



地质力学学报  
Journal of Geomechanics  
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊  
CSCD 来源期刊（核心库）

## 《地质力学学报》预出版论文

论文题目：泰国北碧府上新世玄武岩柱的冷却过程研究

作者：周恩雄，闫永刚，来振洋，李旦欣，付亚兰，邓晓泰，  
ANCHANA Thanakan, VEERAVINANTANAKUL Apivut, CHARUSIRI  
Punya, 王伟涛，黄宝春，张培震

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025169

投稿时间：2025-11-13

录用时间：2026-04-17

预出版时间：2026-05-08

### 预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

# 泰国北碧府上新世玄武岩柱的冷却过程研究

周恩雄<sup>1,2</sup>, 闫永刚<sup>1,2</sup>, 来振洋<sup>1,2</sup>, 李旦欣<sup>1,2</sup>, 付亚兰<sup>1,2</sup>, 邓晓泰<sup>1,2</sup>, Anchana Thanakan<sup>3,4</sup>,

Veeravinantanakul Apivut<sup>3</sup>, Charusiri Punya<sup>4,5</sup>, 王伟涛<sup>1,2</sup>, 黄宝春<sup>6</sup>, 张培震<sup>1,2</sup>

ZHOU Enxiong<sup>1,2</sup>, YAN Yonggang<sup>1,2</sup>, LAI Zhenyang<sup>1,2</sup>, LI Danxin<sup>1,2</sup>, FU Yalan<sup>1,2</sup>, DENG Xiaotai<sup>1,2</sup>, ANCHANA Thanakan<sup>3,4</sup>, VEERAVINANTANAKUL Apivut<sup>3</sup>, CHARUSIRI Punya<sup>4,5</sup>, WANG Weitao<sup>1,2</sup>, HUANG Baochun<sup>6</sup>, ZHANG Peizhen<sup>1,2</sup>

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

3. School of Interdisciplinary Study, Mahidol University Kanchanaburi Campus, Kanchanaburi 71150, Thailand;

4. Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand;

5. Department of Mineral Resources, Rama VI Rd., Thung Phrayathai, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand;

6. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai, 519082, Guangdong, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai, 519082, Guangdong, China

3. School of Interdisciplinary Study, Mahidol University Kanchanaburi Campus, Kanchanaburi, 71150, Thailand

4. Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

5. Department of Mineral Resources, Rama VI Rd., Thung Phrayathai, Ratchathewi, Bangkok, 10400, Thailand

6. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China

## Study on the cooling history of Pliocene basalt columns in Kanchanaburi, Thailand

**Abstract:** [Objective] Columnar joints in basalt are typical structures formed during magmatic cooling and contraction. However, their formation mechanisms, internal structures, and cooling histories remain debated. This study aims to constrain the internal structure and cooling history of large basalt columns using integrated rock magnetic and paleomagnetic methods. [Methods] Detailed rock magnetic and paleomagnetic analyses were conducted on 49 oriented samples collected from two Pliocene basalt columns (up to 1.5 m in diameter) in the Bo Phloi section, Kanchanaburi, Thailand. Rock magnetic experiments include hysteresis loops, isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition, first-order reversal curve (FORC) analysis, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), and temperature-dependent magnetic susceptibility measurements. Stepwise thermal demagnetization was used to isolate stable remanent magnetization components. [Results] Hysteresis loops and IRM acquisition curves show saturation below ~300 mT and a two-stage increase with increasing field, indicating contributions from magnetic components with different coercivities. FORC diagrams confirm pseudo-single-domain (PSD)-dominated magnetic domain states, with systematic differences

基金项目: 国家自然科学基金(42030301, 42172223, 42574078, 42494913); 国家重点研发项目(2025YFF0811603, 2023YFC3008603)

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42030301, 42172223, 42574078, and 42494913) and the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2025YFF0811603 and 2023YFC3008603)

第一作者: 周恩雄 (2002—), 男, 在读硕士, 研究方向为构造地质学。Email: zhouenx@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 闫永刚 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事古地磁学与构造磁学研究。Email: yanyongg@mail.sysu.edu.cn

between column margins and interiors. AMS results show that both basalt columns are characterized by sub-vertical minimum susceptibility axes ( $K_3$ ) and sub-horizontal maximum ( $K_1$ ) and intermediate ( $K_2$ ) axes, with generally low anisotropy degrees ( $P_j < 1.05$ ), indicating a primary near-horizontal magma flow fabric during emplacement and no evidence for vertical melt migration or internal convection. AMS parameters further reveal systematic spatial variations: marginal samples exhibit lower magnetic susceptibility ( $K_m$ ), lineation ( $L$ ), and anisotropy degree ( $P_j$ ), with predominantly oblate fabrics ( $T > 0$ ), whereas interior samples show higher  $K_m$ ,  $L$ , and  $P_j$  values and predominantly prolate fabrics ( $T < 0$ ). These differences reflect contrasting cooling conditions, with rapid cooling at the margins and slower cooling in the interiors. During magma solidification, the margins of the basalt columns experienced faster cooling, resulting in shorter time available for crystallization and preferred orientation of magnetic minerals, and consequently lower magnetic susceptibility and anisotropy. In contrast, the interior portions cooled more slowly and likely remained in a high-temperature plastic or partially molten state for a longer period, allowing magnetic minerals to crystallize more completely, become concentrated, and align under thermal contraction stress. Paleomagnetic results indicate that thermal demagnetization isolates stable single-component remanence carried by PSD titanomagnetite. Six marginal samples from basalt column A exhibit more scattered virtual geomagnetic pole (VGP) distributions and anomalous directions, whereas the remaining 43 samples show relatively clustered VGPs after tilt correction. Systematic variations in remanent magnetization directions and VGPs indicate that cooling did not proceed symmetrically or uniformly from the margins toward the cores, but rather followed an asymmetric, unidirectional regional cooling pattern, which was likely influenced by a localized heat source. **[Conclusions]** Based on integrated rock magnetic and paleomagnetic analyses, the main conclusions are summarized as follows. (1) The basalt columns from Kanchanaburi are dominated by pseudo-single-domain (PSD) titanomagnetite, and AMS fabrics with sub-vertical  $K_3$  and sub-horizontal  $K_1$  and  $K_2$  axes indicate a primary near-horizontal magma flow during emplacement. (2) Marginal zones cooled faster, producing finer magnetic grains, lower anisotropy, and oblate fabrics, whereas interior zones cooled more slowly, allowing stronger magnetic alignment and higher anisotropy with predominantly prolate fabrics. (3) Systematic variations in paleomagnetic directions and VGPs from 49 samples indicate that post-jointing cooling was not uniform or symmetric, but instead proceeded as an asymmetric, unidirectional process across the basalt columns. **[Significance]** This study contributes to a better understanding of the cooling process of basaltic lava and provides new insights into geomagnetic secular variation. **Keywords:** basalt columnar joints; paleomagnetism; rock magnetism; cooling history

**摘要:** 玄武岩柱状节理是岩浆冷凝收缩过程中形成的典型构造, 其成因机制、内部结构特征及冷却历史存在较大争议。针对这一问题, 对泰国北碧府直径达 1.5 m 的新世柱状玄武岩开展了详细的岩石磁学与古地磁学研究。岩石磁学结果指示玄武岩柱的主要载磁矿物为假单畴 (PSD) 钛铁矿颗粒。磁化率各向异性 (AMS) 分析显示样品的磁化率最小轴 ( $K_3$ ) 趋向直立方向, 磁化率最大轴 ( $K_1$ ) 和中间轴 ( $K_2$ ) 趋向水平, 反映出岩浆在就位过程中的原生近水平流动。玄武岩柱体中部样品的磁性矿物颗粒粒径相对较大, 磁化率各向异性张量椭球以拉长型椭球为主, 其磁各向异性度 ( $P_j$ ) 与磁线理度 ( $L$ ) 均高于柱体边部样品, 表明柱体中部冷却速率较慢, 使得磁性矿物有更充分的时间结晶、生长, 并在热应力作用下发生更显著的定向排列。古地磁结果表明, 在柱状节理形成后, 柱体的冷却过程并非从柱体边缘同步、均匀地向中心推进, 剩磁方向和 VGPs 的系统变化指示其可能受局部热源的影响而经历了非对称性的、单一方向性的区域冷却过程。上述结果有助于深入理解玄武岩熔岩冷却过程, 并为探究古地磁场长期变化提供了新的研究思路。

**关键词:** 玄武岩柱状节理; 古地磁学; 岩石磁学; 冷却历史

**中图分类号:** P318.4      **文献标识码:** A

**DOI:** 10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2025169

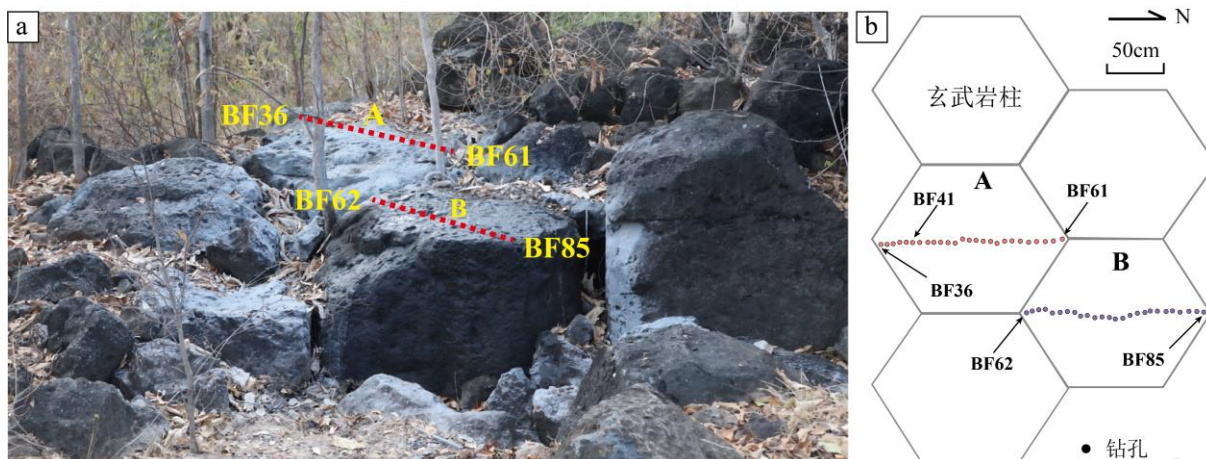
玄武岩柱状节理是一种发育于玄武岩中的原生张性破裂构造，具有独特的几何形态与规则的空间排列，因此长期以来备受关注。早在 17 世纪，Foley and Molyneux (1694) 就对北爱尔兰巨人堤的玄武岩柱进行了详细的描述。20 世纪以来，关于玄武岩柱状节理成因机制的研究不断深入，先后提出了多种假说，主要包括冷却收缩假说 (Ellwood and Fisk, 1977; Urrutia-Fucugauchi, 1982; Urrutia-Fucugauchi et al., 1991; Lore et al., 2000; Goehring and Morris, 2008; Hetényi et al., 2011; Mattsson et al., 2011; Almqvist et al., 2012; Phillips et al., 2013; Lamur et al., 2018; 周思耘和吴晨, 2021; Mondal et al., 2022)、双扩散对流模型 (Kantha, 1980, 1981; Husi, 1989; Hsui and Riahi, 2001) 以及成分过冷假说 (Guy and Coze, 1990; Gilman, 2009; Guy, 2010) 等。其中，冷却收缩假说最被广泛接受。该假说类比于泥裂过程，认为岩浆在冷凝过程中体积收缩，导致岩体张裂，从而形成柱状节理。然而，单纯的冷却收缩机制难以解释若干现象：例如，泥裂纵横比一般不超过 1，而玄武岩柱却可达 100 以上 (Kantha, 1981)；柱状节理剖面常表现为由规则的“柱列” (colonnade) 与不规则的“柱顶线盘” (entablature) 组成的 2~3 层突变结构。此外，单纯的热收缩无法形成典型的六边形柱面，也难以解释与柱体边缘平行的“气泡圆环”以及由中心向外延伸的放射状纹理 (Gilman, 2009; Guy, 2010)。Kantha (1980, 1981) 提出的双扩散对流模型，将柱状节理的形成类比为海洋中的“盐指”对流过程，认为熔体在垂向上存在显著的温度和化学性质差异，从而引发双扩散对流，形成“Basalt fingers”。冷却收缩裂隙则沿“Basalt fingers”间的薄弱带扩展，最终形成柱状节理。成分过冷模型认为，多组分熔体在特定冷却与热提取条件下会发生组分分异，低熔点相在柱体间富集形成玻璃质“薄弱带”，为节理优先生长提供位点 (Gilman, 2009; Guy, 2010)。Gilman (2009) 认为柱体边缘与中心的矿物分布差异是驱动因素，而 Guy (2010) 则认为关键不在于矿物差异，而在于挥发分梯度的存在——挥发分在柱体间隙富集，形成内部“薄弱带”。

