

青藏高原东南缘东南向挤出最北边界的古地磁约束

徐万龙¹, 颜茂都^{1,2*}, 关冲³, 付强^{4,5}, 于亮⁶, 栗兵帅⁷, 张大文⁸, 申苗苗¹, 徐尊铂^{1,2}, 张雨薇⁹

1. 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054

4. Department of Earth Sciences, Utrecht University, Utrecht 3584CS, the Netherlands

5. Institute of Earth Sciences, Heidelberg University, Heidelberg 69120, Germany

6. 德州学院生态资源与环境学院, 德州 253023

7. 东华理工大学地球与行星科学学院, 南昌 330013

8. 枣庄学院旅游与资源环境学院, 枣庄 277160

9. 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

* 通讯作者, E-mail: maoduyan@itpcas.ac.cn

2025-09-20收稿, 2026-01-07修回, 2026-01-28接受, 2026-04-13网络版发表

国家自然科学基金项目(42430807、42130205、42504056、42204087、42404084、41974080)、中国博士后科学基金项目(2025M770424)、山东省自然科学基金项目(ZR2023QD166)和山东省高等学校青年科技创新团队计划项目(2024KJG073)资助

摘要 青藏高原东南缘新生代构造演化是理解整个高原隆升与变形过程的关键环节。该区域南部普遍被认为自晚始新世以来经历了显著的东南向挤出逃逸, 但近年来的古地磁研究显示, 其北部可能存在北向运动, 然而该运动的幅度与时限仍存在争议。为更好地约束该区域新生代的纬向位移历史, 我们对位于青藏高原东南缘中部的德钦地区始新世东旺组红层开展了系统的古地磁研究, 分别在两个剖面采集了古地磁样品。系统热退磁获得两个剖面地层校正后的平均剩磁方向分别为 $D_s=314.2^\circ$, $I_s=+42.8^\circ$ ($k=23.3$ 、 $\alpha_{95}=9.2^\circ$ 、 $N=12$)和 $D_s=19.7^\circ$, $I_s=+49.1^\circ$ ($k=85.1$ 、 $\alpha_{95}=3.2^\circ$ 、 $N=24$)。岩相学观察、岩石磁学分析、热退磁特征以及倒转与褶皱检验结果共同支持所获得的剩磁方向的原生性。对所获得的剩磁方向开展的E/I磁倾角浅化校正揭示德钦地区在始新世位于 34.4°N , 相对欧亚大陆并未发生显著的纬向位移。综合其他古地磁与构造地质学证据, 我们认为青藏高原东南缘自晚始新世以来存在明显的南北向差异运动: 南部经历显著东南向逃逸, 北部仅发生有限的北向位移, 而位于中部的德钦地区(中甸断裂)可能构成了东南向挤出逃逸的最北边界。高原东南缘南北部相反的运动方向, 可能是以德钦地区为中心, 通过区域整体顺时针旋转来实现。

关键词 青藏高原东南缘, 德钦, 古地磁, 古纬度, 东南向挤出逃逸

1 引言

新生代印度与欧亚大陆的碰撞是地球新生代构造演化过程中最重大的构造事件之一, 其引发的青藏高原隆升和地壳缩短深刻地改变了区域乃至全球的地貌与气候格局(Molnar和Tapponnier, 1975; Tapponnier等, 1982, 2001; England和Houseman, 1989; Yin和Harrison, 2000; van Hinsbergen等, 2012; Fang等, 2020; Yuan等,

2021, 2022)。青藏高原东南缘被普遍认为围绕喜马拉雅东构造结发生了显著的东南向挤出逃逸与顺时针旋转变形, 从而调节了印度欧亚大陆碰撞过程中的南北向地壳缩短(图1A)(Tapponnier等, 1982; Leloup等, 1995; Yang等, 2001; Tanaka等, 2008; Tong等, 2013; Gao等, 2015; Li等, 2017a; Deng等, 2020)。因此, 揭示该区域的构造演化历史对理解青藏高原整体的变形过程和机制具有重要意义。

中文引用格式: 徐万龙, 颜茂都, 关冲, 付强, 于亮, 栗兵帅, 张大文, 申苗苗, 徐尊铂, 张雨薇. 2026. 青藏高原东南缘东南向挤出最北边界的古地磁约束. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1895–1911, doi: [10.1360/N072025-0552](https://doi.org/10.1360/N072025-0552)

英文引用格式: Xu W, Yan M, Guan C, Fu Q, Yu L, Li B, Zhang D, Shen M, Xu Z, Zhang Y. 2026. Paleomagnetic constraints on the northernmost boundary of the southeastward extrusion in the southeastern Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 69(5): 1856–1871, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1855-2>

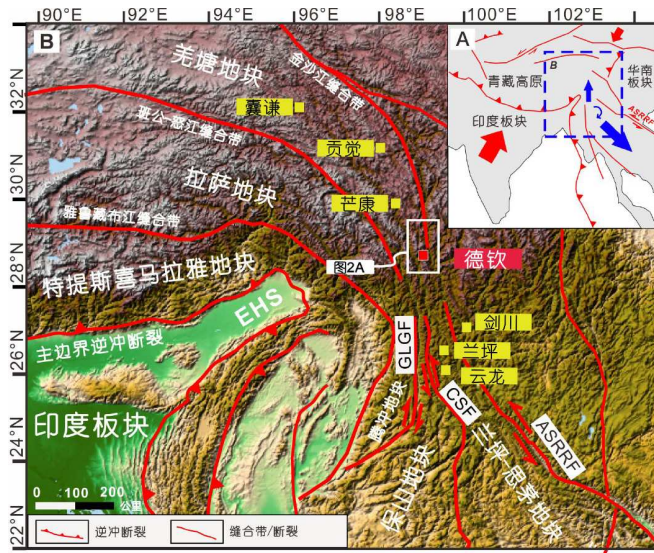


图1 青藏高原东南缘构造格架图。(A) 青藏高原南北向挤压以及东南缘顺时针旋转, 东南向挤出逃逸和北向位移示意图; (B) 青藏高原东南缘及邻区构造简图, 其中白色方框为研究区位置。EHS, 喜马拉雅东构造结; ASRRF, 哀牢山-红河断裂带; CSF, 崇山断裂带; GLGF, 高黎贡断裂带

青藏高原东南缘的新生代构造变形以顺时针旋转和东南向挤出逃逸为主。古地磁证据显示, 该地区的旋转过程可分为两个阶段: 始新世期间整体发生约 20° 的顺时针旋转(Xu等, 2024a); 而晚始新世之后, 不同地区则出现不同程度的顺时针旋转(Chen等, 1995; Sato等, 2001; Tong等, 2013; Gao等, 2015; Li等, 2017a; Xu等, 2024b)。基于区域构造迹线和古地磁偏角之间的显著线性关系, 这些旋转通常被解释为与弯山构造变形有关(Tong等, 2013; Gao等, 2015; Xu等, 2024a, 2024b)。软泥模拟实验及运动学分析进一步表明, 兰坪-思茅地块沿左行走滑的哀牢山-红河断裂带在约35–17 Ma期间可能发生了约700 km的东南向挤出(Tapponnier等, 1982, 1990; Schärer等, 1994; Leloup等, 1995, 2001, 2007; Lacassin等, 1996; Chung等, 1997; Zhang和Schärer, 1999; Gilley等, 2003; Liu等, 2019)。这一结果与经E/I磁倾角浅化校正后古地磁数据所揭示的约 500 ± 700 km(Tong等, 2013)以及微地块旋转所重建的约600 km南向位移基本相符(Li等, 2017b)。然而, 基于南海扩张过程重建的研究则认为, 东南向逃逸的幅度可能相对较小, 仅约250 km(Mazur等, 2012)。因此, 现有研究普遍支持青藏高原东南缘的确发生过东南向挤出, 但具体位移量仍存在一定争议。

与青藏高原东南缘南部显著的东南向逃逸不同, 越来越多的证据表明, 以羌塘地块东部为主的北部地区在

晚始新世以来发生了北向位移。然而, 不同古地磁研究给出的位移量存在显著差异: 例如, 芒康盆地自36–33 Ma以来位移约 200 ± 700 km(Xu等, 2024b), 或自40 Ma以来约 600 ± 300 km(Zhang等, 2023); 贡觉盆地自54–43 Ma(或约49 Ma)以来位移约 1300 ± 400 km(Tong等, 2017; Vaes等, 2021); 囊谦盆地自52–35 Ma以来位移约 700 ± 400 km(Zhang等, 2020); 杂多盆地始新世以来位移约 1700 ± 400 km(Fu等, 2022)。这些数据之间的巨大差异使得该区域始新世以来的纬向位移过程难以准确阐释。此外, 另有研究提出羌塘地块自晚白垩世以来可能曾发生了约 900 ± 300 km的南向位移(Ma等, 2024)。因此, 目前关于青藏高原东南缘北向位移与东南向挤出之间的运动学关系及动力学机制仍不明确。

德钦位于东南向挤出的兰坪-思茅地块与北向位移的羌塘地块之间(图1B), 是揭示青藏高原东南缘晚始新世以来旋转变形与纬向运移历史的关键地带。本研究对德钦地区始新世东旺组红层开展了系统的古地磁研究, 结合区域地层与碎屑锆石物源分析对比, 明确了其沉积时代。获得的高质量古地磁数据为该区域构造变形提供了定量约束。在此基础上, 综合已有地质与地球物理证据, 本文进一步探讨了青藏高原东南缘的区域变形机制, 为理解该区复杂的新生代构造演化提供了新的依据。

2 地质背景与古地磁采样

青藏高原东南缘是由一系列长条状地块拼合而成的复杂构造体系, 主要包括羌塘、拉萨、兰坪-思茅、保山和腾冲等地块(图1B)。这些地块自冈瓦纳大陆裂解后相继拼贴至欧亚大陆边缘(Yin和Harrison, 2000; Metcalfe, 2013; Yan等, 2016; Guan等, 2021; Yu等, 2022), 分别被金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带、哀牢山-红河断裂、崇山断裂以及高黎贡断裂等大型构造边界所分隔(图1B)。这些构造单元的走向在喜马拉雅东构造结附近呈显著的弧形展布: 由高原内部近东西向逐渐过渡为东南缘的北西-南东向, 最终在区域南部转为近南北走向(图1B)。

德钦地区位于羌塘地块东部与兰坪-思茅地块之间的构造过渡带, 地处喜马拉雅东构造结周缘构造带最为狭窄的区域(图1B)。区内主要出露石炭纪灰岩与板岩、二叠纪变玄武岩、灰岩及板岩、三叠纪砂岩、灰岩、页岩与板岩, 以及分布有限的古近纪红层序列(图2A; 云南省地质矿产局, 1982)。该区段内的金沙江缝合带构造组成复杂, 主要包括中-晚三叠纪中心绒群、石炭-二叠纪嘎金雪山群、金沙江蛇绿混杂岩及二叠杂岩体(图2A; Wang等, 2000; Burchfiel和Wang, 2003)。这些地层总体呈显

