中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 6 期： 2305–2315
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

过去十万年以来地磁场记录中磁倾角浅化与非偶极子分量特征

刘鹏飞[1*]，Sanja PANOVSKA[2]，张可可[1]，Ann M. HIRT[3]

1. 澳门科技大学澳门空间技术与应用研究院，澳门 999078
2. GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Potsdam D-14473, Germany
3. Institute of Geophysics, ETH Zürich, Zürich CH-8092, Switzerland
* 通讯作者，E-mail：pengfei.liu2018@outlook.com

2025-07-02收稿，2026-01-12修回，2026-03-12接受，2026-05-22网络版发表
国家自然科学基金项目(42250101、42250103)、澳门基金会和澳门特别行政区科学技术发展基金项目(0002/2019/APD、0001/2025/RDP)和德国研究基金会SPP2404“DeepDyn”项目(521548146)资助

摘要 湖泊与海洋沉积物中的古地磁记录已被广泛用于构建千年至万年时间尺度的地磁场模型。然而，关于沉积物样品是否因沉积压实作用而发生磁倾角浅化，尚缺乏系统性研究。本文聚焦于全球82个时间跨度约为10万年的独立沉积记录，将其虚地磁极(VGP)离散度与基于过去10 Ma熔岩数据建立的THG24地磁场模型的预测值进行对比，以检验二者是否具有相似的长期变特征。结果表明，大部分记录的VGP离散度与模型预测值存在差异，表明其地磁场方向偏差并非来源于地磁场长期变。进而，我们采用考虑长期变的磁倾角浅化校正方法(SVEI)进行检验，发现仅有一个记录表现出浅化现象，而采用传统的E/I校正方法则指示中纬度地区的27个沉积记录存在浅化现象。利用校正后的磁倾角数据构建了GGF100k-IC模型，以分析磁倾角浅化校正对地磁场轴向与非轴向分量的影响。分析表明，八极子项(g_3^0,h_3^2和h_3^1系数)受浅化校正的影响最为显著。综合来看，基于SVEI方法对过去10万年沉积记录的分析，并未发现统计上显著的、由压实作用引起的磁倾角浅化特征。值得注意的是，由于SVEI方法包含了非偶极子分量，这表明在磁倾角浅化校正中应采用考虑非偶极子项模型。此外，与过去10 Ma的熔岩古地磁数据相比，本研究约10万年的沉积数据集显示出更大的VGP离散度。

关键词 地磁场结构，时间平均地磁场，磁倾角浅化，八极子，古长期变

1 引言

古地磁学的一个基本前提是，在足够长的时间尺度上进行平均后，火成岩、变质岩及沉积岩所记录的地球磁场近似为一个地心偶极子场(Strangway，1970；Tarling，1971；McElhinny，1973)。Opdyke和Henry(1969)通过分析全球海洋沉积岩芯的磁倾角数据检验该假说，结果表明在10^5–10^6年尺度上，时间平均地磁场非常接近于地心轴向偶极子场(GAD)。然而，Wilson(1970，1971)的研究指出，“偏移偶极子”(Offset Dipole)模型与数据记录的拟合效果更佳。基于古地磁数据球谐分析研究进一步证实，时间平均地磁场模型中存在显著的非偶极子成分(四极子与八极子项)(例如，Merrill等，1979)。近年来，基于古倾角、古强度或二者联合数据的多项研究也支持，在地质时间尺度上，地磁场几何结构并非严格符合GAD模型(例如，Veikkolainen等，2014；Veikkolainen等，2017；Rolf和Pesonen，2018；Lhuillier等，2023)。然而，Torsvik等(2008)基于过去3.2亿年的古地磁框架所建立的全球板块运动模型，为时间平均地磁场符合GAD模型提供了有力证据。

中文引用格式：刘鹏飞, Panovska S, 张可可, Hirt A M. 2026. 过去十万年以来地磁场记录中磁倾角浅化与非偶极子分量特征. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2305–2315, doi: 10.1360/N072025-0345
英文引用格式：Liu P, Panovska S, Zhang K, Hirt A M. 2026. Characteristics of inclination flattening and non-dipole components in geomagnetic field behavior over the past 100 kyr. Science China Earth Sciences, 69(6): 2262–2271, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1901-2

© 2026《中国科学》杂志社

Biggin等(2020)通过对比基于观测数据建立的地磁场模型与发电机数值模拟结果，建立了赤道区域VGPs的离散度与地表轴向偶极子场强度中值之间的幂律关系。据此，结合已报道的赤道VGP离散度估计值，进一步证明了在过去10^7–10^9年间，GAD场始终是地磁场的主要成分。当然，这并不排除地磁场形态曾出现显著异常情况的可能，只是此类时期较为罕见。