基于上述模型，众多研究利用岩石磁学、地球化学及矿物学方法探讨玄武岩柱体的内部结构与冷却历史。地球化学分析表明，柱体从边缘到中心仅表现出微弱的成分差异。从柱体边缘到中心，密度、矿物成分 (斜长石 An 含量、钛磁铁矿 Ti 含量等)、稀土元素配分模式以及微量元素 (如 Rb、Sr) 浓度等基本均一，但主量元素含量与柱体内部明、暗条带及空间位置存在一定对应关系 (Symons, 1967; Mattsson et al., 2011; Almqvist et al., 2012)。暗色条带相对富集 Fe、Ti，对应较高钛磁铁矿含量 (约 7%)，而贫 Si、Al；浅色条带则相反。这一特征被解释为结晶诱导的熔体垂向迁移：早期结晶矿物 (斜长石、单斜辉石) 在边缘富集，使边缘贫不相容元素 (K、P) 而富 Mg、Ca；晚期残余熔体 (富 Fe、Ti、K、P) 向中心迁移，形成中心及暗色条带的化学特征。(Mattsson et al., 2011; Almqvist et al., 2012)。

磁化率各向异性 (AMS) 研究为揭示柱体形成时的应力场和岩浆流动特征提供了重要约束。对直立玄武岩柱的研究表明，磁化率最小轴 ( $K_3$ ) 近直立，最大轴 ( $K_1$ ) 与中间轴 ( $K_2$ ) 近水平，反映了原生水平流动构造，支持热收缩应力主导磁性颗粒排列的观点 (Brown et al., 1964; Ellwood and Fisk, 1977; Urrutia-Fucugauchi, 1982; Urrutia-Fucugauchi et al., 1991)。然而，水平玄武岩柱的 AMS 特征与此不同，Ellwood (1979) 发现其  $K_3$  轴多近直立，与冷却收缩模型预测的  $K_3$  近水平 (平行柱体长轴) 不符，进而提出其磁性组构主要受上覆柱体的垂向压实应力控制，仅边缘区域受冷却收缩应力影响。近年来，对冰岛玄武岩柱的 AMS 研究又揭示出近于直立的  $K_1$  轴及近于水平的  $K_2$ 、 $K_3$  轴，指示柱体内部存在熔体垂向流动，由此提出了“熔体垂向迁移模型”来解释内部条带结构 (Mattsson et al., 2011; Almqvist et al., 2012)。由此可见，不同区域及构型的玄武岩柱在磁各向异性特征及成因解释方面存在显著差异。此外，岩石磁学研究揭示，柱体磁学性质存在系统性空间差异，可能与不同部位冷却速率和氧化程度差异有关 (Symons, 1967; Radhakrishnamurty et al., 1971)。Urrutia-Fucugauchi et al. (1991) 进一步发现，单个柱体内古地磁方向集中，而不同柱体间则较为分散，可能反映了冷却收缩应力与后期塑性流动导致的柱体间系统性偏转。

综上所述，尽管“冷却收缩”假说被广泛接受，但其在解释柱体内部结构及冷却历史方面仍存在诸多不足。目前对柱体内部结构及具体冷却过程的认识仍然比较模糊。为此，文章以泰国北碧府上新世直径约 1.5 m 的巨型柱状玄武岩为研究对象，开展系统的岩石磁学与古地磁学研究，从磁学角度探讨玄武岩柱体的成因机制、内部结构特征及冷却过程。





a—Bo Phloi 剖面玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B；b—古地磁样品采集示意图

图 2 北碧府 Bo Phloi 剖面玄武岩柱样品采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling sites on basalt columns in the Bo Phloi section, Kanchanaburi

(a) Basalt columns A and B in the Bo Phloi section; (b) Sketch map of sample collection

## 2 研究方法

### 2.1 岩石磁学实验

岩石磁学研究可以揭示岩石中磁性矿物的类型、磁畴状态、含量等信息，是开展古地磁学以及环境磁学研究的基础 (Dunlop, 1995; 敖红和邓成龙, 2007)。为探究玄武岩柱体内部磁学性质的空间变化特征，对 49 块样品开展了详细的岩石磁学实验。所有实验均在中山大学地球科学与工程学院岩石磁学实验室完成。

在加热和冷却过程中，不同磁性矿物的磁化率会随温度变化而呈现不同的特征。因此，磁化率-温度曲线 ( $\chi-T$ ) 可以帮助识别磁性矿物的种类及其热稳定性。在外加磁场的的作用下，磁性矿物的磁学性质相应的也会发生一些变化，因此可以通过磁滞回线和等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线的测量获取磁性矿物的信息。其中，一阶反转曲线图 (FORC) 的测量可以有效帮助确定样品中磁性颗粒的磁畴状态、矫顽力分布以及磁性颗粒间的相互作用。为获取样品的磁学特征，对研磨后的玄武岩粉末样品开展了  $\chi-T$  曲线、磁滞回线、FORC 图和等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线等测量。 $\chi-T$  曲线的测量使用 AGICO 卡帕桥磁化率仪 (MFK2-FA, 频率: 976 Hz) 进行；磁滞回线测量、FORC 图和等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线的测量使用 Micromag VSM 3900 振动磁强计完成，所施加的外加场范围为  $\pm 1$  T。

磁化率各向异性 (AMS) 是指岩石及其组成矿物的低场磁化率在不同方向上的变化，它取决于所有组成矿物颗粒的形状和晶体的各向异性以及它们的空间排布情况。火成岩的磁组构可以揭示熔岩的熔体流动状态以及应力状态。49 块标准古地磁样品的 AMS 测量使用 AGICO 卡帕桥磁化率仪 (MFK2-FA, 频率: 976 Hz) 进行。

### 2.2 热退磁实验

为了揭示柱状玄武岩在冷却过程中所记录的古地磁场信息，对 49 块标准古地磁样品开展了逐步热退磁实验。热退磁实验在中国科学院南海海洋研究所古地磁实验室完成。基于岩石磁学分析结果，对 49 块古地磁样品进行了 20 步以上的逐步热退磁分析，退磁温度区间从室温至  $600^{\circ}\text{C}$ ，直至剩磁强度在天然剩磁强度 (NRM) 的 5% 以下。实验使用 2G-755 型岩石超导磁力仪测量剩磁强度及方向。

## 3 实验结果

### 3.1 岩石磁学结果

磁滞回线测量结果显示所有样品的磁滞回线均在 300 mT 前达到饱和, 样品矫顽力均较小 ( $<15$  mT), 多数样品矫顽力在 5~10 mT 之间波动变化, 仅少数样品 (24BF58、24BF59、24BF60、24BF70、24BF81) 的矫顽力超过 10 mT (图 3, 图 8a、8b)。所有样品的等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线呈现基本一致的特征, 当外加磁场强度为 0~50 mT 时, 样品的磁化强度随着外加磁场强度的增加而迅速增加; 当外加磁场强度超过 50 mT 后, 曲线斜率开始显著减小, 样品的磁化强度随着外加磁场强度的增加而缓慢增加, 并在大约 300 mT 达到饱和, 样品的剩磁矫顽力均不超过 40 mT (图 4)。样品的磁化强度在较低的外加磁场强度 (~300 mT) 下就达到饱和表明样品的磁性矿物主要为软磁性矿物。随着外加场强度的逐渐增加, 样品磁化强度的增加过程呈现增加速度不同的 2 个阶段 (0~50 mT 和 50~300 mT), 这表明样品中可能存在具有不同矫顽力的磁性颗粒混合。当外加场在 0~50 mT 时, 矫顽力相对低的磁性颗粒对磁场的变化反应更加敏感; 当外加场超过 50 mT 以后, 矫顽力相对高的磁性颗粒的贡献逐渐加强。从柱体边缘到中心, 样品矫顽力的微小波动变化 (图 8a、8b) 就可能源于样品内高矫顽力和低矫顽力磁性颗粒的混合比例差异。一阶反转曲线 (FORC) 图揭示了样品的磁畴状态, 整体上看, 所有样品均表现出典型的假单畴 (PSD) 颗粒特征, 即内部等值线闭合、外部等值线向纵轴开口 (图 5, 图 6)。然而, 不同样品的 FORC 图之间存在一些可以观察到的差异, 指示了不同样品间磁性颗粒粒径的变化, 这可能同样源于样品内高矫顽力和低矫顽力磁性颗粒的混合比例差异, 与磁滞回线和等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线的结果一致。

所有样品的磁化率-温度曲线 ( $\chi-T$ ) 特征基本相似, 在升温过程中, 样品的磁化率均在大约 200 °C 开始显著降低, 并于 600 °C 前降至接近于 0 (图 7), 大多数样品的居里温度集中在约 220~330 °C 之间 (图 8c、8d)。升温曲线和降温曲线不完全重合, 表明在加热过程中磁性矿物发生了变化。综合上述岩石磁学结果, 柱状玄武岩样品的主要载磁矿物为假单畴 (PSD) 钛磁铁矿颗粒。从柱体边缘到中心, 样品的居里温度在大约 220~330 °C 之间波动变化 (图 8c、8d), 可能反映了冷却过程中钛磁铁矿成分或者粒度的变化。综合磁滞回线、等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线、FORC 图以及  $\chi-T$  曲线的分析结果, 玄武岩柱体内部磁学性质的空间变化可能受控于样品中不同矫顽力磁性颗粒的混合比例差异。而磁性颗粒的矫顽力差异很可能由钛磁铁矿的成分或粒度所主导。

磁化率各项异性 (AMS) 结果显示, 玄武岩柱 (A 和 B) 样品的磁化率最小轴 ( $K_3$ ) 相对集中, 倾角趋向直立, 而磁化率最大轴 ( $K_1$ ) 和中间轴 ( $K_2$ ) 的倾角趋向水平, 发育明显的趋向水平的磁面理 (玄武岩柱 A: 181.9°/21.6°; 玄武岩柱 B: 232.9°/20.2°; 图 9)。玄武岩柱 (A 和 B) 样品的磁化率较高, 平均体积磁化率 ( $K_m$ ) 分别为  $5.4 \times 10^{-2}$  SI、 $5.0 \times 10^{-2}$  SI。2 根玄武岩柱的磁各向异性度 ( $P_j$ ) 均较低 ( $<1.05$ ), 玄武岩柱 A 样品的  $P_j$  在 1.018~1.044 之间波动, 平均值为 1.029; 玄武岩柱 B 样品的  $P_j$  在 1.015~1.047 之间波动, 平均值为 1.033。已有研究表明低的各向异性度 ( $P_j < 1.2$ ) 通常指示沉积组构与原始岩浆流动 (Hrouda, 1982; 潘小青等, 2011)。因此, 2 根玄武岩柱的 AMS 很可能反映的是原始的岩浆流动。此外, 柱体内部磁化率椭球参数的空间变化反映了柱体边部和中部的磁性颗粒特征存在系统性差异 (图 10)。2 根柱体边部样品的体积磁化率 ( $K_m$ )、磁线理度 ( $L$ ) 和磁各向异性度 ( $P_j$ ) 整体上要明显低于柱体中部的样品的值 (图 10)。柱体中部样品的形状因子 ( $T$ ) 多小于零, 表明以拉长型磁化率椭球为主; 而柱体边部的样品的形状因子 ( $T$ ) 值多大于零, 表明以压扁状磁化率椭球为主 (图 10)。