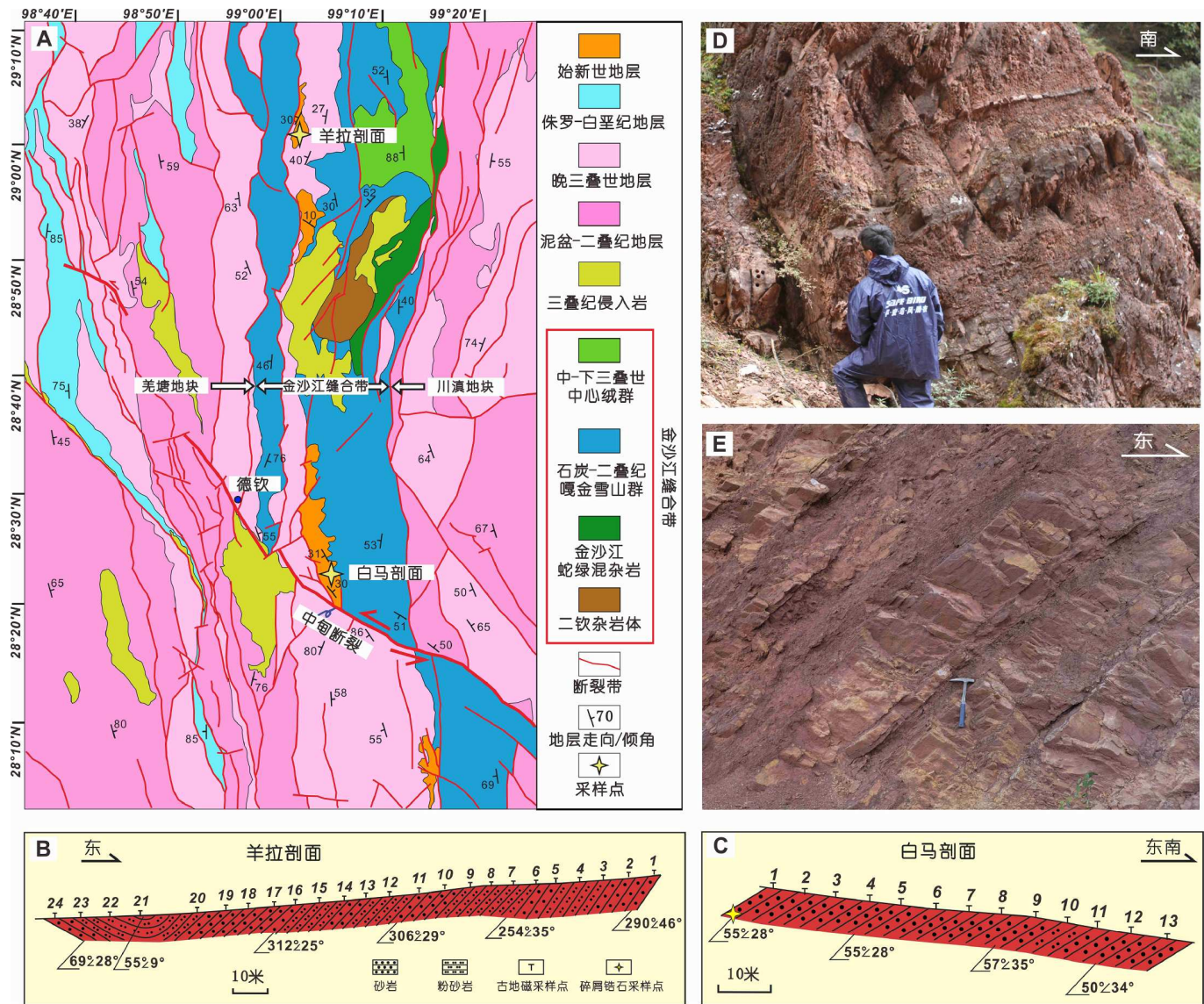


图2 德钦地区地质背景和采样剖面情况。(A) 德钦地区地质简图及采样点位置(修改自云南省地质矿产局, 1982; Wang等, 2000; Burchfiel和Wang, 2003); (B)羊拉(YL)与(C)白马(BM)采样剖面图; (D)羊拉与(E)白马剖面典型露头照片

著的南北向构造走向, 并被北西走向的左行走滑中甸断裂错断约20 km(图2A)。目前, 中甸断裂的确切走滑活动时代尚不明确, 但已有研究推测其可能活动于始新世/渐新世至中新世(Burchfiel和Wang, 2003)。低温热年代学研究揭示了德钦地区两期快速剥露事件: 早期(60–40 Ma)可能与印度-亚洲初始碰撞期的造山作用有关; 后期(20–0 Ma)则可能受季风增强导致降水增多或河流下切加剧等侵蚀作用控制(Nie等, 2018; Liu-Zeng等, 2018; Cao等, 2022)。这些记录反映了区域的垂向构造活动, 但尚不能直接约束中甸断裂的水平位移时代。本研究重点关注的古近系东旺组在德钦地区仅局部出露, 不整合覆盖于上三叠统之上(图2A)。该组岩性以红色砂

岩和粉砂岩为主(图2B–2E), 在岩性及层位上可与剑川盆地的宝相寺组以及贡觉盆地的然木组和贡觉组对比, 因此其时代曾被划归为始新世-渐新世(云南省地质矿产局, 1982)。

本研究在德钦地区选取了羊拉剖面(YL, 29°0'N, 99°2'E)与白马剖面(BM, 28°22'N, 99°5'E)开展了系统的采样工作(图2A)。羊拉剖面为一套厚度约200米的向斜地层, 褶皱轴向近南北向; 白马剖面则为一套倾向北东的单斜地层, 厚度约100 m。羊拉剖面两翼共采集24个采点的古地磁岩芯样品, 白马剖面采集了13个采点(图2B和2C)。每个采点使用便携式钻机在红色砂岩与粉砂岩中钻取约8–12块定向岩芯, 并使用磁罗盘和太阳罗盘测量样

品产状。此外,在白马剖面顶部采集一件砂岩样品(图2C),用于碎屑锆石U-Pb年代学分析。所有岩芯样品均在实验室加工为标准古地磁样品,以供后续岩石磁学与热退磁分析使用。

3 结果

3.1 岩石磁学

本研究选取了12个样品进行系统的岩石磁学分析。高温磁化率实验使用的是MFK1-FA Kappabridge与CS-4高温组件,样品在氩气环境下加热至700℃后冷却至室温。磁滞回线(Loop)、等温剩磁获得曲线(IRM)、反向场退磁曲线以及一阶反转曲线(FORC)均在Lakeshore 8604型振动样品磁强计上完成。所有岩石磁学实验均在中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室古地磁实验平台完成。

由于大部分样品具有相似的岩石磁学特征,本文选取其中四个代表性样品的结果进行展示(YL 4-4、YL 16-8、BM 4-3和BM 9-1)。这四个样品磁化率-温度曲线(κ - T)的加热曲线均高于冷却曲线,指示在加热过程中有新的、磁化率值更高的矿物(如磁铁矿)生成。加热曲线在400至580℃区间呈现先显著上升后快速下降的趋势(图3A-3D),这很可能与霍普金森效应有关(Dunlop和Ozdemir, 1997)。剔除霍普金森峰后,样品BM 4-3在约580℃的磁化率明显低于约400℃,表明样品中含有少量磁铁矿(图3C)。所有样品的加热曲线的磁化率均在约680℃附近降至接近零,说明赤铁矿为其主要的磁性矿物。

所有样品的等温剩磁获得曲线(IRM)在最高2T的外加磁场下均未达到饱和(图3E-3H),表明存在赤铁矿等高矫顽力磁性矿物。利用MaxUnmix软件(Maxbauer等, 2016)对IRM曲线进行矫顽力谱分解,均解析出两个较为明显的组分(图3I-3L)。其中,所有样品的组分1以及样品YL4-4的组分2显示相对较高的矫顽力(672-1953 mT),进一步说明赤铁矿是主要的载磁矿物。此外,样品YL 16-8、BM 4-3和BM 9-1的组分2表现出低矫顽力特征(75-140 mT),可能指示存在磁铁矿。“蜂腰”状磁滞回线进一步证实样品中含有不同矫顽力或不同粒度范围的磁性矿物(图3M-3P)。一阶反转曲线(FORC)图显示,样品BM 4-3表现出典型的假单畴(PSD)颗粒特征(图3S),而样品YL 4-4、YL 16-8和BM 9-1则同时包含单畴(SD)与假单畴颗粒(图3Q、3R、3T)。

综合以上岩石磁学分析表明,样品YL 16-8、BM 4-3和BM 9-1的主要载磁矿物是单畴磁铁矿和赤铁矿,而样

品YL 4-4则以单畴-假单畴赤铁矿为主,这些磁性矿物均能携带稳定的特征剩磁。

3.2 扫描电镜观察与能谱分析

为进一步探究样品中磁性矿物的微观形态并验证其剩磁信号的可靠性,本研究使用JEOL JXA-8230型电子探针微分析仪,对四个代表性样品(YL 4-4、YL 16-8、BM 4-3和BM 9-1)开展了背散射电子图像观察及主要元素组成定量分析。测试条件设置为:加速电压15 kV,束流20 nA,探针束斑直径5 μ m。各元素的X射线能谱峰位计数时间为10 s,背景信号(上限与下限)计数时间均为5 s。

扫描电镜背散射电子图像及能谱分析结果表明,多数氧化铁矿物颗粒形态不规则(图4),部分呈浑圆状(图4C、4M、4N),可能与沉积搬运过程中的磨蚀作用有关。颗粒粒径主要分布在20-150 μ m,未发现明显氧化边。仅在样品BM 4-3中的少数富钛(Ti)磁铁矿颗粒内部观察到贫钛薄片(图4I),是典型的固溶体出溶结构(Turner等, 2008);其余颗粒成分相对均匀,钛含量可忽略不计。

因此,基于上述背散射电子图像、能谱分析和岩石磁学分析,代表性样品中的铁氧化物主要是碎屑赤铁矿和少量磁铁矿,没有明显蚀变现象,可以携带稳定的原生剩磁。

3.3 古地磁结果

本研究分别于羊拉和白马剖面采集了243块和139块古地磁样品。从每块样品中选取一个标本,利用ASC TD-48和PGL100型热退磁仪(残余磁场<10 nT)开展逐步热退磁实验:500℃以下温度段退磁间隔为50-100,500℃以上间隔为10-20℃。退磁后的样品在磁屏蔽室内使用2G-755型超导磁力仪(RAPID系统)测量剩磁分量。随后,将获得的退磁数据投影至正交矢量图(Zijderveld, 1967),通过主成分分析方法拟合至少4个连续退磁点的特征剩磁方向(Kirschvink, 1980),并基于在线数据处理工具Paleomagnetism.org计算各采样点的平均方向。以上实验均在青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室的古地磁实验平台完成(Koymans等, 2016)。

羊拉剖面220个标本及白马剖面111个标本在450℃以下分离出了低温分量方向(图5),地层校正前的样品平均方向分别为:羊拉剖面 $D_g=3.3^\circ$, $I_g=+45.7^\circ$ ($k=5.3$, $\alpha_{95}=4.5^\circ$);白马剖面 $D_g=358.8^\circ$, $I_g=+46.4^\circ$ ($k=6.9$, $\alpha_{95}=5.5^\circ$)。这些低温方向与采样点的现代地心轴向偶极子场(GAD)方向高度吻合(图6A和6B),并且羊拉剖面低温分量的逐步展开褶皱检验显示,最大特征值出现在-16%至-17%褶皱展开时(图6E; Tauxe和Watson, 1994),

