the north—central Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau is important for understanding the history and mechanism of the tectonic uplift process in the north—central Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau, elucidating the coupling relationship between the origin and evolution of the East Asian monsoon and the uplift and deformation of the plateau, and exploring the dynamics of the arid climate indicated by the Late Eocene sporulation in the Hoh Xil Basin. In this paper, we choose a sub-basin of the Hoh Xil Basin, Tuotuohe Basin (TTHC) as the target for paleomagnetic research and reconstructing its paleolatitude evolution history during the Cenozoic.

Methods: Samples from the TTHC are got every 1 meter. Typical samples are selected for rock magnetic experiments, and carrying out stepwise thermal demagnetization experiments on the paleomagnetic specimens collected in TTHC. The inclination of data is corrected by the E—I test.

Results: Rock magnetism indicates that the carrier minerals are magnetite and hematite, while hematite is the main carrier mineral. The paleomagnetic result indicates that there is an evident shallowness in inclination in TTHC when comparing with the expected inclination of the Eurasian pole at ~35 Ma and the volcanic inclination in Wulanwula Lake, which locates at the western of our section. After E/I adjustment, the paleomagnetic direction at ~35 Ma in TTHC is $Dec=358.5^\circ$, $Inc=44.4^\circ$, $a95=5.7^\circ$ and the paleolatitude is $26.1^\circ N$.

Conclusions: After synthesizing the paleolatitude results from Gongjue Basin, Gaize Basin, Nima Basin, Nangqiang Basin, Xialaxiu Basin and Wulanwula Lake and this study, we get the paleolatitude evolution history of the Tuotuohe Basin during the Cenozoic (the reference point is TTHC). Paleolatitude results indicate that the Tuotuohe Basin located at 26.1° at 35 Ma and the climate is controlled by the sub-tropical high pressure belt, which could explain the arid climate suggested by the pollen and lithology. At 24 Ma, Tuotuohe Basin gets to present latitude and the surface crustal shortening ceased or reduced.

Keywords: Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau; Tuotuohe basin; Cenozoic; paleolatitude; climate; crustal shortening

Acknowledgements: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42102023), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, Chinese Academy of

Sciences (Nos. 2019QZKK0707, 2019QZKK0704), the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB40010100) and the State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chines Academy of Sciences (Nos. SKLLQGPY 1804, SKLLQG2030 and SKLLQG2121). Appreciate the advices and toilsome work of the reviewers and editors.

First author: LI Leyi, male, born in 1989, research on the Cenozoic tectonic uplift history of the Tibetan Plateau and its climate effects; Email: lily@ieecas. cn

Corresponding author: CHANG Hong, male, born in 1970, mainly work on the Cenozoic tectonic deformation of the Qinghai—Xizang(Tibetan) Plateau and paleoclimate change; Email: changh@loess. llqg. ac. cn

Corresponding author: GUAN Chong, male, born in 1990, research on the paleomagnetic and paleogeography;Email: gchong@ mail. cgs. gov. cn

Manuscript received on: 2021-08-23; Accepted on: 2022-05-08; Network published on: 2022-06-20
Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 06. 011 **Edited by:** LIU Zhiqiang