### 3.2 热退磁结果

退磁结果显示, 样品退磁矢量图呈经过原点的线性趋势, 剩磁基本表现为单分量特征 (图 11)。2 根玄武岩柱样品的天然剩磁强度 (NRM) 较高, 柱 A 样品的 NRM 在 2.56~9.71 A/m 之间波动, 平均值为 4.85 A/m; 柱 B 样品的 NRM 在 2.30~7.38 A/m 之间波动, 平均值为 5.15 A/m (图 13c)。在 ~200 °C 前, 剩磁强度随着温度的升高而迅速下降, 到大约 200 °C 下降为 NRM 的 20% 左右; 温度超过 200 °C 之后, 剩磁强度随着温度升高而缓慢减弱, 并在大约 550~600 °C 接近原点。从 49 块样品中分离出了稳定的特征剩磁 (表 1)。熔岩流在流动过程中, 磁性矿物会倾向于沿平行于流动面的方向定向排列, 从而形成磁面理 (Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Gurioli et al., 2005)。磁面理的平面方向由磁化率最大轴 ( $K_1$ ) 和中间轴 ( $K_2$ ) 所定义的平面来表示。因此, 可以通过磁面理将火山岩样品的特征剩磁方向校正到水平面上, 恢复真实的古地磁方向。地理坐标系下, 玄武岩

柱 A (磁面理:  $181.9^{\circ}/21.6^{\circ}$ ) 和 B (磁面理:  $232.9^{\circ}/20.2^{\circ}$ ) 的磁面理的倾角基本一致, 但是倾向存在  $51^{\circ}$  的偏差, 这可能是由于玄武岩柱就位后发生不同方向的倾斜造成。用玄武岩柱 A、B 的磁面理分别对 2 个柱体的样品进行倾斜校正。结果显示, 43 块样品的特征剩磁方向比较集中 ( $\kappa = 83.4$ ,  $\alpha_{95} = 2.4^{\circ}$ ), 而玄武岩柱 A 最边部的 6 块样品 (24BF36、24BF37、24BF38、24BF39、24BF40、24BF41) 的特征剩磁方向与其他 43 块样品明显不同, 古地磁偏角和磁倾角异常高于其他样品 (图 12、图 13)。

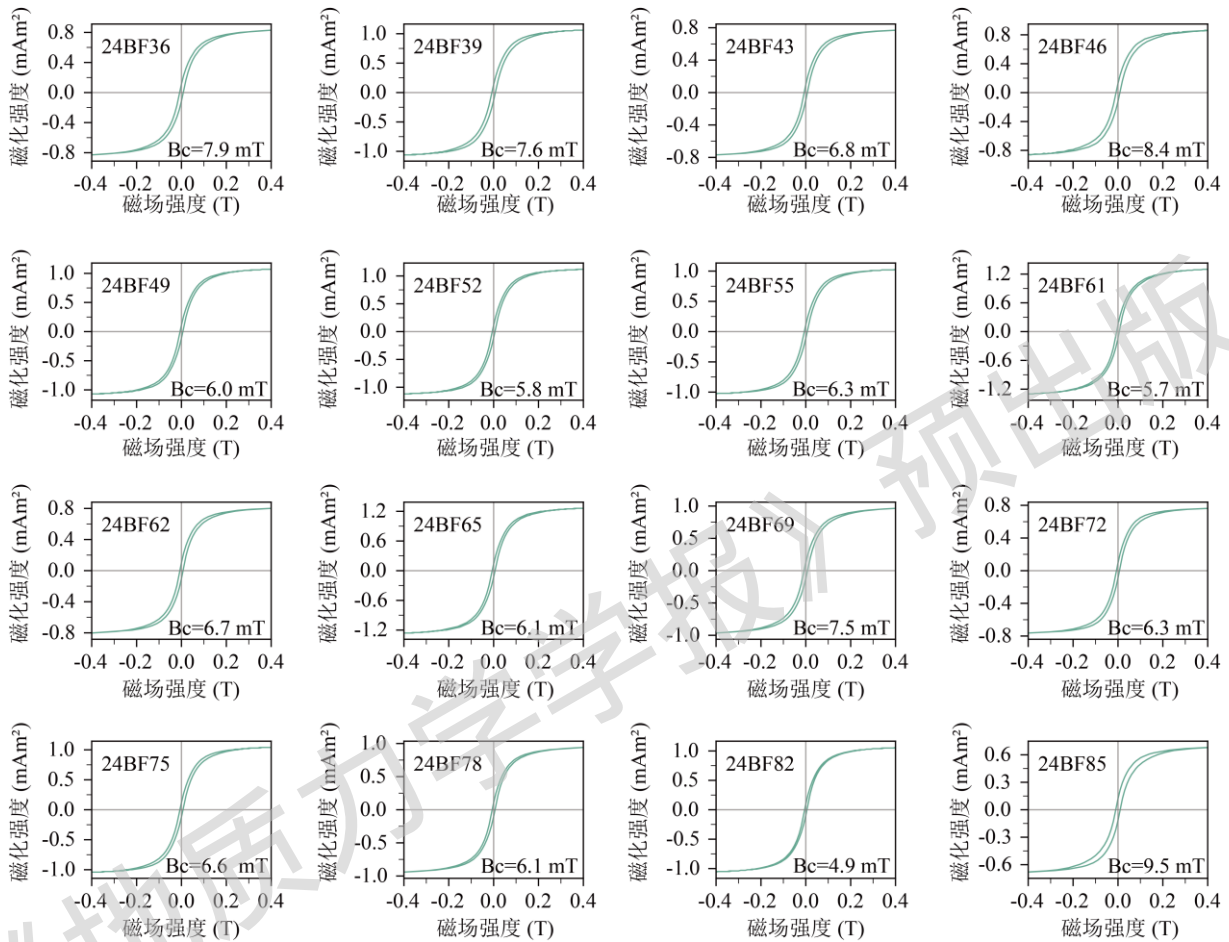


图 3 玄武岩柱代表性样品的磁滞回线

Fig. 3 Hysteresis loops of representative samples from basalt columns

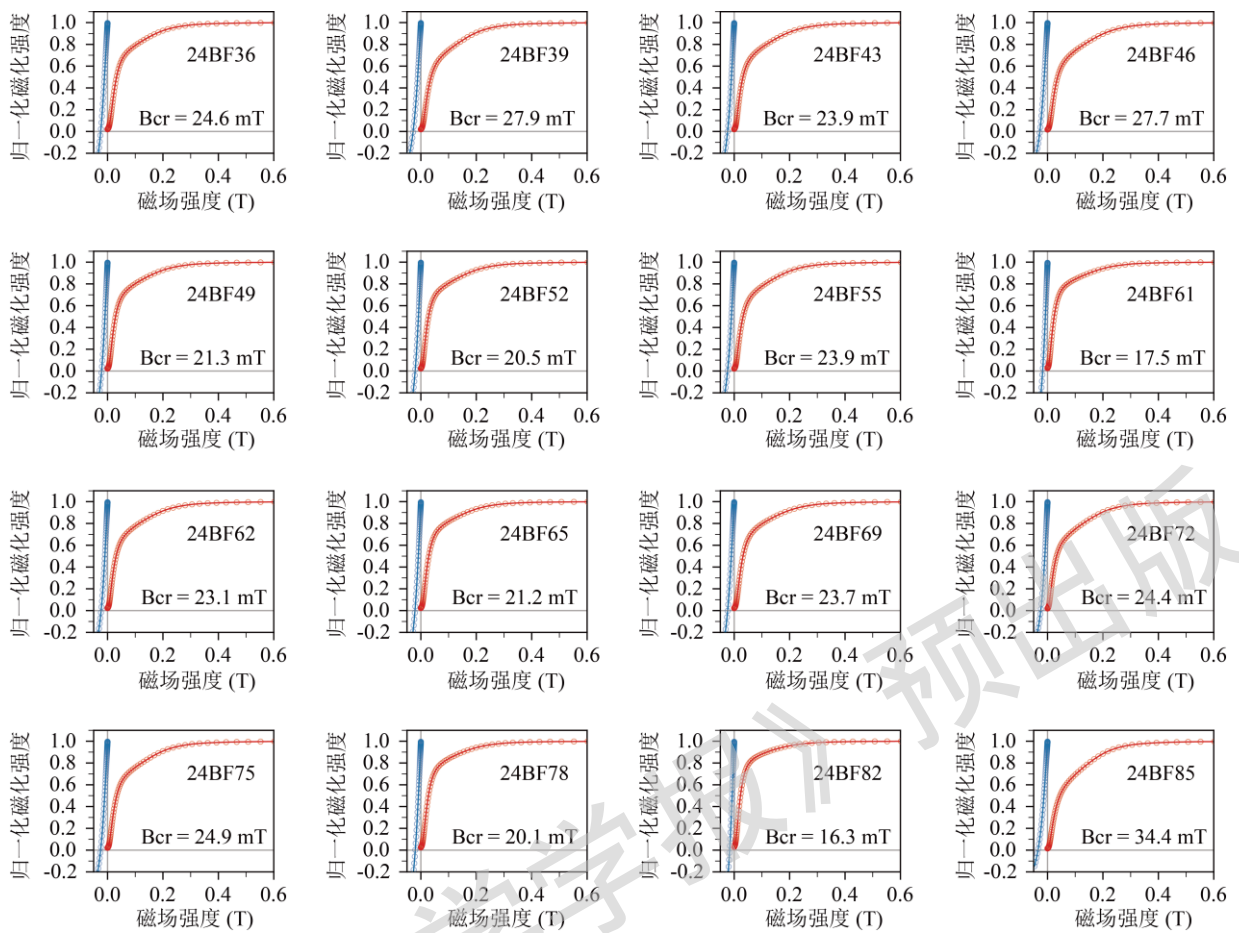
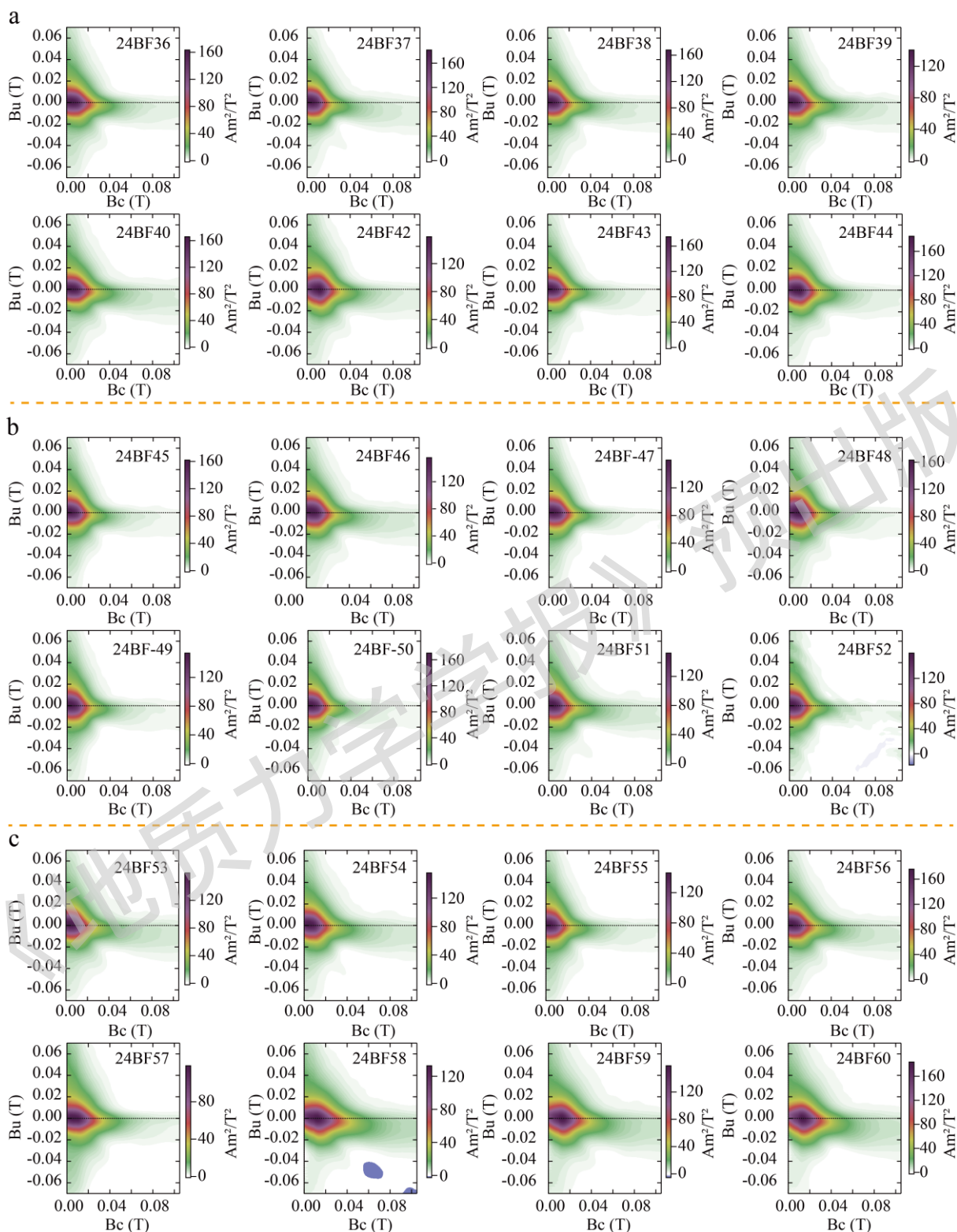