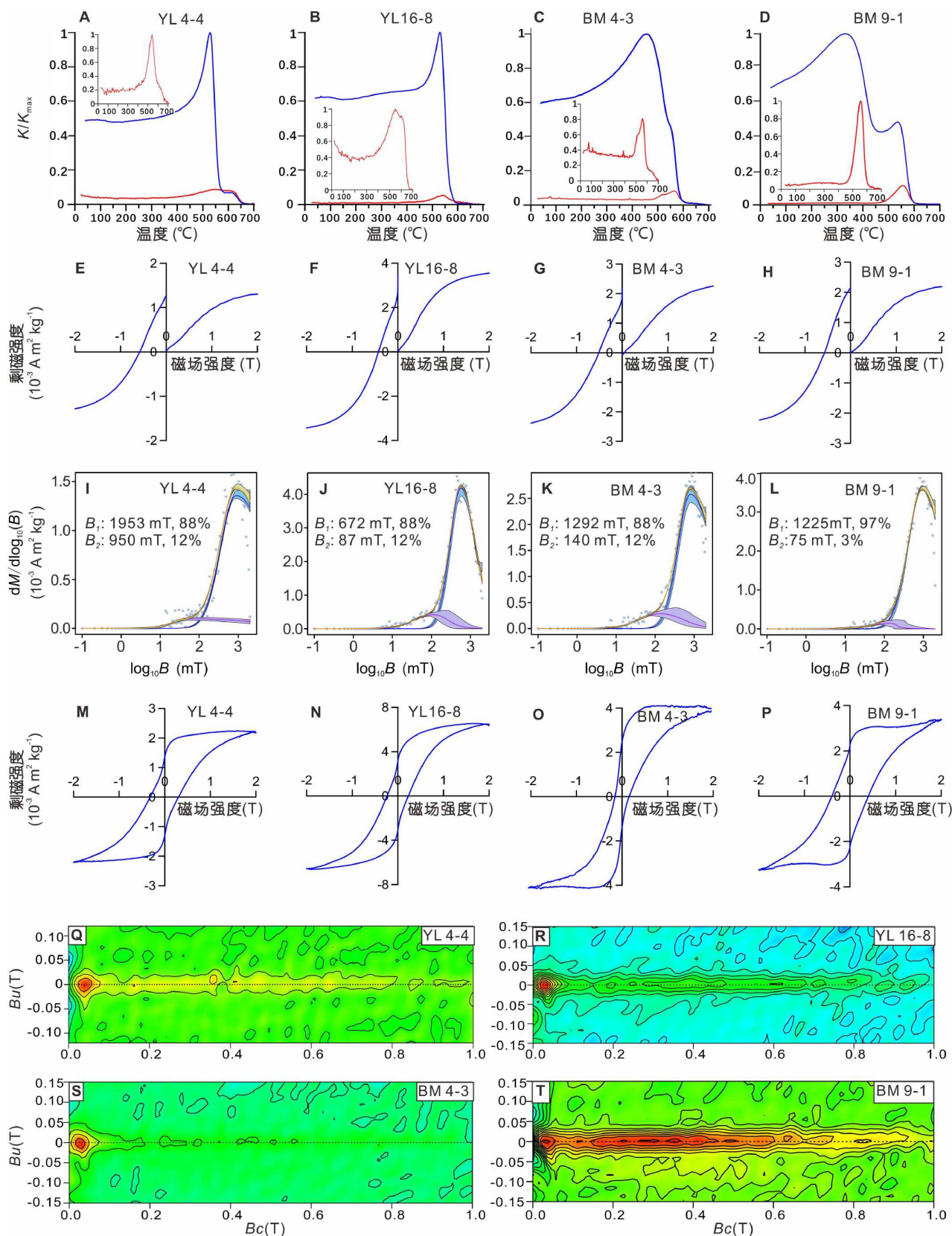


图3 代表性样品的岩石磁学结果。(A-D) 磁化率-温度曲线(κ - T); (E-H) 等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线; (I-L) 等温剩磁组分分析; (M-P) 顺磁校正后的磁滞回线及(Q-T)一阶反转曲线图。图(A-D)中红色(蓝色)曲线代表升温(降温)过程。 $\log B$ 为矫顽力(B)的对数值; $dM/d\log(B)$ 为磁化强度(M)对矫顽力对数值的一阶导数; Bc 为矫顽力; Bu 为磁相互作用强度