图 4 玄武岩柱代表性样品的等温剩磁获得曲线及反向退磁曲线

Fig. 4 Isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition and back-field demagnetization curves of representative samples from basalt columns



颜色柱代表 FORC 分布密度函数的数值大小

a—玄武岩柱 A 西侧 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图; b—玄武岩柱 A 中部 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图; c—玄武岩柱 A 东侧 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图

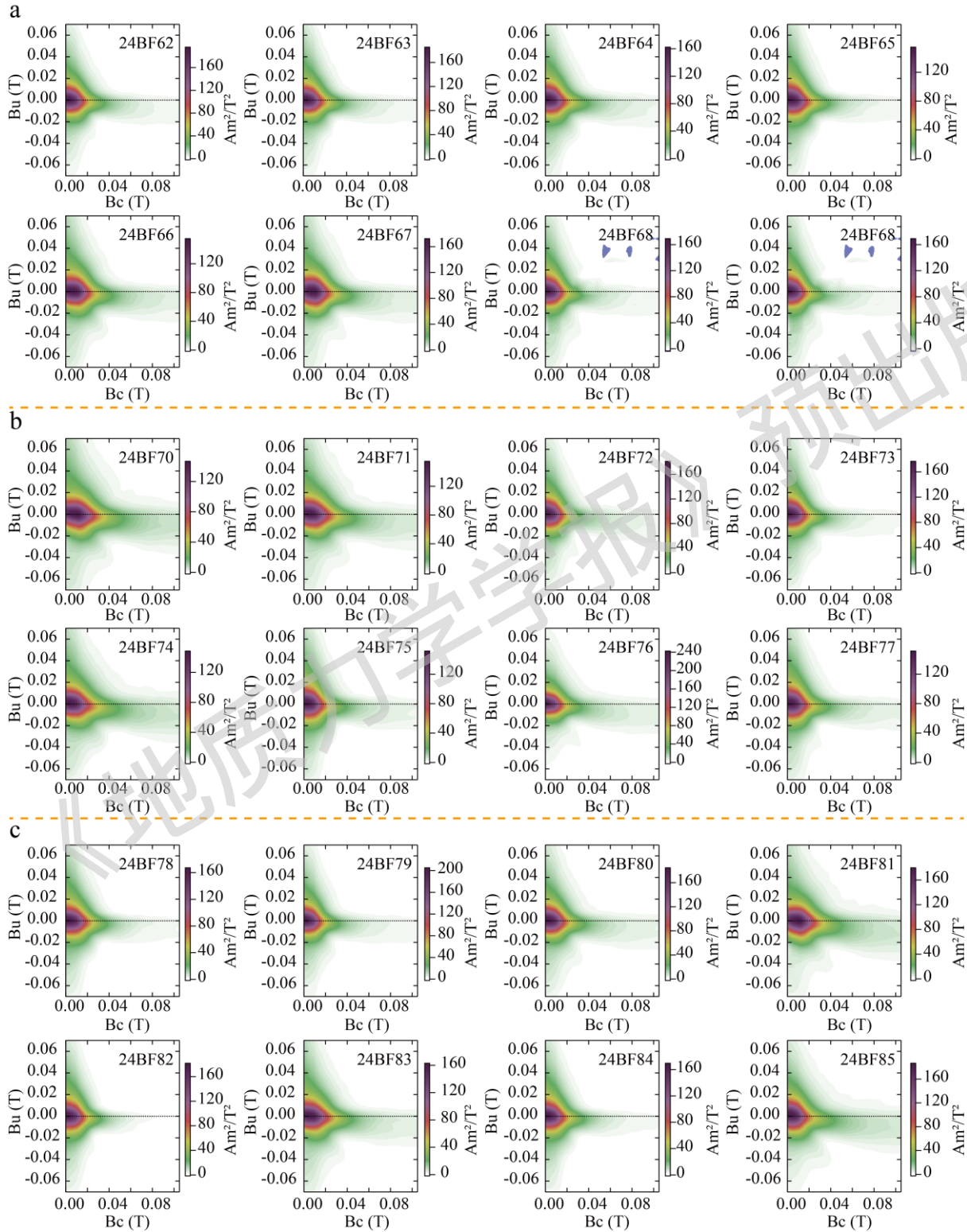
图 5 玄武岩柱 A 样品的一阶反转曲线 (FORC) 图

Fig. 5 First-order reversal curve (FORC) diagrams of samples from basalt column A

(a) First-order reversal curve (FORC) diagrams for eight samples from the western side of basalt column A; (b) First-order reversal curve

(FORC) diagrams for eight samples from the central part of basalt column A; (c) First-order reversal curve (FORC) diagrams for eight samples from the eastern side of basalt column A

The color scale represents the numerical magnitude of the FORC distribution density function.



颜色柱代表 FORC 分布密度函数的数值大小

a—玄武岩柱 B 西侧 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图; b—玄武岩柱 B 中部 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图; c—玄武岩柱 B 东侧 8 个样品的一阶反转曲线 (FORC) 图

图 6 玄武岩柱 B 样品的一阶反转曲线 (FORC) 图

Fig. 6 First-order reversal curve (FORC) diagrams of samples from basalt column B

(a) First-order reversal curve (FORC) diagrams for eight samples from the western side of basalt column B; (b) First-order reversal curve (FORC) diagrams for eight samples from the central part of basalt column B; (c) First-order reversal curve (FORC) diagrams for eight samples from the eastern side of basalt column B

The color scale represents the numerical magnitude of the FORC distribution density function.

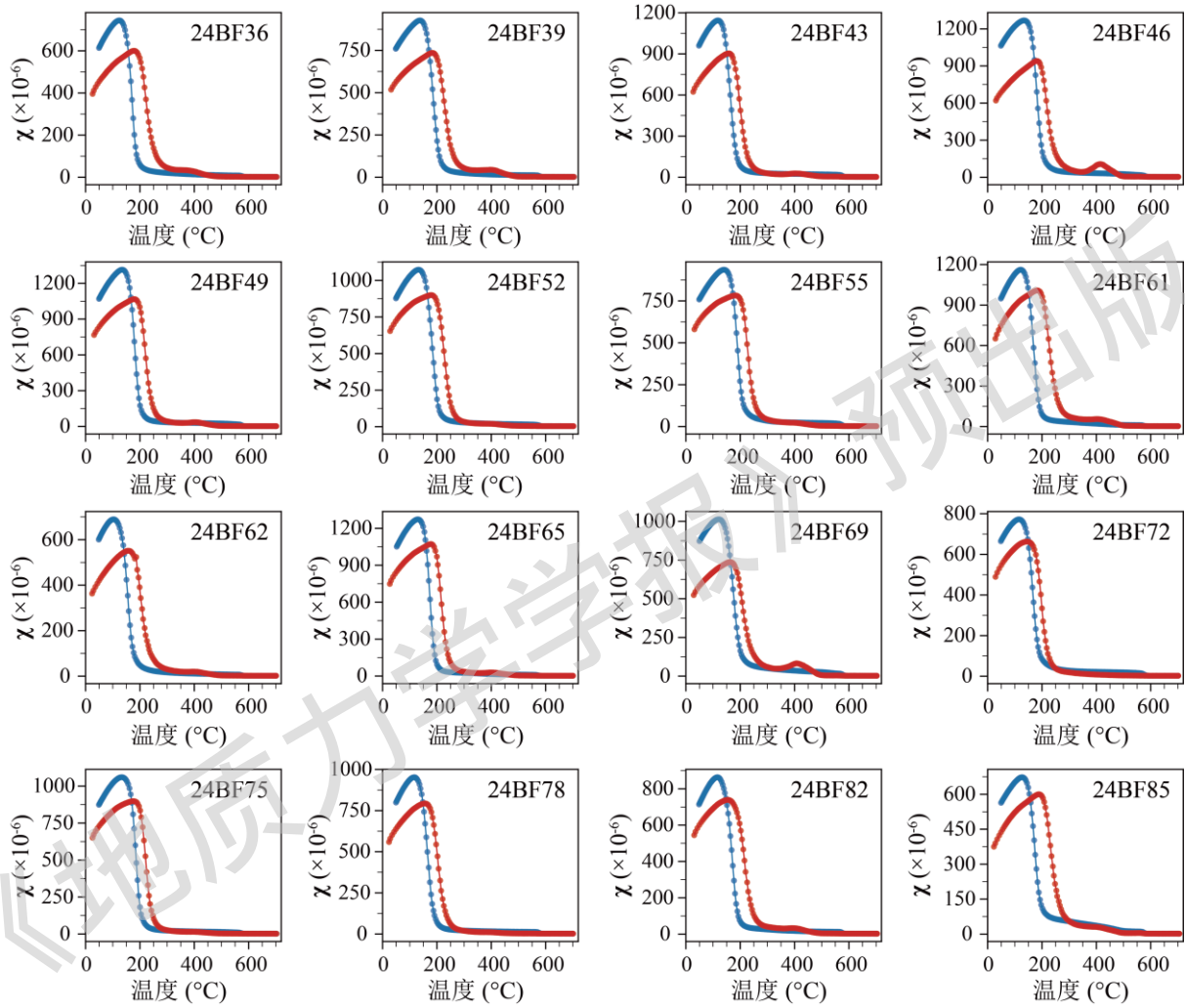
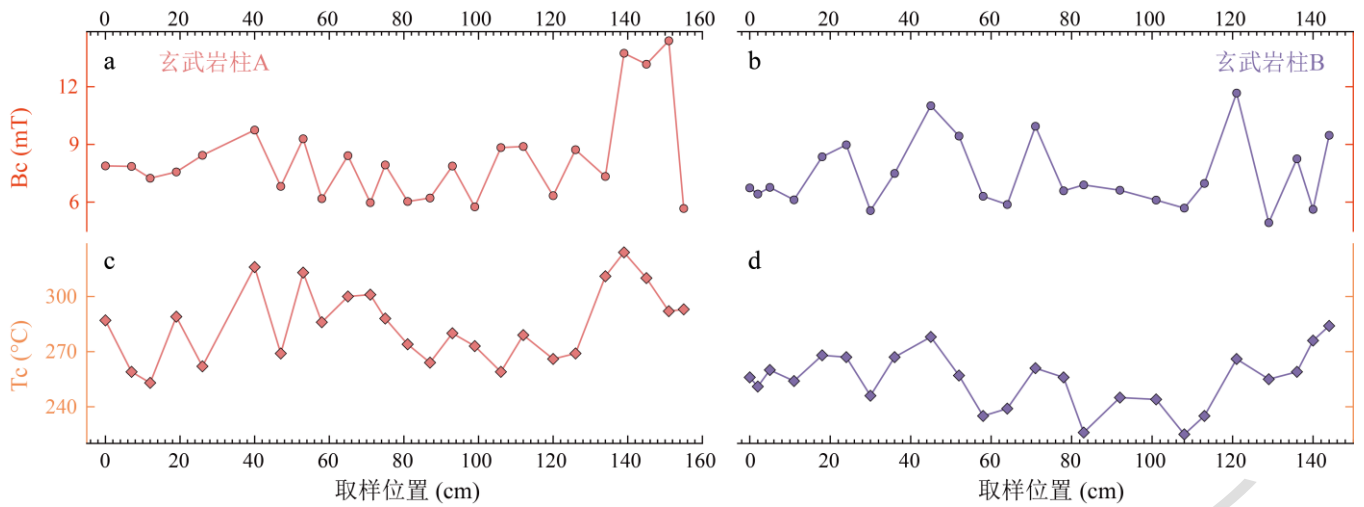


图 7 玄武岩柱代表性样品的磁化率-温度 ( $\chi-T$ ) 变化曲线

Fig. 7 Temperature dependence of magnetic susceptibility ( $\chi-T$ ) for representative samples from basalt columns

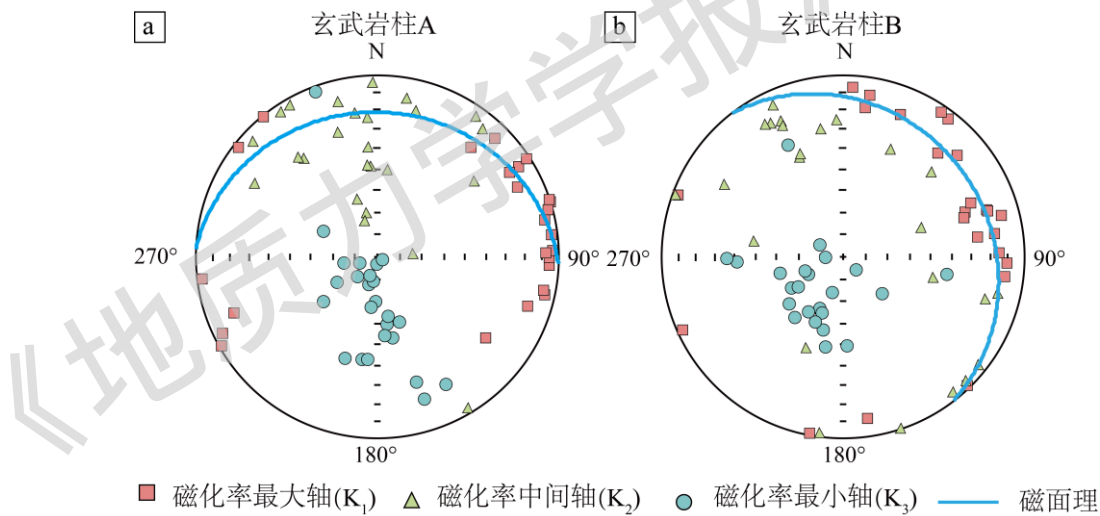


a—玄武岩柱 A 样品的矫顽力 ( $B_c$ ) 变化; b—玄武岩柱 B 样品的矫顽力 ( $B_c$ ) 变化; c—玄武岩柱 A 样品的居里温度 ( $T_c$ ) 变化; d—玄武岩柱 B 样品的居里温度 ( $T_c$ ) 变化

图 8 玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B 样品的矫顽力 ( $B_c$ ) 和居里温度 ( $T_c$ ) 变化

Fig. 8 Coercivity ( $B_c$ ) and Curie temperature ( $T_c$ ) of samples from basalt columns A and B

(a) Variations in coercivity ( $B_c$ ) of samples from basalt column A; (b) Variations in coercivity ( $B_c$ ) of samples from basalt column B; (c) Variations in Curie temperature ( $T_c$ ) of samples from basalt column A; (d) Variations in Curie temperature ( $T_c$ ) of samples from basalt column B

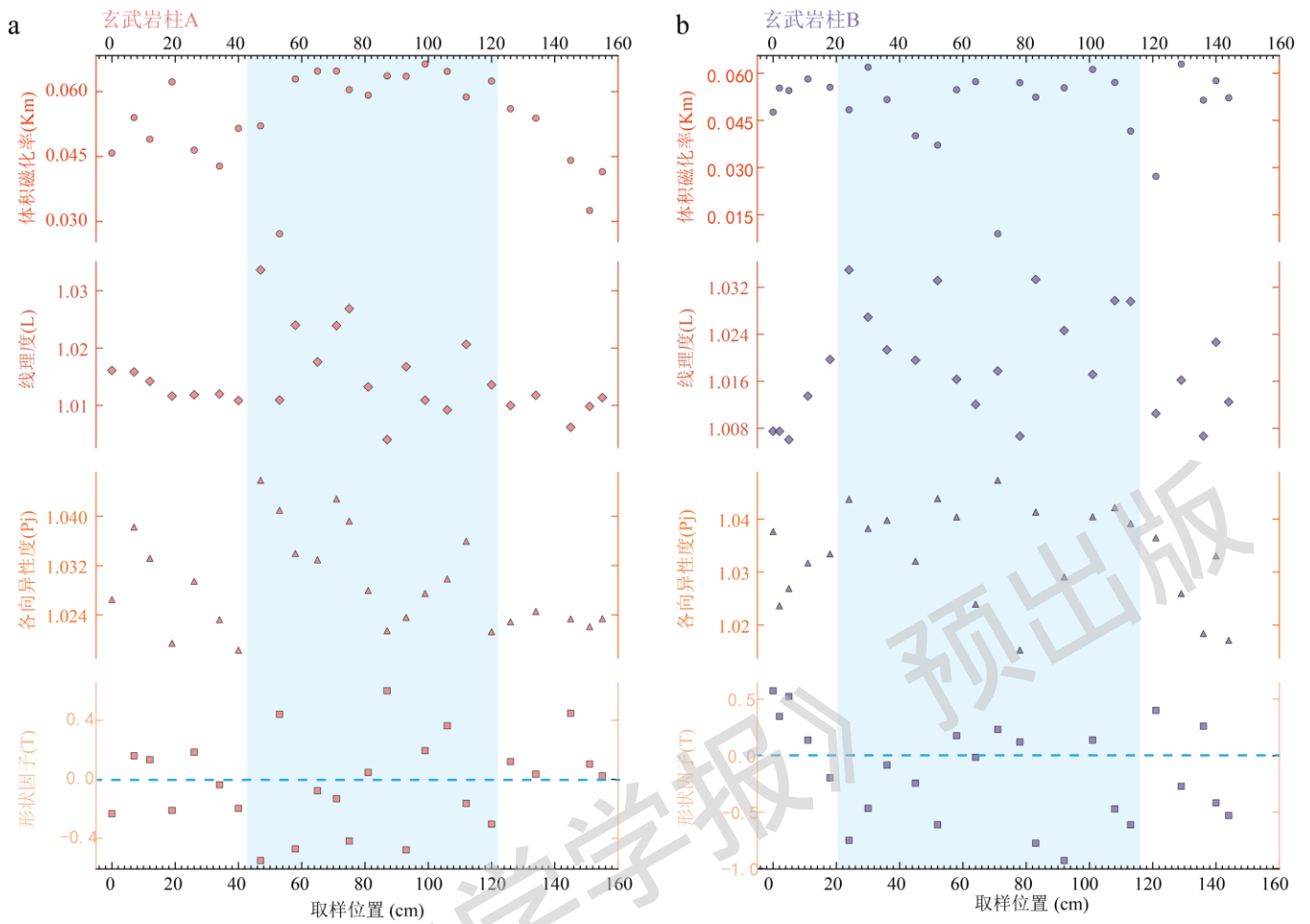


a—玄武岩柱 A 的 AMS 结果; b—玄武岩柱 B 的 AMS 结果;

图 9 玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B 的磁化率各向异性 (AMS) 结果

Fig. 9 Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of basalt columns A and B

(a) AMS of basalt column A; (b) AMS of basalt column B

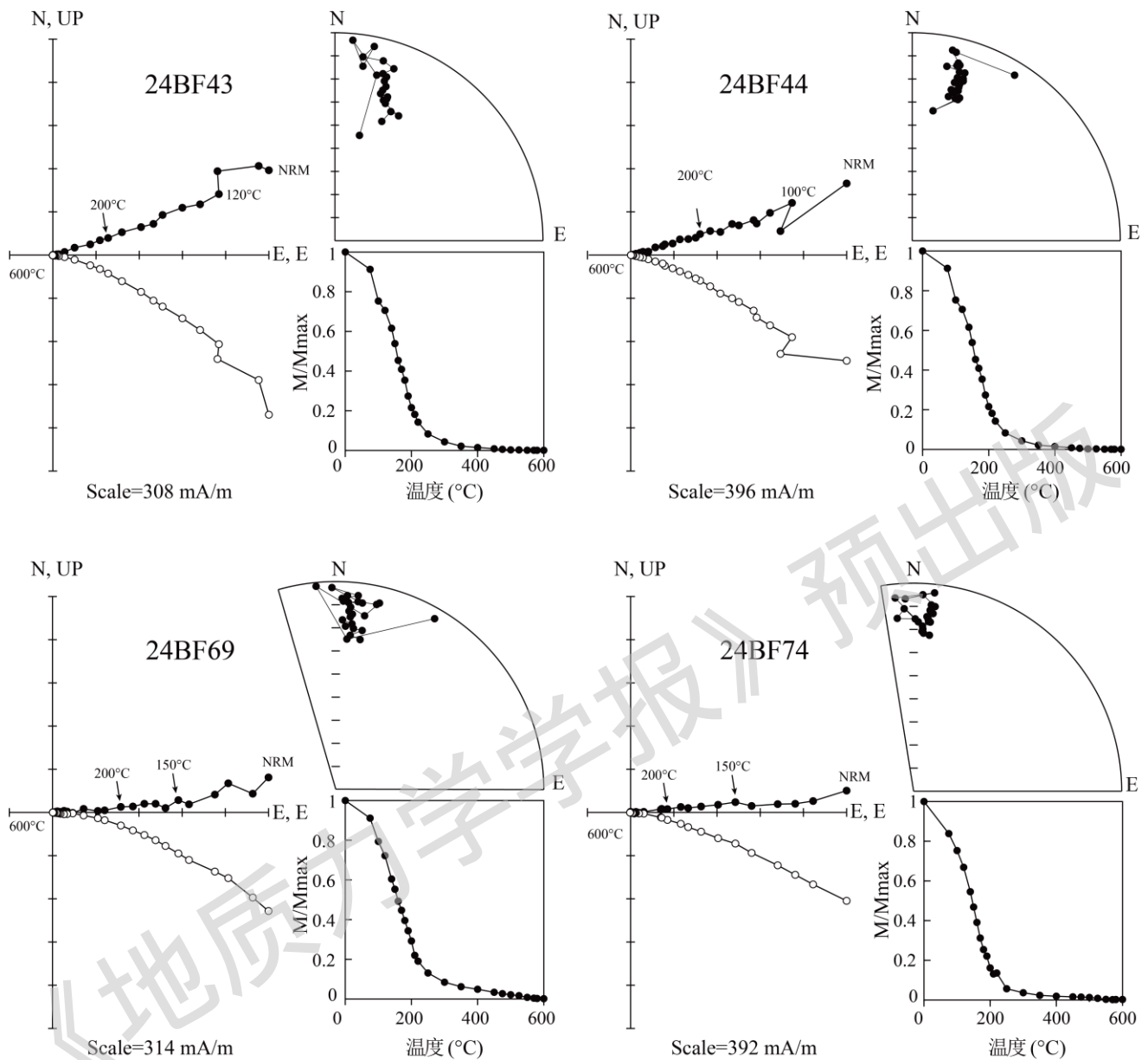


a—玄武岩柱 A 样品的磁化率椭球参数；b—玄武岩柱 B 样品的磁化率椭球参数

图 10 玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B 样品的磁化率椭球参数

Fig. 10 Magnetic susceptibility ellipsoid parameters of samples from basalt columns A and B

(a) Results of the magnetic susceptibility ellipsoid parameters for samples of basalt column A; (b) Results of the magnetic susceptibility ellipsoid parameters for samples of basalt column B