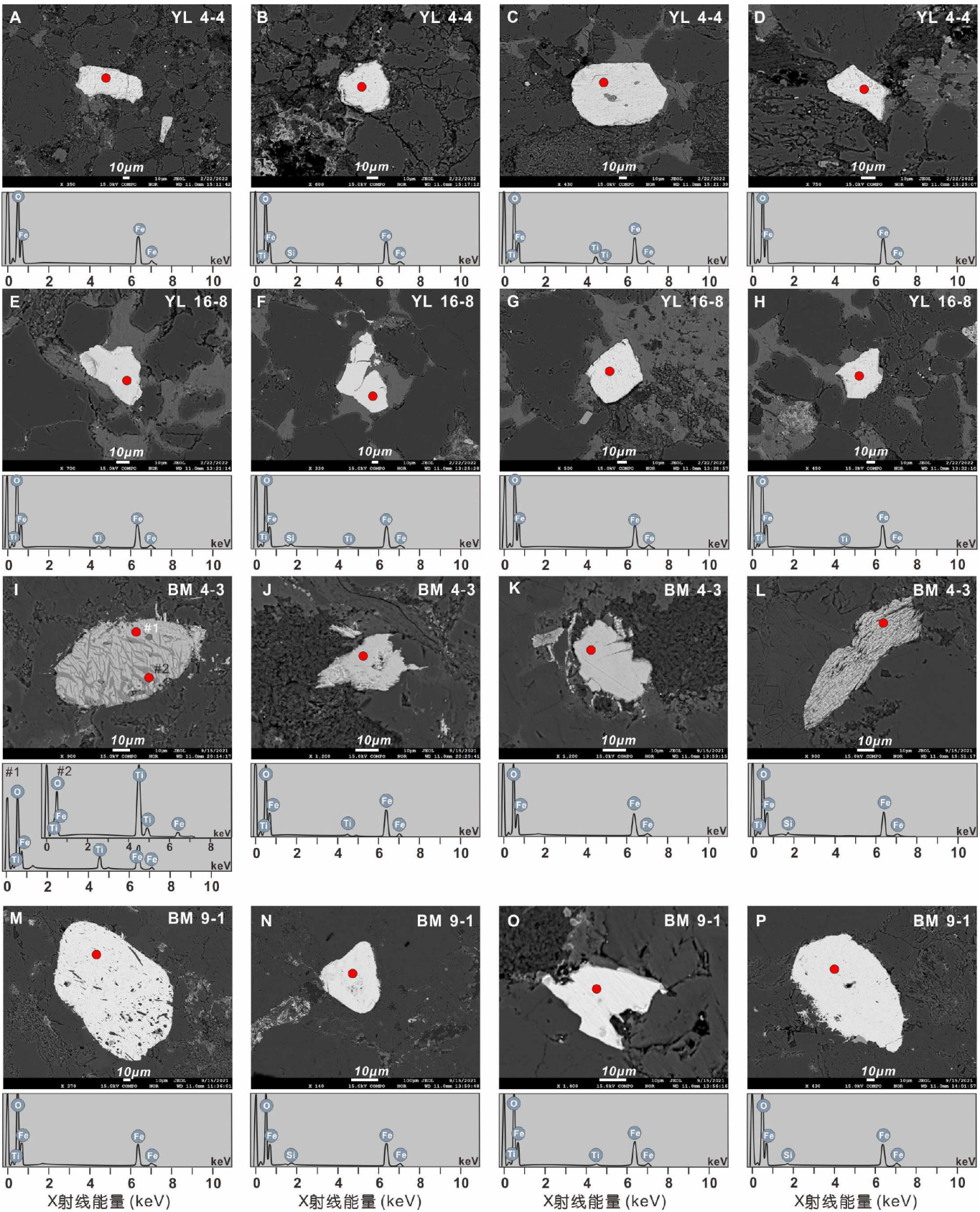


图4 代表性样品的扫描电镜背散射电子(BSE)与能谱分析(EDS)图像, 红点为分析点位

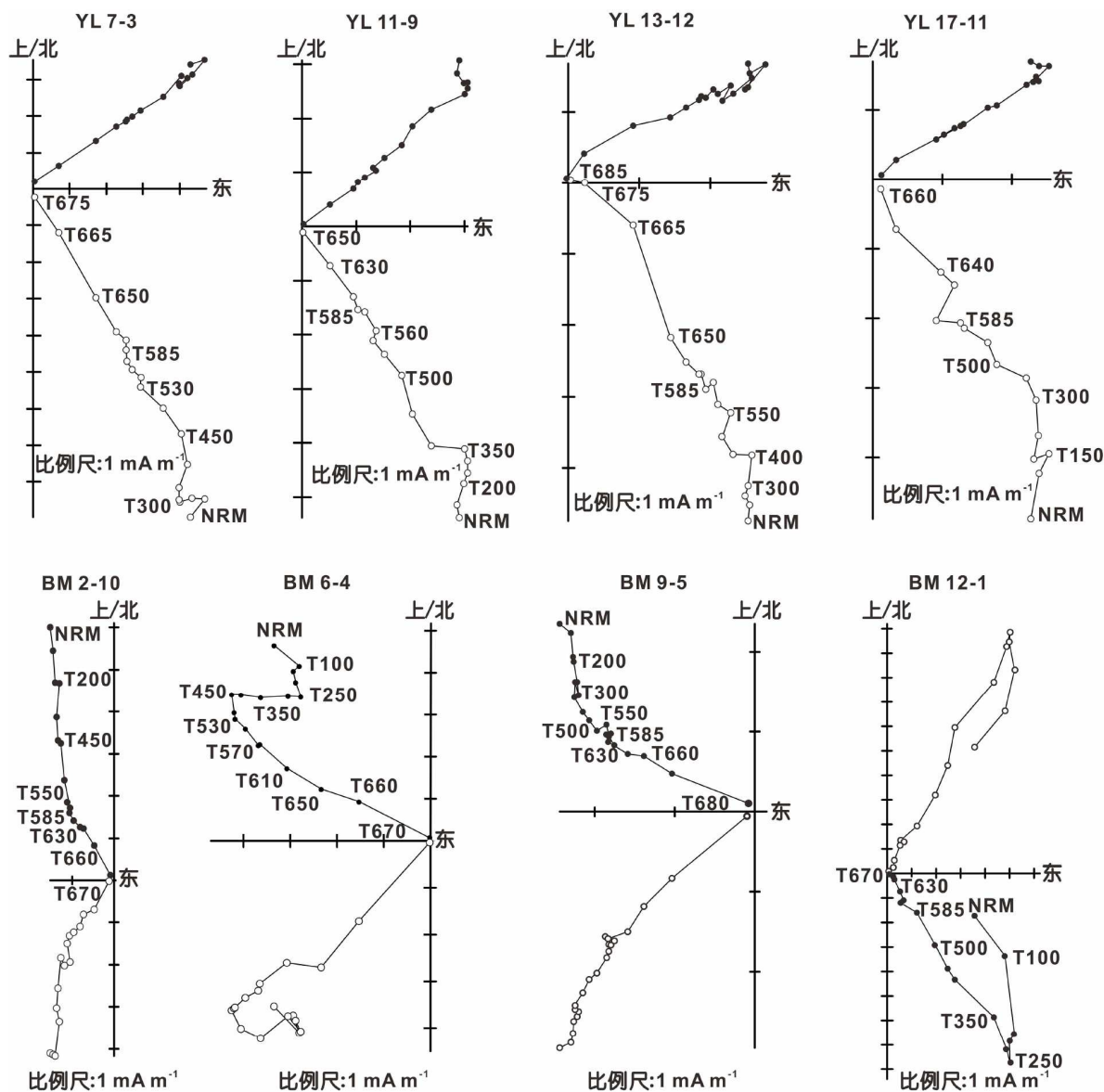


图5 羊拉(YL)与白马(BM)剖面地理坐标下的代表性样品退磁曲线图。实心与空心符号分别表示投影于水平面与垂直面的矢量；NRM，天然剩磁

表明两个剖面中的低温分量很可能反映近现代地球磁场的黏滞剩磁。

稳定的高温分量(HTC)在300至680 °C温度区间获得(图5, 附表S1和S2), 这些方向在正交投影图上呈线性指向原点, 为特征剩磁方向(ChRM)。采用45°截取法排除每个采样点中的偏离数据点后(Johnson等, 2008), 羊拉剖面24个正极性采样点的平均方向在地理坐标下为 $D_g=43.7^\circ$, $I_g=+48.9^\circ$ ($k=19.3$, $\alpha_{95}=6.9^\circ$), 地层校正后为 $D_s=19.7^\circ$, $I_s=+49.1^\circ$ ($k=85.1$, $\alpha_{95}=3.2^\circ$) (图6C, 表1)。这个方向同时通过了99%置信水平的McFadden(1990)褶皱检验(校正前 $\zeta_1=16.9$, 校正后 $\zeta_1=3.2$; 临界值 $\zeta=8.0$)以及Tauxe和Watson(1994)的逐步展开褶皱检验, 后者显示 τ_1

最大值出现在77%至106%展开度之间(图6F)。羊拉剖面位于一个倾伏褶皱内(走向 $=3.5^\circ$, 倾伏角 $=12.2^\circ$, $\alpha_{95}=5.9^\circ$), 倾伏褶皱校正后采样点平均方向在地理坐标中变为 $D_g'=43.8^\circ$, $I_g'=+49.0^\circ$ ($k=19.1$, $\alpha_{95}=6.9^\circ$), 地层校正后为 $D_s'=21.9^\circ$, $I_s'=+49.1^\circ$ ($k=89.1$, $\alpha_{95}=3.2^\circ$), 与倾伏校正前的方向在统计意义上无显著差异。

白马剖面10个正极和2个负极性采样点的高温分量平均方向在地理坐标下为 $D_g=291.4^\circ$, $I_g=+34.4^\circ$ ($k=23.0$, $\alpha_{95}=9.3^\circ$), 地层校正后为 $D_s=314.2^\circ$, $I_s=+42.8^\circ$ ($k=23.3$, $\alpha_{95}=9.2^\circ$)。正负极性平均方向在95%置信区间内的三个分量上均互相重叠, 通过了Tauxe等(2010)倒转检验。由于采点数量有限, McFadden和McElhinny(1990)采点水平的

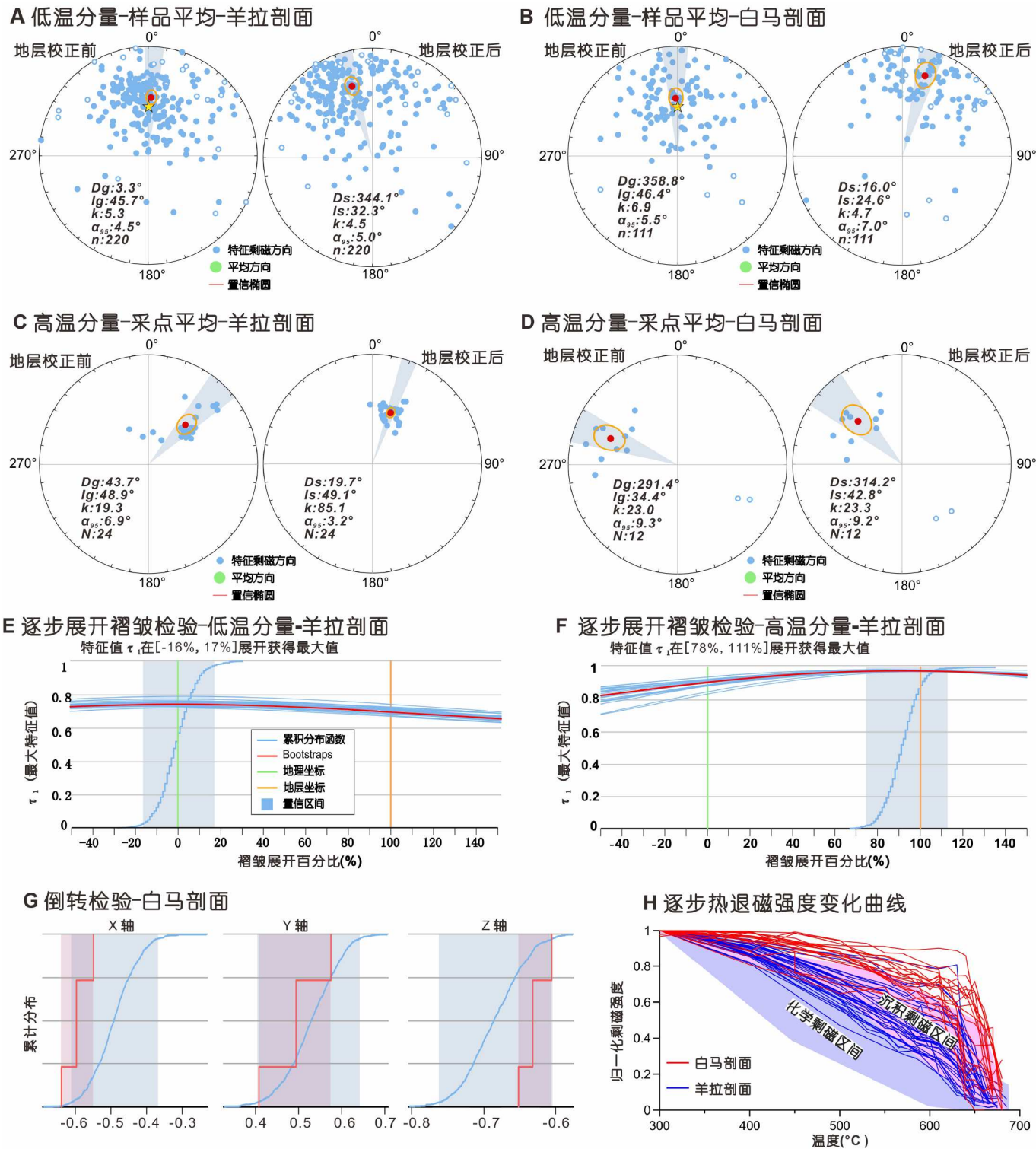


图6 古地磁方向统计及稳定性检验图。低温分量样品水平(A, B)与高温分量采点水平(C, D)的等面积投影图; 羊拉剖面的低温分量(E)和高温分量(F)的Tauxe和Watson(1994)褶皱检验; (G) 白马剖面高温分量倒转检验; (H) 白马与羊拉剖面样品300 $^\circ\text{C}$ 以上的逐步热退磁曲线。粉色与蓝色区域分别为沉积剩磁(DRM)与化学剩磁(CRM)模型的退磁温度区间(Jiang等, 2015)

倒转检验结果为不明确, 但94个标本水平的特征剩磁方向通过了McFadden和McElhinny(1990)倒转检验。

两个剖面的热退磁强度曲线均落在沉积剩磁模型的预期范围内(图6H), 表明赤铁矿颗粒主要为碎屑成因

(Jiang等, 2015)。这一结果与岩石磁学、扫描电镜观测及能谱分析结果一致, 显示样品以碎屑单畴-假单畴赤铁矿颗粒为主(图3和4), 共同表明所获得的特征剩磁为原生剩磁。

3.4 E/I倾角浅化校正

沉积岩中普遍存在倾角浅化现象, 使得所计算出的古纬度不准确, 因此通常需进行校正(Chauvin等, 1996; Yan等, 2005)。为此, 本研究采用E/I方法对数据进行了磁倾角浅化校正(Tauxe和Kent, 2004)。在羊拉剖面中, 所获得的220个特征剩磁方向得到的平均倾角为 $+49.1^{\circ} \pm 3.2^{\circ}$ 。经E/I校正后, 平均倾角约为 54° , 误差范围为 $49^{\circ} - 65^{\circ}$ (图7A)。由于羊拉剖面内部没有显著的旋转(表1), 符合可靠E/I校正的判定条件(Vaes等, 2021)。而白马剖面仅获得97个特征剩磁方向, 低于建议的E/I校正最低100个(Tauxe和Kent, 2004)或者150个(Tauxe等, 2008)的样本量要求。此外, 该剖面数据离散程度较高, 可能受到局部旋转变形的影响。基于上述原因, 本研究未对白马剖面进行E/I校正。

4 讨论

4.1 东旺组的沉积时代

明确的沉积时代对于沉积岩的古地磁数据解释至关重要。然而, 德钦地区东旺组地层中既无火山岩记录, 也缺乏化石报道。此外, 来自白马剖面顶部砂岩样品的碎屑锆石U-Pb年代学分析显示, 其最年轻峰值年龄约为200 Ma(图S1; 附表S3), 未能有效约束该地层的最大沉积年龄。因此, 本研究通过区域岩性对比与碎屑锆石年龄谱分析, 尝试限定研究剖面的沉积时代。

东旺组主要由红色砂岩和粉砂岩构成(图2D和2E), 岩性与邻近的剑川盆地宝相寺组, 以及贡觉盆地贡觉组和然木组高度相似(图8A; 盆地位置详见图1B; 云南省地质矿产局, 1982)。三个盆地的碎屑锆石年龄谱对比结果表明, 东旺组、宝相寺组、然木组和贡觉组均在200–500、700–1200、1700–2000和~2500 Ma呈现一致的年龄峰值(图8B), 指示它们具有共同的沉积物源。

最近的高精度磁性地层研究显示, 宝相寺组沉积于41 Ma之前(Gourbet等, 2017; Fang等, 2021), 然木组与贡觉组的沉积时代约为69–41 Ma(图8A; Li等, 2020)。分别位于德钦以北的贡觉盆地和以南的剑川盆地, 其顶部地层的沉积时代基本一致, 表明该区域在该时期可能具有统一的沉积过程。综合考虑三个盆地相似的物源特征、可对比的岩性组合, 以及德钦盆地处于贡觉与剑川盆地之间的构造位置, 本研究认为东旺组与宝相寺组、然木组及贡觉组可能为同期沉积, 且均沉积于约41 Ma之前(图8A)。

4.2 德钦地区的旋转变形与纬向位移

4.2.1 旋转变形

前述岩石磁学、退磁结果、背散射电子图像、能谱分析和野外检验共同表明德钦东旺组的特征剩磁方向是原生剩磁。采点平均方向表明, 自晚始新世以来, 羊拉剖面相对于欧亚参考极(Vaes等, 2024)发生了 $10.4^{\circ} \pm 6.9^{\circ}$ 的顺时针旋转, 而白马剖面则发生了 $54.7^{\circ} \pm 12.8^{\circ}$ 的逆时针旋转。

白马剖面观测到的显著逆时针旋转, 与青藏高原东南缘以及羊拉剖面所记录的顺时针旋转现象存在明显差异(Yang等, 2001; Tong等, 2013; Gao等, 2015; Li等,

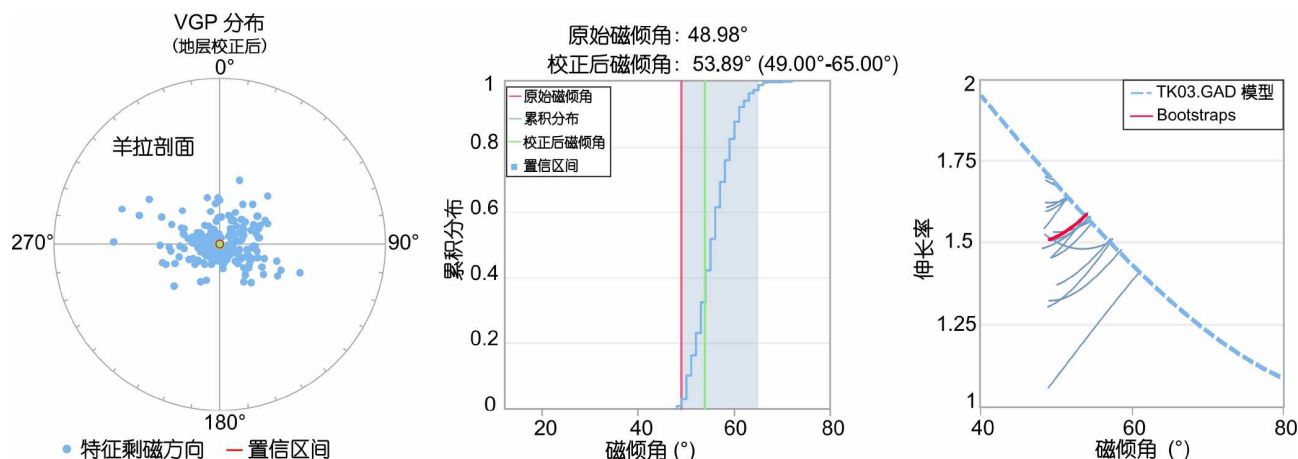


图7 羊拉剖面特征剩磁虚拟地磁极(VGP)分布图和E/I磁倾角浅化校正图

表1 德钦地区羊拉(YL)和白马(BM)剖面古地磁数据^{a)}

采点	DD/Dip	n/n_0	R/N	古地磁方向					
				Dg(°)	Ig(°)	Ds(°)	Is(°)	k	α_{95}
羊拉剖面									
YL-1	290/46	9/10	0/9	51.7	20	26.9	36.4	17.5	12.6
YL-2	271/41	8/10	0/8	48.6	18	28	43.9	28.7	10.5
YL-3	288/27	5/9	0/5	45.6	39	20.9	46.4	81.2	8.5
YL-4	285/41	7/9	0/7	48.1	21	25.9	37.2	38.7	9.8
YL-5	264/40	9/9	4/5	28.8	30.6	358	44.8	30.1	9.5
YL-6	254/35	8/9	0/8	40.9	30.4	16.6	56	32.3	9.9
YL-7	315/29	9/9	0/9	51	51.3	17.6	45.6	187.8	3.8
YL-8	315/29	14/14	0/14	42.3	53.1	10.5	43.3	95.4	4.1
YL-9	306/29	11/11	0/11	49.8	46.7	18.5	45.7	58.7	6
YL-10	306/29	10/10	0/10	51.9	44.8	21.9	45.2	39.4	7.8
YL-11	306/29	10/10	0/10	45.8	53	9.4	48.4	33.4	8.5
YL-12	304/28	13/13	0/13	52.6	51.4	16.1	51.6	72.6	4.9
YL-13	304/28	9/9	0/9	54.5	55.1	12.8	54.9	136	4.4
YL-14	310/32	9/9	0/9	49.5	50.6	12.9	45.3	42.9	7.9
YL-15	310/32	12/12	0/12	45.9	53.2	8	45.4	30.7	8
YL-16	312/25	10/10	0/10	51.1	46.2	25.2	44.5	64	6.1
YL-17	315/24	9/9	0/9	54	48.3	27.4	46.4	57	6.9
YL-18	315/24	6/9	0/6	58.9	52	27.8	51.3	59.3	8.8
YL-19	297/23	6/9	0/6	49.6	53.9	15.9	56.3	84.7	7.3
YL-20	310/27	12/13	0/12	50.4	57.5	10.8	52.7	22.3	9.4
YL-21	55/9	10/10	0/10	28.5	69.4	36.1	61.1	222.5	3.2
YL-22	77/18	12/12	0/12	8	65.6	34.6	55.1	139.8	3.7
YL-23	84/28	8/9	0/8	331.2	60.3	21.6	59	36.5	9.3
YL-24	69/28	4/9	0/4	348.8	68.9	33.2	52.6	42	14.3
平均方向		24/24		43.7	48.9			19.3	6.9
						19.7	49.1	85.1	3.2
白马剖面									
BM-1	55/28	10/10	0/10	298.5	45	329.9	50.6	32.1	8.7
BM-2	55/28	8/13	0/8	321.9	37.4	342.3	33.8	23.9	12.6
BM-3	55/28	7/13	0/7	307.9	46.3	338.6	47.2	41.5	9.5
BM-4	55/28	6/10	0/6	282.5	15.4	292.6	32.7	27.2	14.9
BM-5	55/28	6/11	0/6	263	25	274.6	48.1	125.3	6.9
BM-6	50/29	8/10	0/8	274.5	31.1	294.7	48.2	21.2	12.3
~~BM-7~~	~~57/32~~	~~5/12~~	~~0/5~~	~~291.5~~	~~23.3~~	~~300.3~~	~~38.1~~	~~16~~	~~19.7~~
BM-8	46/30	9/12	0/9	296.3	25.4	312.7	31.6	36.6	8.6
BM-9	57/35	9/11	0/9	284.2	42.5	324.6	57.2	45.3	7.7
BM-10	55/29	6/8	0/6	294	20	307.2	32.2	22	14.6
BM-11	55/29	14/14	14/0	116.1	-27	133.7	-37.3	42.5	6.2
BM-12	50/34	9/10	7/2	119.4	-36.6	147.5	-40.7	46	7.7
BM-13	3/31	5/5	0/5	285.5	50.3	312.6	36.2	130.6	6.7
平均方向		12/13		291.4	34.4			23	9.3
						314.2	42.8	23.3	9.2

a) DD/Dip, 地层倾向与倾角; n/n_0 , 用于计算的样品数/退磁样品总数; R/N , 负/正极性的样品数; Dg(Ds)与Ig(Is), 地层校正前(后)的偏角与倾角; k , 精度参数; α_{95} , 95%置信区间; 采点BM-7因 $\alpha_{95}>15^\circ$ 排除在后续计算之外, 用横线表示删除。

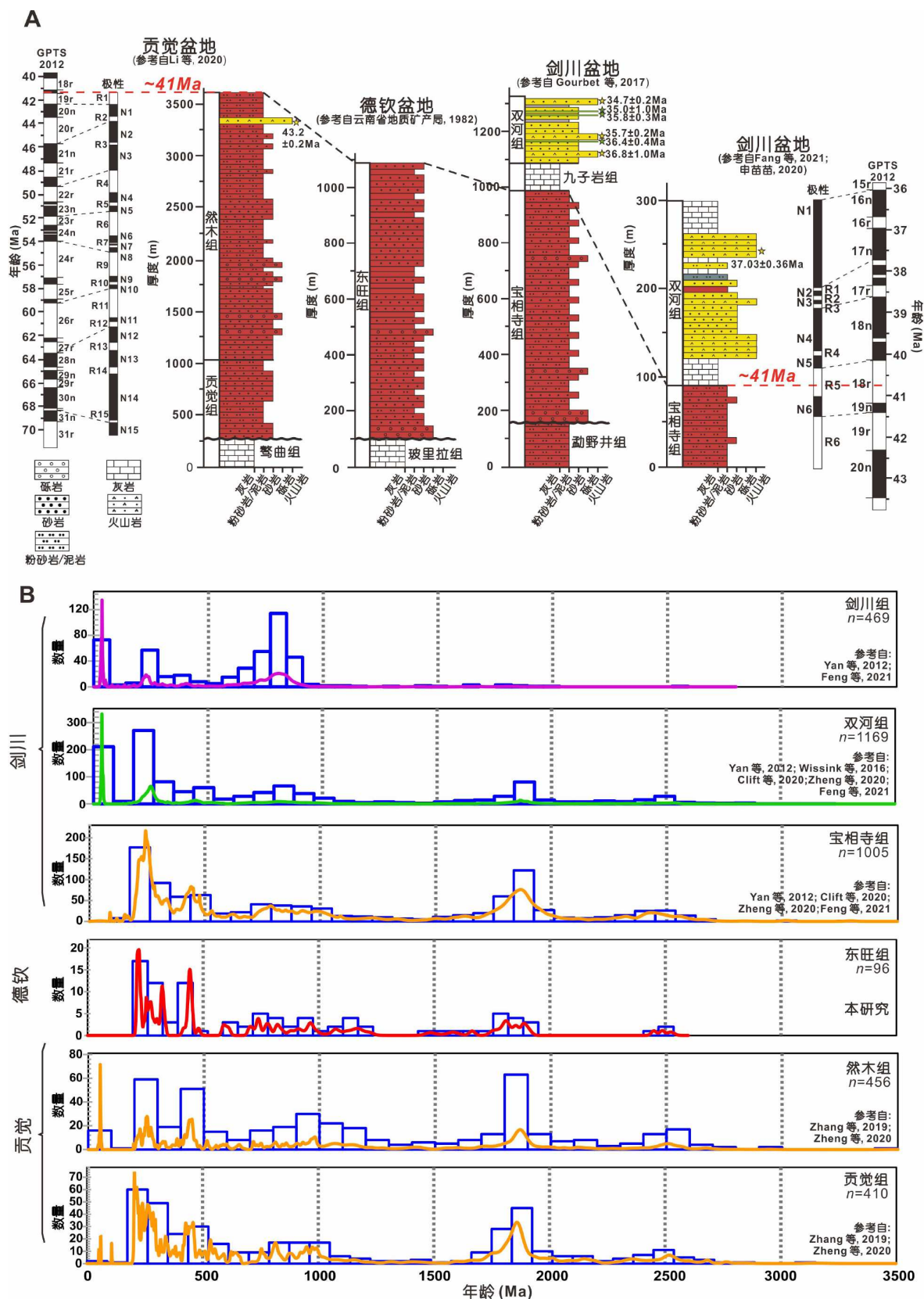


图8 德钦及邻区早新生代地层年龄对比图。(A) 贡觉、德钦及剑川盆地新生代地层综合柱状对比图(修改自云南省地质矿产局, 1982; Gourbet等, 2017; Fang等, 2020; Li等, 2020; 申苗苗, 2020); (B) 剑川、德钦与贡觉盆地碎屑锆石年龄谱图。锆石U-Pb年代学数据来源列于图右侧, n 为锆石颗粒数。图表使用Isoplot 4.0软件绘制(Ludwig, 2012)