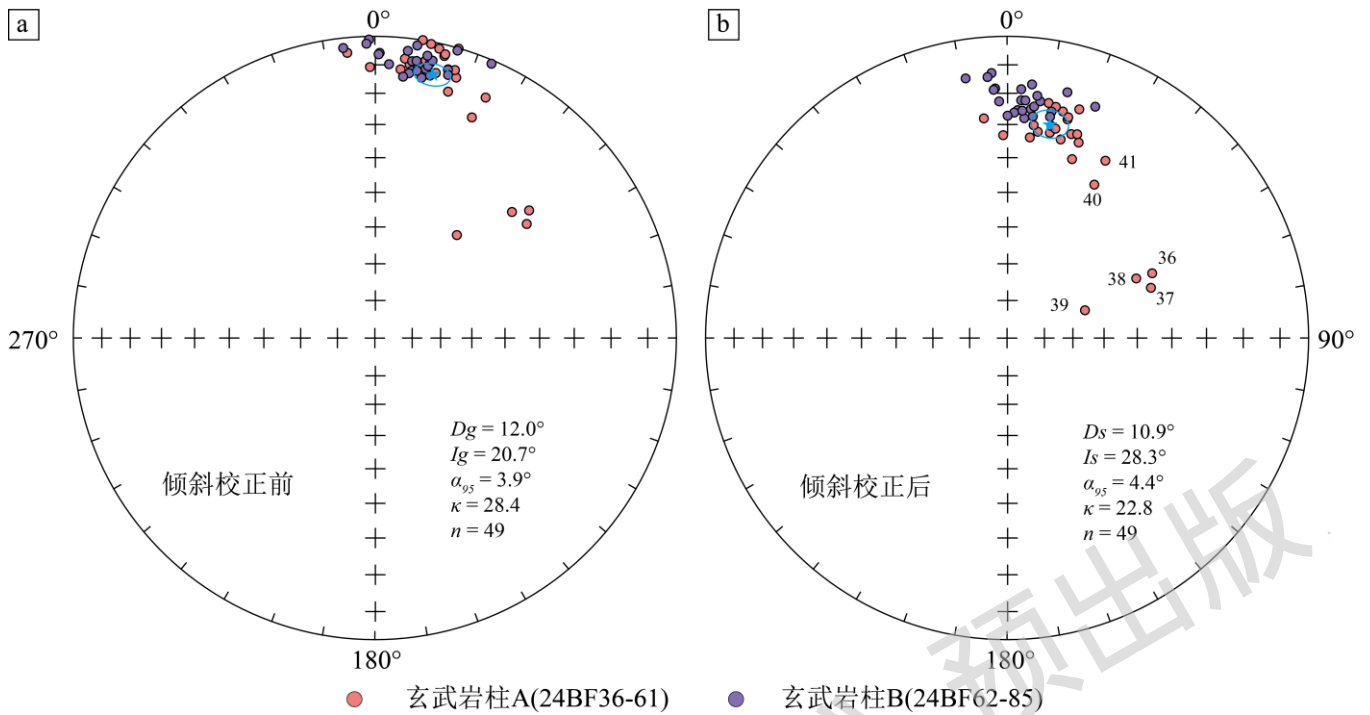


空心和实心圆分别代表矢量在直立面和水平面上的投影；Scale，坐标轴上每一个小格所代表的数值；M/Max，磁化强度/最大磁化强度

图 11 玄武岩柱代表性样品在地理坐标系下的退磁正交矢量投影图

Fig. 11 Orthogonal vector projection (Zijderveld diagram) of demagnetization results for representative basalt column samples in the geographic coordinate system

Open and solid circles represent vectors and endpoints projected onto vertical and horizontal planes, respectively; Scale: Value per division; M/Max: Magnetization / Maximum magnetization



数字代表样品 24BF36、24BF37、24BF38、24BF39、24BF40、24BF41； $Dg/Ig$  ( $Ds/Is$ )，地理(地层)坐标系下的倾向/倾角； $\alpha_{95}$ ，95%置信区间； $\kappa$ ，精读参数； $n$ ，样品数量

a—倾斜校正前的特征剩磁方向；b—倾斜校正后的特征剩磁方向

图 12 玄武岩柱样品特征剩磁方向的等面积投影图

Fig. 12 Equal-area projections of ChRMs directions for basalt column samples

(a) ChRMs directions before tilt correction; (b) ChRMs directions after tilt correction

Numbers in the right panel correspond to samples 24BF36, 24BF37, 24BF38, 24BF39, 24BF40, and 24BF41;  $Dg/Ig$  ( $Ds/Is$ ): Declination / Inclination in geographic (stratigraphic) coordinates;  $\alpha_{95}$ : Radius of 95% confidence circle;  $\kappa$ : Fisher precision parameter;  $n$ : Number of samples

表 1 玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B 样品的特征剩磁方向

Table. 1 Characteristic remanent magnetization (ChRM) direction of each sample from basalt columns A and B

样品号	Lat /°N	Long /°E	Dip azi./dip /°	Step range	$n$	$Dg$ /°	$Ig$ /°	$Ds$ /°	$Is$ /°	$MAD$ /°
玄武岩柱 A										
24BF36	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	50.4	34.2	65.9	46.4	3.3
24BF37	14.33	99.52	181.9/21.6	T220-T600	14	53.1	37.3	70.7	48.3	1.4
24BF38	14.33	99.52	181.9/21.6	T180-T600	17	47.4	38.4	65.1	51.2	1.5
24BF39	14.33	99.52	181.9/21.6	T190-T600	15	38.5	54.2	70.3	68.0	1.6
24BF40	14.33	99.52	181.9/21.6	T350-T600	10	23.7	21.4	29.2	41.1	4.9
24BF41	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	24.7	13.5	28.7	33.2	3.3
24BF42	14.33	99.52	181.9/21.6	T300-T600	11	7.2	9.7	8.0	30.5	3.1
24BF43	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	17.3	10.7	19.7	31.4	3.5
24BF44	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	16.5	16.1	19.5	36.9	2.2
24BF45	14.33	99.52	181.9/21.6	T210-T600	14	10.1	9.5	11.3	30.9	3.2
24BF46	14.33	99.52	181.9/21.6	T190-T600	16	12.9	11.0	14.7	32.1	1.9

24BF47	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	10.3	7.4	11.4	28.7	2.0
24BF48	14.33	99.52	181.9/21.6	T200-T600	15	11.3	8.0	12.6	29.3	2.0
24BF49	14.33	99.52	181.9/21.6	T210-T600	14	15.2	8.7	17.1	29.7	1.8
24BF50	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	16.1	0.4	17.2	21.3	2.4
24BF51	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	13.8	4.4	15.1	25.5	3.5
24BF52	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	9.1	0.2	9.6	21.2	2.2
24BF53	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	12.5	2.2	13.5	23.4	3.0
24BF54	14.33	99.52	181.9/21.6	T300-T600	11	10.8	1.1	11.5	22.4	4.3
24BF55	14.33	99.52	181.9/21.6	T220-T600	13	16.6	8.3	18.6	29.1	1.7
24BF56	14.33	99.52	181.9/21.6	T350-T600	10	13.9	3.7	14.5	17.4	6.4
24BF57	14.33	99.52	181.9/21.6	T250-T600	12	6.1	7.8	6.7	29.3	1.6
24BF59	14.33	99.52	181.9/21.6	T170-T600	18	354.4	5.8	353.5	27.2	2.4
24BF60	14.33	99.52	181.9/21.6	T220-T600	13	5.4	11.7	6.0	33.3	2.5
24BF61	14.33	99.52	181.9/21.6	T200-T600	15	358.9	11.3	358.4	32.9	2.7
玄武岩柱 A (24BF 42-61) 剩磁平均方向					25	16.1	13.7	18.7	34.1	7.0
玄武岩柱 B										
24BF62	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	15.2	8.9	11.3	24.8	2.0
24BF63	14.33	99.52	232.9/20.2	T180-T600	17	10.6	10.3	6.1	25.0	1.5
24BF64	14.33	99.52	232.9/20.2	T210-T600	14	15.5	10.6	11.2	26.5	1.9
24BF65	14.33	99.52	232.9/20.2	T200-T600	15	11.0	9.2	6.8	24.1	2.3
24BF66	14.33	99.52	232.9/20.2	T300-T600	11	11.7	7.0	8.2	22.1	4.0
24BF67	14.33	99.52	232.9/20.2	T350-T600	10	16.0	1.2	14.5	15.1	3.0
24BF68	14.33	99.52	232.9/20.2	T190-T600	16	11.8	12.3	6.8	27.3	3.0
24BF69	14.33	99.52	232.9/20.2	T400-T600	9	7.6	8.4	3.5	22.4	3.0
24BF70	14.33	99.52	232.9/20.2	T350-T600	10	8.2	2.5	7.0	12.0	4.2
24BF71	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	7.8	11.7	2.8	25.7	2.8
24BF72	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	10.5	5.6	7.3	20.4	3.0
24BF73	14.33	99.52	232.9/20.2	T200-T600	15	7.3	12.7	2.0	26.5	2.1
24BF74	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	0.9	6.3	357.3	18.6	5.5
24BF75	14.33	99.52	232.9/20.2	T200-T600	15	10.1	13.6	4.6	28.1	1.7
24BF76	14.33	99.52	232.9/20.2	T220-T600	13	8.9	11.5	4.0	25.8	2.2
24BF77	14.33	99.52	232.9/20.2	T200-T600	15	2.9	10.2	358.2	22.9	2.1
24BF78	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	6.5	4.9	3.4	18.8	1.8
24BF79	14.33	99.52	232.9/20.2	T220-T600	13	8.5	8.1	4.5	22.4	1.9
24BF80	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	0.7	6.8	357.0	19.0	2.1
24BF81	14.33	99.52	232.9/20.2	T250-T600	12	6.1	14.1	0.3	27.5	2.7
24BF82	14.33	99.52	232.9/20.2	T300-T600	11	358.8	1.4	356.7	13.3	2.7
24BF83	14.33	99.52	232.9/20.2	T350-T600	10	23.0	1.6	21.7	16.0	7.1
24BF84	14.33	99.52	232.9/20.2	T300-T600	11	358.3	2.9	355.7	14.6	2.8
24BF85	14.33	99.52	232.9/20.2	T300-T525	7	353.7	3.9	350.9	14.2	3.4
玄武岩柱 B (24BF 62-85) 剩磁平均方向					24	8.0	7.8	4.2	21.5	3.0

注：Lat/Long, 采样点纬度/经度；Dip azi./dip 磁面理的倾向/倾角；Step range, 退磁步骤；n, 用于统计特征剩磁方向的点数；Dg/Ig(Ds/Is), 地理(地层)坐标系下的倾向/倾角；MAD, 最大角度偏差。

## 4 讨论

### 4.1 玄武岩柱的冷却凝固过程

玄武岩柱的磁组构可以反映柱体内部磁性矿物的定向排列状态,揭示岩浆流动及其在冷却凝固过程中的应力状态。玄武岩柱 A 和 B 的磁化率各向异性 (AMS) 结果显示:玄武岩柱 A 磁面理  $181.9^{\circ}/21.6^{\circ}$ ,玄武岩柱 B 磁面理  $232.9^{\circ}/20.2^{\circ}$ ,磁化率最小轴 ( $K_3$ ) 的倾角总体趋向直立,而最大轴 ( $K_1$ ) 和中间轴 ( $K_2$ ) 倾角近于水平 (图 9)。该结果与澳大利亚新南威尔士州南海岸的二叠纪直立玄武岩柱、墨西哥莫雷洛斯州中新世直立玄武岩柱和冰岛直立玄武岩柱的 AMS 结果类似 (Brown et al., 1964; Ellwood and Fisk, 1977; Urrutia-Fucugauchi, 1982; Urrutia-Fucugauchi et al., 1991)。已有研究将这种磁化率各向异性特征归因于岩浆原生流动或者玄武岩冷却凝固过程中的热收缩应力,与熔体垂向迁移模型 (Mattsson et al., 2011; Almqvist et al., 2012) 不同,此次研究的 AMS 结果并未显示玄武岩柱体内部存在沿柱体长轴方向的熔体流动或者对流。结合样品较低的磁化率各向异性度 ( $P_j < 1.05$ ),北碧府 Bo Phloi 剖面巨型玄武岩柱的 AMS 应主要记录了岩浆就位过程中的原生近水平流动,并不支持熔体发生垂向流动或对流的模型。