2017a, 2020; Zhang等, 2020; Xu等, 2024b)。通过详细分析地质图可以发现, 白马剖面邻近具有左行走滑性质的中甸断裂, 断裂带附近南北走向的地层被错动了约20 km, 并沿断裂带逐渐转变为北西-南东走向(图2A和9A)。类似于阿尔及走滑断裂(Li等, 2021), 该地层走向的弯曲变化很可能与中甸断裂的左行走滑所引起的挤压拖曳作用有关。若假设旋转欧拉极位于东旺组地层弯曲的拐点处(图2A), 根据该剖面记录的约50°逆时针旋转量, 可推算得到约24 km的走滑位移量(图9B), 与中甸断裂附近实际观测到的约20 km位移基本吻合。因此, 白马剖面所记录的约50°逆时针旋转很可能源于中甸断裂左行走滑导致的挤压拖曳效应。东旺组的年代不晚于41 Ma, 表明中甸断裂的左行走滑活动应起始于晚始新世之后, 这与构造地质学估算的时间接近(Wang和Burchfiel, 2000; Burchfiel和Wang, 2003), 同时也与哀牢山-红河断裂的活动时期基本一致。

羊拉剖面记录的 $10.4^{\circ} \pm 6.9^{\circ}$ 顺时针旋转幅度显著小于青藏高原东南缘大多数地区(如邻近的芒康、兰坪等地)所报道的约50°–70°顺时针旋转幅度(Sato等, 2001; 杨向东等, 2020; Xu等, 2024a, 2024b)。尽管羊拉地区的地层和断层走向与芒康、兰坪一带均为近南北向(图2A), 后者的构造方向被认为形成于晚始新世(Xu等, 2024a, 2024b)。类似的地层走向也可能暗示羊拉地区曾发生过较大幅度的旋转, 但该剖面目前仅观测到小幅度的旋转, 其成因可能为局部旋转作用的结果, 但具体形成机制尚需未来更多的研究解释。

4.2.2 纬向位移

羊拉剖面经E/I校正后的磁倾角为 $+53.9^{\circ}$ (置信区间 49° – 65° ; 图7A), 对应古纬度为 34.4°N 。与德钦地区的现今纬度相比, 相对于欧亚参考极(Vaes等, 2024)发生了约 $50^{\circ} \pm 700\text{ km}$ 的南向位移, 表明自晚始新世以来, 德钦地区未发生明显的纬向运移。

4.3 青藏高原东南缘东南向挤出逃逸的最北边界

羌塘-兰坪-思茅地块是青藏高原东南缘的核心构造单元。根据它们在岩性、构造序列(云南省地质矿产局, 1982, 1996)、早二叠世动植物群(Metcalf, 2013)以及早二叠世至晚三叠世古纬度(Yan等, 2019; Guan等, 2021; Yu等, 2022)等方面的相似特征, 普遍认为该构造单元在新生代变形前是一个连续、近东西走向直线状的地质带。在其南段的兰坪-思茅地块, 在渐新世至早中新世期间沿哀牢山-红河断裂发生东南向的挤出逃逸, 基于断层两侧地质标志(Leloup等, 1995; Chung等, 1997)、

古地磁数据(Tong等, 2013; Li等, 2017b)及南海扩张重建结果(Mazur等, 2012), 其逃逸距离估计约为250–700 km(Tapponnier等, 1982; Harrison等, 1996; Leloup等, 2001; Zhang等, 2014; Li等, 2017b; Tong等, 2021)。另一方面, 在羌塘地块东部, 已有晚白垩世古地磁数据显示约 $900^{\circ} \pm 300\text{ km}$ 的南向位移(Ma等, 2024)。由于该运动很可能发生在晚白垩世至晚始新世之间, 超出本研究关注时段, 因此未纳入后续分析范围。而其他古地磁研究指出羌塘地块东部在始新世之后曾发生北向位移, 但其位移量存在明显差异: 分别有 $1700^{\circ} \pm 400$ (Fu等, 2022)、 $1300^{\circ} \pm 400$ (Tong等, 2017; Vaes等, 2021)、 $700^{\circ} \pm 400$ (Zhang等, 2020)、 $600^{\circ} \pm 300$ (Zhang等, 2023)以及 $200^{\circ} \pm 700\text{ km}$ (Xu等, 2024b)等不同估计(图9A)。

考虑到上述数据之间存在显著差异, 本研究重新评估了这些结果的可靠性。首先, 杂多盆地侏罗纪灰岩中的始新世重磁化数据指示约 $1700^{\circ} \pm 400\text{ km}$ 的北向位移(Fu等, 2022); 然而, 该古地磁年代主要基于与羌塘东部侏罗纪-新生代方向的对比, 其时代约束较弱, 因此数据所揭示的北向运动幅度和时代的可靠性需进一步验证。其次, 贡觉盆地和囊谦盆地沉积红层的E/I校正分别指示约 $1300^{\circ} \pm 400$ (Tong等, 2017)和 $700^{\circ} \pm 400\text{ km}$ (Zhang等, 2020)的北向位移。然而, 由于这些地层记录了超过20°的多阶段旋转(Li等, 2020; Zhang等, 2020)以及显著的始新世纬向运动(van Hinsbergen等, 2011, 2019), 所造成的偏角与倾角离散可能影响E/I校正的准确性(Vaes等, 2021)。Vaes等(2021)对贡觉盆地剖面中尺度较短且无旋转阶段的数据进行重新分析, 得到了“A级”E/I校正结果, 显示早始新世以来约1300 km的北向位移; 但所使用古地磁方向仅有129个, 低于E/I校正一般要求的最低样本量(通常为100–150个)(Tauxe等, 2008), 因此该校正结果仍可能存在偏差。此外, 在贡觉盆地基于磁化率各向异性进行的磁倾角浅化校正虽与E/I校正结果相似(Tong等, 2017), 但与下文总结的地质证据差异较大。综合以上分析, 贡觉与囊谦沉积剖面的古地磁数据可能难以可靠反映晚始新世以来的纬向位移。需结合高质量的火山岩古地磁数据, 进一步厘清该区域的古纬度演化过程。

邻近芒康盆地火山岩的古地磁研究为该区古纬度演化提供了更直接的约束, 因为这些岩石不受倾角浅化影响。已有结果显示, 该地区自~40 Ma以来可能发生了 $600^{\circ} \pm 300\text{ km}$ 的北向位移(Zhang等, 2023), 或自~33–36 Ma以来发生了 $200^{\circ} \pm 700\text{ km}$ 的北向位移(Xu等, 2024b)。其中, Zhang等(2023)的数据来自侵入岩体, 由于缺乏岩体就位后发生地层倾斜的证据, 研究中未进行地层校正, 这在此类情况下也是常规做法。相比之

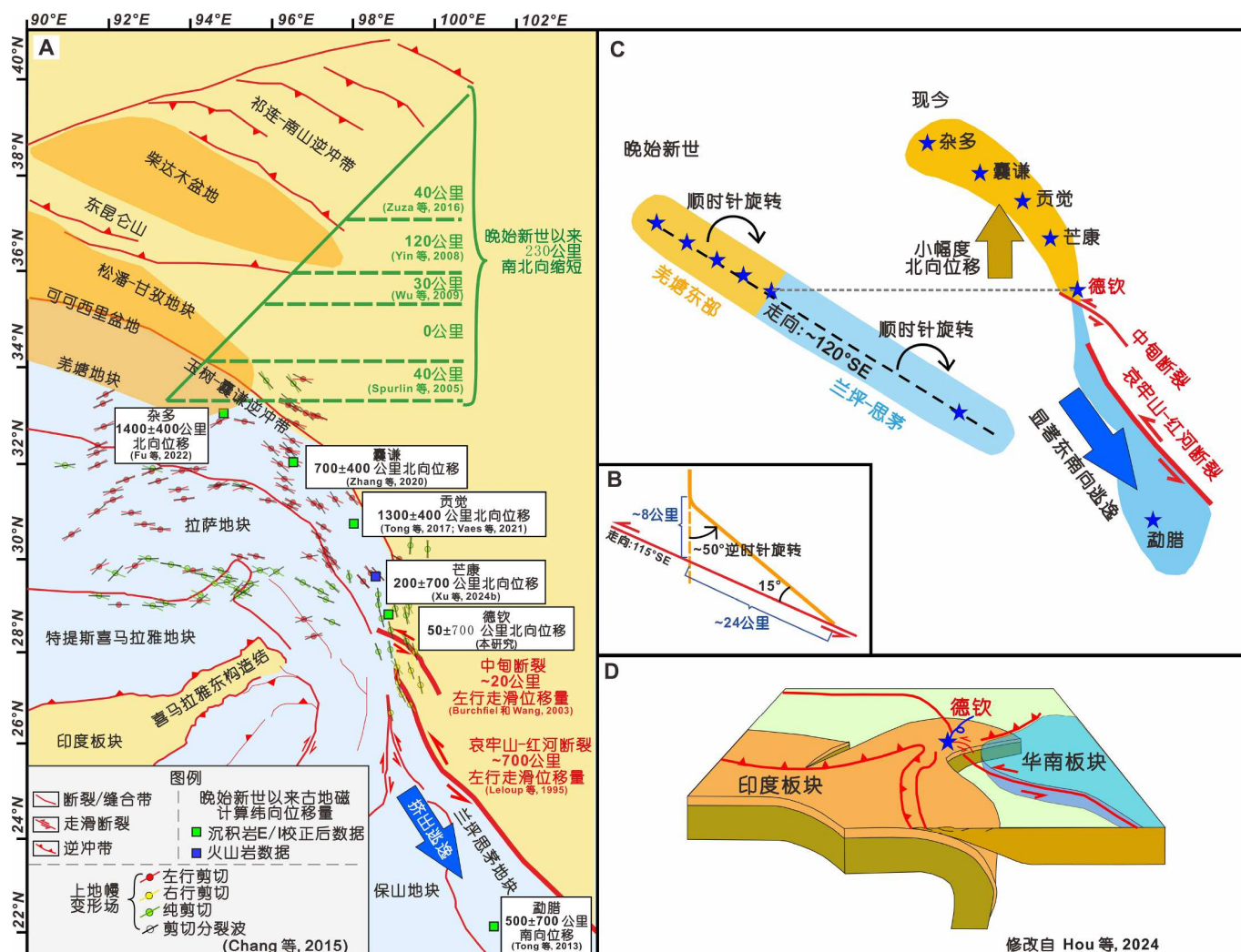


图9 青藏高原东南缘晚始新世以来构造变形示意图。(A) 青藏高原东南缘南北部纬向位移量总结与上地幔变形场；(B) 基于古地磁旋转变量计算中甸断裂走滑量示意图；(C) 青藏高原东南缘南北部反向移动示意图，其中德钦为东南向挤出逃逸的最北边界；(D) 印度板块以德钦为界南北不同俯冲方向示意图

下, Xu等(2024b)的数据来自已发生构造倾斜的粗面岩与凝灰岩层, 其方向通过了褶皱检验, 并已平均掉古地磁场长期变化的影响。尽管两套数据在误差范围内基本一致, 但考虑到青藏高原东南部属于强烈变形区域, 在表面未明显变形的单元中仍可能存在未被识别的构造倾斜, 因此本研究更倾向于采纳Xu等(2024b)经过地层倾斜校正的结果。该结果表明, 青藏高原东南部北段的北向位移量级可能为数百公里以内, 而非先前认为的一千公里以上。我们在德钦地区获得的 $\sim 50 \pm 700$ km南向位移估计值与芒康地区的结果在量级上相近, 共同指示自晚始新世以来该区域整体的纬向位移可能较为有限。然而, 受古地磁方法本身较大误差范围的限制, 确切的位移量仍存在不确定性。

为进一步评估芒康和德钦古地磁结果所指示的有限

纬向位移是否可靠, 本研究系统汇总了已发表的晚始新世以来羌塘地块东部及其以北地区的构造缩短量估算, 涉及范围包括囊谦-玉树逆冲带、可可西里盆地、东昆仑山、柴达木盆地及祁连-南山等构造单元(图9A)。若羌塘地块东部的北向位移确实较小, 则上述地区应同样表现为相对有限的构造缩短量。

基于平衡剖面恢复, 囊谦-玉树逆冲带记录了约60 km的北东-南西向缩短, 相当于始新世至新近纪期间约40 km的南北向缩短(Spurlin等, 2005)。由于难以从中单独分离出晚始新世以来的缩短分量, 本研究采用该南北向缩短量的最大值(约40 km)进行估算。可可西里盆地的主要缩短发生在始新世(Staisch等, 2016); 因本研究仅关注始新世之后的缩短, 故未纳入该早期阶段的缩短量。在更北部的东昆仑山地区, 根据逆冲断裂带的构造恢复,

其在26至14 Ma期间经历了约30 km的南北向缩短(Wu等, 2009)。柴达木盆地的新生代缩短表现为北北东-南南西方向,地震剖面解译显示其缩短率从东部的超过48%向西逐渐减小至不足1%(Yin等, 2008)。同样由于始新世后缩短量难以精确分离(Zhou等, 2006),本研究采用最大缩短率48%进行分析,相当于约140 km的北北东-南南西向缩短或约120 km的南北向缩短。在祁连-南山地区,综合地表地质、地震资料与区域构造历史的分析表明,该区存在约50 km的北北东-南南西向缩短(Zuza等, 2016),对应自 40 ± 10 Ma以来约40 km的南北向缩短(Jolivet等, 2001)。综合以上估算,羌塘地体东部以北地区在晚始新世以来的南北向总缩短量约为230 km,该结果与芒康地区火山岩所推断的 200 ± 700 km北向位移量(Xu等, 2024b)在误差范围内基本一致。

综上所述,青藏高原东南缘北部自晚始新世以来仅发生有限幅度的北向位移,而南部则沿哀牢山-红河断裂发生显著的东南向挤出逃逸,两者形成鲜明对比。那么,这两部分以不同方向运动的构造边界何在?基于本研究获得的新古地磁数据,位于上述两区域之间的德钦地区未表现出显著的纬向运动。此外,中甸断裂的左行走滑位移使其两侧石炭-二叠纪标志层错断约20 km,可能正是调节南、北两段反向运动的小规模解耦。因此,本研究认为德钦地区很可能构成了青藏高原东南部晚始新世后东南向挤出的最北边界(图9C)。

那么,何种运动机制能够产生这种相反方向的运动?已有古地磁证据表明,青藏高原东南部在晚始新世曾呈相对线性的条带状展布(Xu等, 2024a),随后经历了区域规模的顺时针旋转(Chen等, 1995; Sato等, 2001; Tong等, 2013; Gao等, 2015; Li等, 2017a; Xu等, 2024b)。若将德钦视为该旋转的中心(欧拉极),则旋转作用自然会导致北段向北移动、南段向南移动,而中甸断裂则在此过程中调节了南北两段的差异运动(图9C)。

地球物理观测同样支持德钦地区南北两侧的变形模式存在显著差异。剪切波分裂与地表形变场的对比分析表明,上地幔变形在德钦附近发生明显转变: 30°N 以北西-南东向左行剪切为主导, $28^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$ 之间以北北西-南南东向纯剪切为主,而 28°N 以南则表现为北北西-南南东向右行剪切(图9A; Sol等, 2007; León Soto等, 2012; Chang等, 2015)。最近的多尺度地震层析成像研究进一步揭示,青藏高原东南部下方的印度板块岩石圈地幔沿约 26°N 发生垂直撕裂,导致北侧板片向东北方向俯冲,南侧板片向东南方向俯冲(图9D; Hou等, 2024)。该板片撕裂过程可能驱动上覆板块发生相向位移,并促使德钦地区发育小尺度的局部岩石圈破裂。

5 结论

本研究对德钦地区东旺组羊拉剖面(24个采点)与白马剖面(12个采点)开展了系统的古地磁研究。详细的岩石磁学、岩相学、热退磁分析、倒转检验及褶皱检验结果表明,所获得的特征剩磁方向为原生剩磁。通过区域岩性对比与碎屑锆石物源分析,本研究认为东旺组沉积于晚始新世之前。白马剖面采点平均方向($D_s=314.2^\circ$, $I_s=+42.8^\circ$, $k=23.3$, $\alpha_{95}=9.2^\circ$)指示了约 50° 的逆时针旋转,可能与左行走滑的中甸断裂的挤压拖曳作用有关;而羊拉剖面采点剩磁方向平均($D_s=19.7^\circ$, $I_s=+49.1^\circ$, $k=85.1$, $\alpha_{95}=3.2^\circ$)揭示的小幅度顺时针旋转则可能反映局部构造变形。经E/I磁倾角浅化校正,得到德钦地区在晚始新世的古纬度为约 34.4°N ,表明该地区自晚始新世以来未发生显著的纬向位移,即青藏高原东南缘中部在纬度上基本保持稳定。综合现有古地磁与构造地质证据,青藏高原东南缘北段晚始新世之后仅经历了有限的北向位移,而南段则发生了显著的东南向挤出逃逸。因此,德钦地区构成了晚始新世后东南向挤出逃逸的北界。德钦南北两侧的反向位移模式,可能是通过该区域晚始新世以来围绕位于德钦附近的欧拉极发生区域性顺时针旋转所致。

致谢 感谢岳雅慧和谢静在实验过程中给予的帮助。同时感谢John GEISSMAN教授以及两位匿名审稿专家在审稿过程中付出的辛勤努力及提出的宝贵意见,他们的建设性建议对本稿件的完善起到了关键作用。原始数据获得也可访问“国家青藏高原科学数据中心”(https://data.tpdc.ac.cn/en/disallow/8dca744f-9152-4b3b-b381-1e234bf3e50e; https://data.tpdc.ac.cn/en/disallow/971f9793-00bd-4c9a-b3f9-718f4e7b6985)。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责,详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

参考文献

- 云南省地质矿产局. 1982. 中华人民共和国地质图-古学幅及地质报告(比例尺1:200000)
- 云南省地质矿产局. 1996. 云南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 218
- 申苗苗. 2020. 云南剑川和曲靖盆地始新世地层岩石磁学记录和环境变化. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学
- 杨向东, 全亚博, 王恒, 等. 2020. 青藏高原东南缘兰坪——思茅地体晚始新世以来差异性地壳变形的成因讨论. 地质评论, 69: 853–873
- Burchfiel B C, Wang E. 2003. Northwest-trending, middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance. *J Struct Geol*, 25: 781–792
- Cao K, Tian Y, van der Beek P, et al. 2022. Southwestward growth of