磁化率椭球参数揭示了柱体内部磁性矿物的空间差异。2 个玄武岩柱体边部样品的体积磁化率 ( $K_m$ )、磁线理度 ( $L$ ) 和磁各向异性度 ( $P_j$ ) 总体而言相较于柱体中间部分的样品偏低 (图 10)。此外,形状因子 ( $T$ ) 的分布表明 2 个玄武岩柱体中间部分样品以拉长状椭球体 ( $T < 0$ ) 为主,而柱体边部样品则以压扁状椭球体 ( $T > 0$ ) 为主 (图 10)。这些结果表明柱体边部磁性矿物的各向异性较弱,这可能与柱体边缘和中心存在显著的冷却速率差异有关。在岩浆冷凝过程中,玄武岩柱体边部的冷却速率较快,磁性矿物的结晶与定向时间较短,因而导致磁化率与各向异性度相对较低。相反,玄武岩柱体中间部分冷却速率相对较慢,可能在较长时间内保持高温塑性或半熔融状态,使磁性矿物得以充分结晶、富集并在热收缩应力的作用下发生定向排列,从而形成了更高的  $K_m$ 、 $L$ 、 $P_j$ 。此外,一阶反转曲线 (FORC) 图 (图 5、图 6) 揭示了磁性颗粒的磁畴状态的空间差异,这同样反映了柱体边部和中部的冷却速率差异。单畴 (SD) 颗粒的一阶反转曲线 (FORC) 图表现为完全闭合的等值线,而多畴 (MD) 颗粒则表现为完全向纵轴开口的等值线。对于 2 个玄武岩柱,位于边部的 16 个样品 (每侧各 8 个) 的 FORC 图形态趋向于接近 SD 颗粒的 FORC 图形态,特别是玄武岩柱 A 边部的 4 个样品 (24BF57、24BF58、24BF59、24BF60); 而位于中间部分的 8 个样品的 FORC 图形态则更接近 MD 颗粒的 FORC 图形态 (图 5, 图 6)。这在一定程度上也反映了柱体边部和中部由冷却速率所控制的粒径差异。柱体边部样品的磁性颗粒粒径相对较小,与其较快的冷却速率相一致;而柱体中部样品的磁性颗粒粒径相对较大,与其较慢的冷却速率相一致。

### 4.2 玄武岩柱状节理形成之后的冷却历史

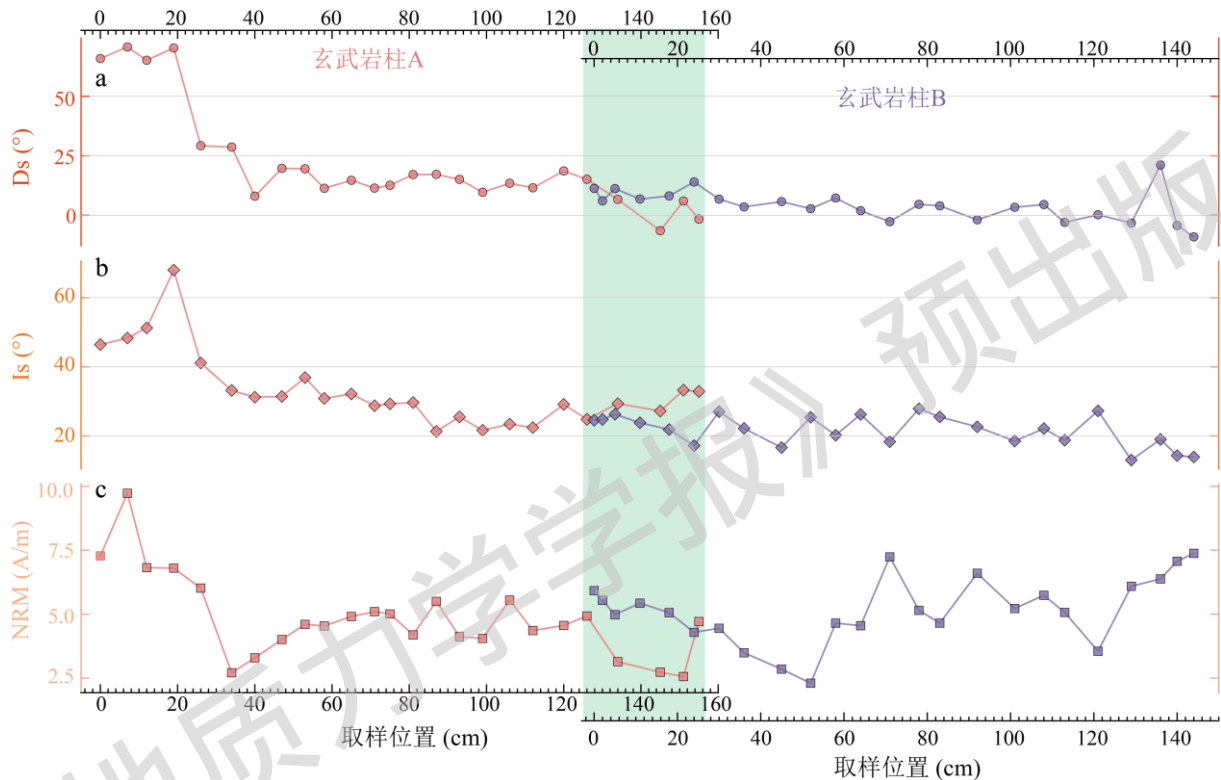
已有研究表明,玄武岩岩浆的固相线温度为  $980^{\circ}\text{C}$ ,在岩浆冷凝收缩过程中,只有当温度下降到固相线以下时才会发生应力积累,并在  $840\sim 890^{\circ}\text{C}$  发生应力释放与局部破裂,从而形成柱状节理 (Lamur et al., 2018)。热退磁结果显示,玄武岩柱样品携带的剩磁在加热到  $\sim 200^{\circ}\text{C}$  时就已经被清洗掉 80%,剩下 20% 的剩磁则在大约  $200\sim 600^{\circ}\text{C}$  之间被退去 (图 11)。显然,样品携带的特征剩磁记录的是玄武岩柱状节理形成之后的古地磁场方向。

采自 2 个玄武岩柱体横截面的 49 块连续分布的样品中,43 块样品的特征剩磁方向较为集中,而玄武岩柱 A 边部的 6 块样品 (24BF36、24BF37、24BF38、24BF39、24BF40、24BF41) 则表现出明显不同的特征剩磁方向 (图 12, 图 13)。基于各样品的特征剩磁方向,计算出了 49 个虚地磁极 (VGP)。经磁面理校正后,43 个比较集中的 VGP 较磁面理校正前更加靠近北极点 (图 14a、14b),这证明用磁面理对火山岩样品的古地磁数据进行倾斜校正是合理的。玄武岩柱 A 边部的 6 块样品的 VGP 位置变化较大,而其余 43 块样品的 VGP 位置则相对集中 (图 14b),这种差异很可能记录了地磁场的长期变化。

玄武岩柱 A 边部的 6 块样品的古地磁偏角 ( $D_s$ )、古地磁倾角 ( $I_s$ ) 和天然剩磁强度 (NRM) 与其余样品显著不同 (图 13)。磁偏角 ( $D_s$ ) 和磁倾角 ( $I_s$ ) 沿着取样方向 (从 24BF36 到 24BF85) 呈现出逐渐减小的趋势。这反映了在降温过程中,古地磁场的方向以及强度的变化。值得注意的是,2 个玄武岩柱体空间位置相互交错区域的样品 (图 14c; 玄武岩柱 A 右部与玄武岩柱 B 左部) 的磁偏角 ( $D_s$ ) 和磁倾角 ( $I_s$ ) 呈现相近的大小和基本

一致的变化趋势 (图 13)。这说明两部分样品记录了相同的古地磁场信息, 即二者的冷却时间窗高度重叠, 表明它们经历了近乎同步的冷却过程。这暗示玄武岩柱状节理的冷却过程具有明显的方向性。

综合上述结果, 在玄武岩冷却凝固形成柱状节理后, 其冷却并非从柱体边缘同步、均匀地向中心推进; 而是经历了从样品 24BF36 到 24BF85 方向的非对称性、单一方向性的区域冷却过程。冷却前锋是沿着从样品 24BF36 到 24BF85 的方向穿过了 2 个柱体 (图 14c)。可能受到未知的局部热传导异常的影响, 玄武岩柱 A 边部的 6 块样品所代表的区域应该比其他部分经历了更为迅速的冷却, 因而更容易记录古地磁场的变化。而其它 43 块样品所代表的区域则冷却比较缓慢, 每个样品经历了较长时间的冷却过程, 可能代表了地磁场长期变化过程中按照一定时间间隔平均的结果, 因此记录了相对平滑和稳定的古地磁场方向变化 (图 13)。



绿色阴影代表 2 个柱体的空间位置相互交错的部分

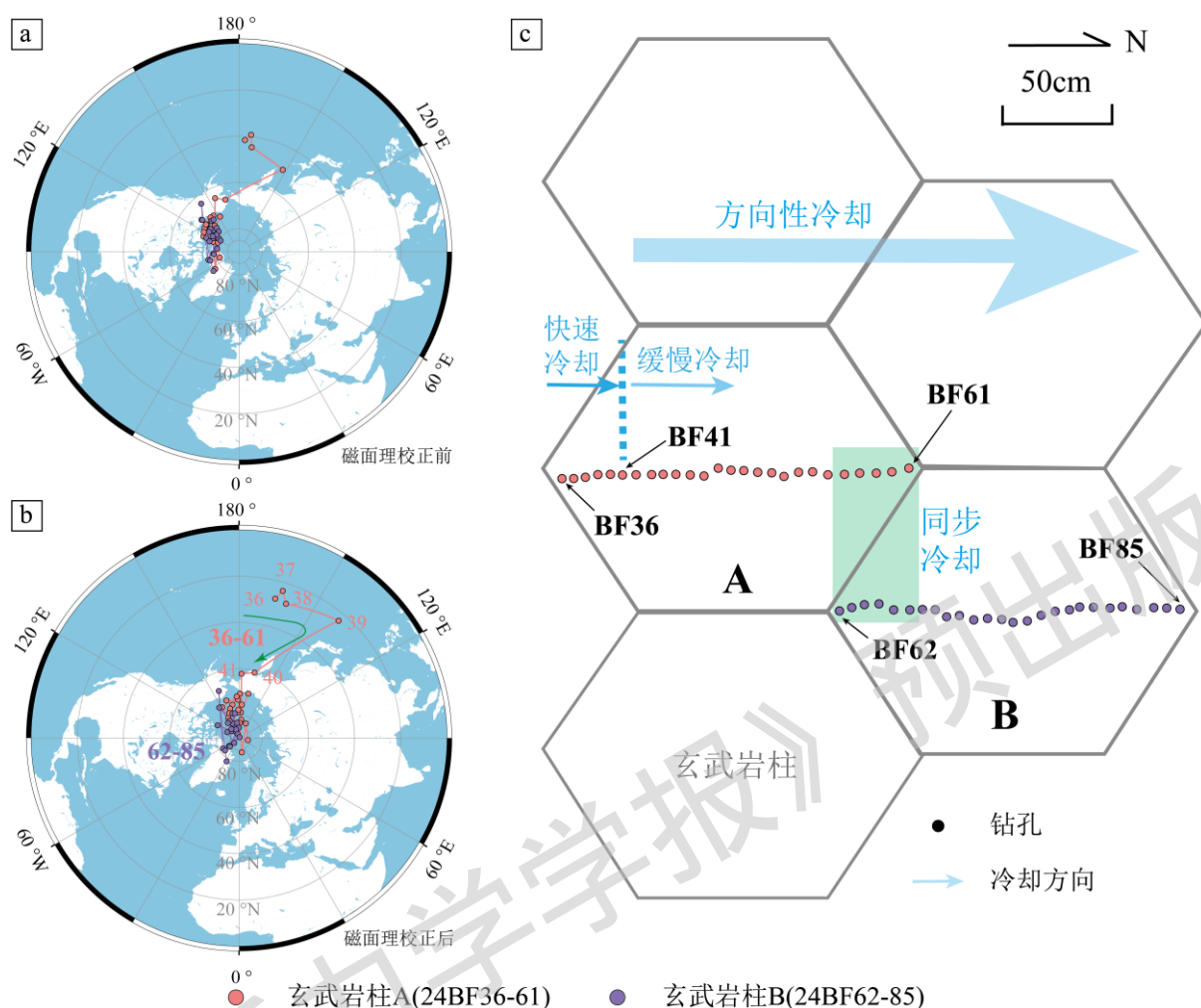
a—磁偏角 ( $D_s$ ) 变化; b—磁倾角 ( $I_s$ ) 变化; c—天然剩磁强度 ( $NRM$ ) 变化