- plateau surfaces in eastern Tibet. *Earth-Sci Rev*, 232: 104160
- Chang L, Flesch L M, Wang C, et al. 2015. Vertical coherence of deformation in lithosphere in the eastern Himalayan syntaxis using GPS, Quaternary fault slip rates, and shear wave splitting data. *Geophys Res Lett*, 42: 5813–5819
- Chauvin A, Perroud H, Bazhenov M L. 1996. Anomalous low palaeomagnetic inclinations from Oligocene-Lower Miocene red beds of the south-west Tien Shan, Central Asia. *Geophys J Int*, 126: 303–313
- Chen H H, Dobson J, Heller F, et al. 1995. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the Simao region since the Cretaceous: A consequence of India-Asia collision. *Earth Planet Sci Lett*, 134: 203–217
- Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geology*, 25: 311–314
- Clift P D, Carter A, Wysocka A, et al. 2020. A late Eocene-Oligocene through-flowing river between the Upper Yangtze and South China Sea. *Geochem Geophys Geosyst*, 21: 2020GC009046
- Deng J, Wang Q, Gao L, et al. 2020. Differential crustal rotation and its control on giant ore clusters along the eastern margin of Tibet. *Geology*, 49: 428–432
- Dunlop D, Ozdemir O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. New York: Cambridge University Press
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 94: 17561–17579
- Fang X, Dupont-Nivet G, Wang C, et al. 2020. Revised chronology of central Tibet uplift (Lunpola Basin). *Sci Adv*, 6: eaba7298
- Fang X, Yan M, Zhang W, et al. 2021. Paleogeography control of Indian monsoon intensification and expansion at 41 Ma. *Sci Bull*, 66: 2320–2328
- Feng Y, Song C, He P, et al. 2021. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Jianchuan Basin, southeastern Tibetan Plateau, and its implications for tectonic and paleodrainage evolution. *Terra Nova*, 33: 560–572
- Fu Q, Yan M, Dekkers M J, et al. 2022. Remagnetization of the Jurassic limestones in the Zaduo area, Eastern Qiangtang Terrane (Tibetan Plateau, China): Implications for the India-Eurasia collision. *Geophys J Int*, 228: 2073–2091
- Gao L, Yang Z, Tong Y, et al. 2015. New paleomagnetic studies of Cretaceous and Miocene rocks from Jinggu, western Yunnan, China: Evidence for internal deformation of the Lanping-Simao Terrane. *J Geodyn*, 89: 39–59
- Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, et al. 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *J Geophys Res*, 108: 2127
- Gourbet L, Leloup P H, Paquette J L, et al. 2017. Reappraisal of the Jianchuan Cenozoic basin stratigraphy and its implications on the SE Tibetan Plateau evolution. *Tectonophysics*, 700–701: 162–179
- Guan C, Yan M, Zhang W, et al. 2021. Paleomagnetic and chronologic data bearing on the Permian/Triassic boundary position of Qamdo in the Eastern Qiangtang Terrane: Implications for the closure of the Paleo-Tethys. *Geophys Res Lett*, 48: 2020GL092059
- Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, et al. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press. 208–226
- Hou Z, Liu L, Zhang H, et al. 2024. Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau controlled by tearing of the Indian slab. *Nat Geosci*, 17: 255–263
- Jiang Z, Liu Q, Dekkers M J, et al. 2015. Acquisition of chemical remanent magnetization during experimental ferrihydrite-hematite conversion in Earth-like magnetic field—Implications for paleomagnetic studies of red beds. *Earth Planet Sci Lett*, 428: 1–10
- Johnson C L, Constable C G, Tauxe L, et al. 2008. Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows. *Geochem Geophys Geosyst*, 9: 2007GC001696
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, et al. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343: 111–134
- Kirschvink J L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys J Int*, 62: 699–718
- Koymans M R, Langereis C G, Pastor-Galán D, et al. 2016. Paleomagnetism.org: An online multi-platform open source environment for paleomagnetic data analysis. *Comput Geosci*, 93: 127–137
- Lacassin R, Schärer U, Leloup P H, et al. 1996. Tertiary deformation and metamorphism SE of Tibet: The folded Tiger-leap décollement of NW Yunnan, China. *Tectonics*, 15: 605–622
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *J Geophys Res*, 106: 6683–6732
- Leloup P H, Tapponnier P, Lacassin R, et al. 2007. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. *J Geol Soc*, 164: 1253–1260
- Li B, Yan M, Zhang W, et al. 2021. Two-stage strike-slip faulting of the Altyn Tagh Fault revealed by magnetic fabrics in the Qaidam Basin. *Tectonophysics*, 821: 229142
- Li S, Yang Z, Deng C, et al. 2017a. Clockwise rotations recorded in redbeds from the Jinggu Basin of northwestern Indochina. *Geol Soc Am Bull*, 129: 1100–1122
- Li S, Advokaat E L, van Hinsbergen D J J, et al. 2017b. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic-Cenozoic paleolatitudinal and rotational history of Indochina and South China: Review and updated kinematic reconstruction. *Earth-Sci Rev*, 171: 58–77
- Li S, van Hinsbergen D J J, Najman Y, et al. 2020. Does pulsed Tibetan deformation correlate with Indian Plate motion changes? *Earth Planet Sci Lett*, 536: 116144
- Liu J, Chen X, Tang Y, et al. 2019. The Ailao Shan-Red River shear zone revisited: Timing and tectonic implications. *GSA Bull*, 132: 1165–1182
- Liu-Zeng J, Zhang J, McPhillips D, et al. 2018. Multiple episodes of fast exhumation since Cretaceous in southeast Tibet, revealed by low-temperature thermochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 490: 62–76
- Ludwig K R. 2012. User's manual for Isoplot 3.75: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronol Cent Spec Publ, 5: 1–75
- Ma J, Yang T, Han F, et al. 2024. New Late Cretaceous paleomagnetic results from the eastern Qiangtang terrane: Implications for the postcollisional extrusion and convergence of the southeastern Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 51: e2024GL112055
- Mazur S, Green C, Stewart M G, et al. 2012. Displacement along the Red River Fault constrained by extension estimates and plate reconstructions. *Tectonics*, 31: TC5008
- Maxbauer D P, Feinberg J M, Fox D L. 2016. MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions. *Comput Geosci*, 95: 140–145
- McFadden P L. 1990. A new fold test for palaeomagnetic studies. *Geophys J Int*, 103: 163–169
- McFadden P L, McElhinny M W. 1990. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys J Int*, 103: 725–729
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *J Asian Earth Sci*, 66: 1–33

- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189: 419–426
- Nie J, Ruetenik G, Gallagher K, et al. 2018. Rapid incision of the Mekong River in the middle Miocene linked to monsoonal precipitation. *Nat Geosci*, 11: 944–948
- Sato K, Liu Y, Zhu Z, et al. 2001. Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China: Further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 185: 185–198
- Schärer U, Zhang L S, Tapponnier P. 1994. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River belt, China. *Earth Planet Sci Lett*, 126: 379–397
- Sol S, Meltzer A, Bürgmann R, et al. 2007. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy. *Geology*, 35: 563–566
- León Soto G, Sandvol E, Ni J F, et al. 2012. Significant and vertically coherent seismic anisotropy beneath eastern Tibet. *J Geophys Res*, 117: B05308
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, et al. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet. *Geol Soc Am Bull*, 117: 1293
- Staisch L M, Niemi N A, Clark M K, et al. 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: 862–895
- Tanaka K, Mu C, Sato K, et al. 2008. Tectonic deformation around the eastern Himalayan syntaxis: Constraints from the Cretaceous palaeomagnetic data of the Shan-Thai Block. *Geophys J Int*, 175: 713–728
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611–616
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Tauxe L, Watson G S. 1994. The fold test: An eigen analysis approach. *Earth Planet Sci Lett*, 122: 331–341
- 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? In: Channell J E T, Kent D V, Lowrie W, et al., eds. *Timescales of the Paleomagnetic Field*. Washington: American Geophysical Union. 101–116
- Tauxe L, Kodama K P, Kent D V. 2008. Testing corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: A comparative approach. *Phys Earth Planet Inter*, 169: 152–165
- Tauxe L. 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley: University of California Press
- Tong Y, Yang Z, Mao C, et al. 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 Planet Sci Lett*, 475: 1–14
- Tong Y, Yang Z, Pei J, et al. 2021. Crustal clockwise rotation of the southeastern edge of the Tibetan Plateau since the late Oligocene. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: 2020JB020153
- Tong Y B, Yang Z, Zheng L D, et al. 2013. Internal crustal deformation in the northern part of Shan-Thai Block: New evidence from paleomagnetic results of Cretaceous and Paleogene redbeds. *Tectonophysics*, 608: 1138–1158
- Turner M B, Cronin S J, Stewart R B, et al. 2008. Using titanomagnetite textures to elucidate volcanic eruption histories. *Geology*, 36: 31–34
- Vaes B, Li S, Langereis C G, et al. 2021. Reliability of palaeomagnetic poles from sedimentary rocks. *Geophys J Int*, 225: 1281–1303
- Vaes B, van Hinsbergen D J J, Paridaens J. 2024. APWP-online.org: A global reference database and open-source tools for calculating apparent polar wander paths and relative paleomagnetic displacements. *Tektonika*, 2: 173–188
- van Hinsbergen D J J, Kapp P, Dupont-Nivet G, et al. 2011. Restoration of Cenozoic deformation in Asia and the size of Greater India. *Tectonics*, 30: TC5003
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, et al. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 7659–7664
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li S, et al. 2019. Reconstructing Greater India: Paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives. *Tectonophysics*, 760: 69–94
- Wang E, Burchfiel B C. 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau. *GSA Bull*, 112: 413–423
- Wang X, Metcalfe I, Jian P, et al. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *J Asian Earth Sci*, 18: 675–690
- Wissink G K, Hoke G D, Garzzone C N, et al. 2016. Temporal and spatial patterns of sediment routing across the southeast margin of the Tibetan Plateau: Insights from detrital zircon. *Tectonics*, 35: 2538–2563
- Wu Z, Ye P, Patrick B J, et al. 2009. Late Oligocene-Early Miocene thrusting in southern East Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau. *J Earth Sci*, 20: 381–390
- Xu W, Zhang D, Yan M, et al. 2024a. Moderate magnitude clockwise rotation of the Yunlong Basin: Implications for synchronous Eocene rotation of the southeastern Tibetan Plateau. *GSA Bull*, 136: 4565–4578
- Xu W, Yan M, van Hinsbergen D J J, et al. 2024b. 50° Post-Eocene clockwise rotation of Mangkang and its implications for the oroclinal bending of the southeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Res*, 129: 23–35
- Yan M, Van der Voo R, Tauxe L, et al. 2005. Shallow bias in Neogene palaeomagnetic directions from the Guide Basin, NE Tibet, caused by inclination error. *Geophys J Int*, 163: 944–948
- Yan M, Zhang D, Fang X, et al. 2016. Paleomagnetic data bearing on the Mesozoic deformation of the Qiangtang Block: Implications for the evolution of the Paleo- and Meso-Tethys. *Gondwana Res*, 39: 292–316
- Yan Y, Carter A, Huang C, et al. 2012. Constraints on Cenozoic regional drainage evolution of SW China from the provenance of the Jianchuan Basin. *Geochem Geophys Geosyst* 13: Q03001
- Yan Y, Zhao Q, Zhang Y, et al. 2019. Direct paleomagnetic constraint on the closure of Paleo-Tethys and its implications for linking the Tibetan and Southeast Asian blocks. *Geophys Res Lett*, 46: 14368–14376
- Yang Z, Yin J, Sun Z, et al. 2001. Discrepant Cretaceous paleomagnetic poles between Eastern China and Indochina: A consequence of the extrusion of Indochina. *Tectonophysics*, 334: 101–113
- Yin A, Dang Y Q, Zhang M, et al. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction. *GSA Bull*, 120: 847–876
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yu L, Yan M, Domeier M, et al. 2022. New paleomagnetic and chronological constraints on the Late Triassic position of the Eastern Qiangtang Terrane: Implications for the closure of the Paleo-Jinshajiang Ocean. *Geophys Res Lett*, 49: 2021GL096902
- Yuan J, Yang Z, Deng C, et al. 2021. Rapid drift of the Tethyan Himalaya

- terrane before two-stage India-Asia collision. *Natl Sci Rev*, 7: nwaal73
- Yuan J, Deng C, Yang Z, et al. 2022. Triple-stage India-Asia collision involving arc-continent collision and subsequent two-stage continent-continent collision. *Glob Planet Change*, 212: 103821
- Zhang B, Zhang J, Liu J, et al. 2014. The Xuelongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone. *J Struct Geol*, 69: 209–233
- Zhang L S, Schärer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China. *Contrib Mineral Petrol*, 134: 67–85
- Zhang W, Fang X, Zhang T, et al. 2020. Eocene rotation of the northeastern central Tibetan Plateau indicating stepwise compressions and eastward extrusions. *Geophys Res Lett*, 47: 2020GL088989
- Zhang Y, Huang W, Zhang Y, et al. 2019. Detrital zircon provenance comparison between the Paleocene-Eocene Nangqian-Xialaxiu and Gongjue basins: New insights for Cenozoic paleogeographic evolution of the eastern Tibetan Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 533: 109241
- Zhang Z, Tong Y, Jin S, et al. 2023. Paleomagnetic constraint on the formation of the Eastern Himalayan Syntaxis: A new late Eocene result from the Mangkang area of the eastern Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 603: 117974
- Zheng H, Clift P D, He M, et al. 2020. Formation of the First Bend in the late Eocene gave birth to the modern Yangtze River, China. *Geology*, 49: 35–39
- Zhou J, Xu F, Wang T, et al. 2006. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics. *Earth Planet Sci Lett*, 243: 195–210
- Zijderveld J D A. 1967. AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In: Collinson D W, Creer K M, Runcorn S K, eds. *Methods in Paleomagnetism*. New York: Elsevier. 254–286
- Zuza A V, Cheng X, Yin A. 2016. Testing models of Tibetan Plateau formation with Cenozoic shortening estimates across the Qilian Shan-Nan Shan thrust belt. *Geosphere*, 12: 501–532

(责任编辑：万博)