图 13 玄武岩柱 A 和玄武岩柱 B 样品的磁偏角 ( $D_s$ )、磁倾角 ( $I_s$ ) 和天然剩磁强度 ( $NRM$ )

Fig. 13 Declination ( $D_s$ ), inclination ( $I_s$ ), and natural remanent magnetization ( $NRM$ ) of samples from basalt columns A and B

(a) Variations in declination ( $D_s$ ); (b) Variations in inclination ( $I_s$ ); (c) Variations in natural remanent magnetization ( $NRM$ )

Green shading indicates the spatially overlapping portions of the two columns



绿色阴影代表2个柱体的空间位置相互交错的部分

a—玄武岩柱样品磁面理校正前的 VGP；b—玄武岩柱样品磁面理校正后的 VGP；c—柱状玄武岩的冷却模式图

图 14 玄武岩柱样品的 VGP 变化及柱状玄武岩的冷却模式图

Fig. 14 Virtual geomagnetic poles (VGPs) of samples from two basalt columns and cooling history models of columnar basalts

(a) VGPs of samples from basalt columns A and B before bedding tilt correction; (b) VGPs of samples from basalt columns A and B after bedding tilt correction; (c) schematic cooling process of the columnar basalts

Green shading indicates the spatially overlapping portions of the two columns.

## 5 结论

岩石磁学与古地磁学分析结果揭示了泰国北碧府 Bo Phloi 剖面上新世柱状玄武岩的冷却历史及磁学结构特征。综合岩石磁学与古地磁学分析结果，主要获得以下结论和认识：

(1) 北碧府上新世玄武岩柱的主要磁性矿物为具有不同矫顽力的假单畴 (PSD) 钛铁矿颗粒。磁化率各向异性 (AMS) 结果显示磁化率最小轴 ( $K_3$ ) 趋向直立，而最大轴 ( $K_1$ ) 和中间轴 ( $K_2$ ) 趋向水平，反映了岩浆就位过程中的原生近水平流动。

(2) 在岩浆冷凝过程中，玄武岩柱体边部冷却速率相对较快，磁性矿物颗粒粒径相对较小，磁化率各向异性张量椭球以压扁状椭球为主，各向异性度较低；而柱体中部冷却速率相对较慢，粒径相对较大，可能在较长

时间内保持高温塑性或半熔融状态，磁性矿物得以相对更充分结晶、富集并在热收缩应力的作用下发生定向排列，磁性颗粒以拉长型磁化率椭球为主，各向异性度较高。

(3) 用磁面理对剩磁方向进行倾斜校正后虚地磁极 (VGPs) 更加靠近北极点，这表明用磁面理校正火山岩的古地磁数据是合理的。

(4) 采自 2 个玄武岩柱体横截面的 49 块连续分布的样品的剩磁方向和虚地磁极 (VGPs) 的系统变化指示玄武岩柱在凝固形成节理后，其冷却并非从柱体边缘同步、均匀地向中心推进，而是经历了非对称性的、单一方向性的区域冷却过程。这一非对称单向冷却过程为高精度重建地磁场长期变化提供了独特的天然载体，其连续的剩磁记录可用于约束地磁场变化的时间尺度，为相关研究提供了新的技术路径与观测对象。

**作者贡献声明：** 周恩雄、闫永刚负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；周恩雄、闫永刚、来振洋、李旦欣、付亚兰、邓晓泰、Anchana Thanakan、Veeravinantanakul Apivut、Charusiri Punya 参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；周恩雄、闫永刚、Charusiri Punya、王伟涛、黄宝春、张培震参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

#### Author's Contributions:

ZHOU Enxiong and YAN Yonggang conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; ZHOU Enxiong, YAN Yonggang, LAI Zhenyang, LI Danxin, FU Yalan, DENG Xiaotai, ANCHANA Thanakan, VEERAVINANTANAKUL Apivut and CHARUSIRI Punya participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; ZHOU Enxiong, YAN Yonggang, CHARUSIRI Punya, WANG Weitao, HUANG Baochun and ZHANG Peizhen were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

**利益冲突声明：** 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

**Conflict of Interests :** All authors declare no conflict of interests.

#### References

- ALMQVIST B S G, BOSSHARD S A, HIRT A M, et al., 2012. Internal flow structures in columnar jointed basalt from Hrepphólar, Iceland: II. Magnetic anisotropy and rock magnetic properties[J]. *Bulletin of Volcanology*, 74(7): 1667-1681.
- An A R, CHOI S H, YU Y, et al., 2017. Petrogenesis of Late Cenozoic basaltic rocks from southern Vietnam[J]. *Lithos*, 272-273:192-204.
- AO H, DENG C L, 2007. Review in the identification of magnetic minerals[J]. *Progress in Geophysics*, 22(2): 432-442. (in Chinese with English abstract)
- BARR S M, MACDONALD A S, 1981. Geochemistry and Geochronology of Late Cenozoic Basalts of Southeast Asia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 92(8\_Part\_II): 1069-1142.
- BROWN H C, KHAN M A, STACEY F D, 1964. A search for flow structure in columnar basalt using magnetic anisotropy measurements[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 57: 61-65.
- DEFANT M J, MAURY R, JORON J L, et al., 1990. The geochemistry and tectonic setting of the northern section of the Luzon arc (The Philippines and Taiwan) [J]. *Tectonophysics*, 183(1): 187-205.
- DUNLOP D J, 1995. Magnetism in rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B2): 2161-2174.
- ELLWOOD B B, 1979. Anisotropy of magnetic susceptibility variations in Icelandic columnar basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(2): 209-212.
- ELLWOOD B B, FISK M R, 1977. Anisotropy of magnetic susceptibility variations in a single icelandic columnar basalt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 35(1):

116-122.

- FOLEY S, MOLYNEUX T, 1694. An account of the Giants Caus-Way in the north of Ireland: by the reverend Dr. Sam. Foley[J]. *Philosophical Transactions*, 18: 170-182.
- GILMAN J J, 2009. Basalt columns: Large scale constitutional supercooling? [J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 184(3): 347-350.
- GOEHRING L, MORRIS S W, 2008. Scaling of columnar joints in basalt[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 113: B10203.
- GUO L, CHU Y, LEI Y Y, et al., 2026. Tectonic evolution of the Sumatran Fault: synthesis and perspective[J]. *Journal of Geomechanics*, 32(2): 1-22. (in Chinese with English abstract)
- GURIOLI L, PARESCHI M T, ZANALLA E, et al., 2005. Interaction of pyroclastic density currents with human settlements: Evidence from ancient Pompeii[J]. *Geology*, 33(6): 441-444.
- GUY B, 2010. Comments on “Basalt columns: Large scale constitutional supercooling?” by John Gilman (JVGR, 2009) and presentation of some new data [J]. *Volcanol. Geotherm. Res.* 184 (2009), 347–350 [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194(1): 69-73.
- GUY B, COZE J, 1990. Reflections on columnar jointing of basalts: the instability of the planar solidification front[J]. *Comptes rendus de l'Académie des sciences Paris*, 311: 943-949.
- HETENYI G, TAISNE B, GAREL F, et al., 2011. Scales of columnar jointing in igneous rocks: field measurements and controlling factors[J]. *Bulletin of Volcanology*, 74: 457-482.
- HROUDA F, 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics[J]. *Geophysical surveys*, 5: 37-82.
- HSUI A T, 1989. Possible consequences of a fluid dynamic origin for columnar joints in basalts [J]. *Achives Des Sciences*, 42(2): 425-435.
- HSUI A T, RIAHI D, 2001. Onset of thermal chemical convection with crystallization and its geological implications[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4): 1525-2027.
- KANTHA L H, 1980. A note on the effect of viscosity on double-diffusive processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B8):4398-4404.
- KANTHA L H, 1981. ‘Basalt fingers’ – origin of columnar joints? [J]. *Geological Magazine*, 118(3): 251-264.
- LAMUR A, LAVALLEE Y, IDDON F E, et al., 2018. Disclosing the temperature of columnar jointing in lavas[J]. *Nature Communications*, 9(1): 1432.
- LI C F, XU X, LIN J, et al., 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958-4983.
- LORE J, GAO H J, AYDIN A, 2000. Viscoelastic thermal stress in cooling basalt flows[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B10): 23695-23709.
- MATTSSON H B, CARICCHI L, ALMQVIST B S G, et al., 2011. Melt migration in basalt columns driven by crystallization-induced pressure gradients[J]. *Nature Communications*, 2(1): 299.
- MOLYNEUX T, 1698. A letter from Dr. Thomas Molyneux, to Dr. Martin Lister, Fellow of the Colledge of Physicians, and of the Royal Society, in, London: containing some additional observations on the Giants Causway in Ireland[J]. *Philosophical Transactions*, 20: 209-223.
- MONDAL T K, CHOWDHURY A, SAIN A, et al., 2020. Understanding the maturity of columnar joints and its spatial relationship with eruptive centre: A critical appraisal from the Rajmahal basalt, India[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 326: 106867.
- PAN X Q, SHEN Z Y, CHEN N H, et al., 2011. Emplacement mechanism of diabase dyke swarms in Shengsi Island: Evidence from magnetic anisotropies[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 54(12): 3269-3279. (in Chinese with English abstract)
- PHILLIPS J C, HUMPHREYS M C S, DANIELS K A, et al., 2013. The formation of columnar joints produced by cooling in basalt at Staffa, Scotland[J]. *Bulletin of Volcanology*, 75: 715.
- RADHAKRISHNAMURTY C, LIKHITE S D, RAJA P K S, et al., 1971. Magnetic Grains in Bombay Columnar Basalts[J]. *Nature Physical Science*, 234(45): 33-35.
- SYMONS D T A, 1967. The Magnetic and Petrologic Properties of a Basalt Column[J]. *Geophysical Journal International*, 12(5): 473-490.
- TARLING D H, HROUDA F, 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*[M]. Chapman and Hall, London.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI J, 1982. Magnetic anisotropy study of a columnar basalt from San Anton, Morelos, Mexico[J]. *Bulletin of Volcanology*, 45(1): 1-8.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI J, BÖHNEL H, NEGENDANK J, et al., 1991. Magnetic Properties and Domain State of Titanomagnetites in a Columnar Basalt from Mexico[J]. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 43(3): 189-205.
- YAN Q S, SHI X F, METCALFE I, et al., 2018. Hainan mantle plume produced late Cenozoic basaltic rocks in Thailand, Southeast Asia[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 2640.
- ZHOU S Y, WU C, 2021. Discussion on the formation mechanism of basalt columnar joint hexagonal structure[J]. *Geological Review*, 67(5): 67060019. (in Chinese with

English abstract)

YUAN L, 2019. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of the Late Cenozoic basalt from the Thailand and its geodynamical significance[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, MNR. (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

敖红, 邓成龙, 2007. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾[J]. 地球物理学进展, 22(2): 432-442.

郭琳, 褚杨, 林伟, 等, 2026. 苏门答腊断层的构造演化: 综述与展望[J]. 地质力学学报, 32(2): 1-22.

潘小青, 沈中悦, 陈宁华, 等, 2011. 崂山岛辉绿岩墙群的侵位方式: 来自磁组构的证据. 地球物理学报, 54(12): 3269-3279.

周思耘, 吴晨, 2021. 玄武岩柱状节理六边形结构形成机制探讨[J]. 地质评论, 67(5): 67060019.

袁龙, 2019. 泰国晚新生代玄武岩矿物学、岩石化学特征、岩石成因及其地质意义 [D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所.

《地质力学学报》预出版