沉积物在沉积后发生的压实作用可能导致其记录的磁倾角偏低(Blow和Hamilton，1978；Anson和Kodama，1987；Tauxe，2005；Mitra和Tauxe，2009)，该现象称为磁倾角浅化。最近，Liu等(2023)利用Tauxe和Kent(2004)提出的E/I(Elongation-Inclination)方法，对全新世(约1万年)湖泊与海洋沉积物的古地磁记录进行了磁倾角浅化检验。该方法基于GAD假说构建的TK03.GAD地磁场模型对磁倾角进行校正。其研究发现，在78个沉积记录中，有20个存在磁倾角浅化特征。将未校正(即浅化)以及校正后的平均磁倾角，分别与由火成岩及考古地磁数据获得的平均古地磁倾角进行对比。结果表明，未校正的倾角反而与全新世地磁场记录更为吻合，且与同期地磁场模型的预测值之间也显示出更强的相关性。在空间分布上，具有磁倾角浅化的记录主要分布于赤道至南北纬40°之间的区域，且与CALS10k.2地磁场模型中呈现磁倾角异常的区域一致(Constable等，2016)。Liu等(2023)注意到，基于火成岩数据且更长时间尺度的时间平均地磁场模型同样预测了过去10 Ma中纬度地区存在磁倾角异常(Cromwell等，2018；de Oliveira等，2021)。Biggin等(2020)通过数值模拟也揭示了更浅的磁倾角，这与在赤道南北25°–30°纬度带内GAD场的预期特征相符。以上研究表明，尽管地磁场以GAD为主导，但古地磁数据中存在的高阶非偶极子分量不容忽视。正是这些分量构成了包含高阶球谐项的地磁场模型(Tauxe和Kent，2004)。

最近，Tauxe等(2024)在TK03.GAD模型基础上，构建了新的地磁场模型——THG24。该模型不仅包含了地磁场的GAD分量，还引入了四极子与八极子分量等高阶项，旨在表征古长期变(paleosecular variation，PSV)，构建基于一个全新的、涵盖过去10 Ma火成岩古地磁方向的数据库(PSV10-24)(Tauxe等，2024)。此外，该研究还提出了相应的统计检验方法，用于评估古地磁数据集是否符合THG24模型预测的PSV特征。这一新模型现已应用于改进原有的E/I方法，从而形成一种新的磁倾角浅化与检验校正方法，称为SVEI(Tauxe等，2024)。

本研究采用SVEI方法，对Liu等(2023)基于TK03.GAD模型及传统E/I方法判定存在磁倾角浅化现象的全新世数据集进行了重新评估。由于SVEI方法包含了四极子与八极子项，它有望对中纬度地区观测到的磁倾角浅化现象提供更合理的解释。在此基础上，进一步选取时间跨度约10万年的海洋与湖泊沉积记录，运用基于THG24模型的SVEI方法检验其中是否存在磁倾角浅化。作为对比，亦采用基于传统TK03.GAD模型的E/I方法对同一数据集进行分析。旨在探讨如果存在磁倾角浅化现象，其对地磁场偶极子、四极子及八极子分量的可能影响。为此，引入了Panovska等(2018b)建立的过去10万年全球地磁场模型(GGF100k)，该模型综合了沉积、考古与火山岩数据。该模型揭示了时间平均的磁倾角异常主要表现为一个横跨赤道的大范围负异常区，以及一个分布在太平洋广阔纬度带内、范围相对较小的正异常区(Panovska等，2019)。通过分别基于未校正和经磁倾角浅化校正的沉积记录构建地磁场模型，对比分析受磁倾角浅化校正影响最为显著的地磁场模型球谐系数。最后，结合THG24模型对上述结果进行综合讨论。

2　数据与方法

2.1　沉积记录

全新世湖泊与海洋沉积记录的详情见Liu等(2023)，该研究指出存在磁倾角浅化记录主要分布于中纬度区域，广泛覆盖美洲、欧洲、非洲、中东、亚洲及澳大利亚等地区(图1a)。本研究采用约10万年沉积记录包含海洋与湖泊沉积物，且均具备可靠的磁偏角与倾角数据(Panovska等，2018a)；其中的绝大部分数据曾被Panovska等(2018b，2021)用于构建过去10万年的地磁场模型。全部82条记录主要来自中纬度地区，其中18个记录位于南半球，其余位于北半球(图1b)。各沉积记录的序号、地理位置、时间跨度及文献来源详见附表S1。需要说明的是，其中2个记录为复合叠加序列，数据已做平滑处理：(1)JAPANSV(Hyodo等，1993)综合了7个岩芯数据，具体包括Kizaki湖2个，Yogo湖1个，Osaka湾2个，Harima-Nada 1个，Mizushima-Nada 1个；(2)MAVORA(Turner等，2015)综合了3个岩芯数据，包括North Mavora湖2个，South Mavora湖1个。为保障统计样本量，合并了以下多个岩芯记录：墨西哥湾Orca盆地的md02-2551与md02-2552(Laj等，2006)，“西菲律宾海”的md97-2143(Horng等，2003)与ph05(Meng等，2009)，西北太平洋Shatsky Rise的ngc106与ngc108(Yamamoto等，2007)，北大西洋Blake Ridge的ODP 1061B/C(Bourne等，2013)，以及ODP 1062B/D/E(Bourne等，2012)。在对md02-2551/2、m97-2143与ph05以及ngc106/108三组记录进行合并时，对各岩芯的磁偏角数据进行了零均值校正，以消除不同记录间

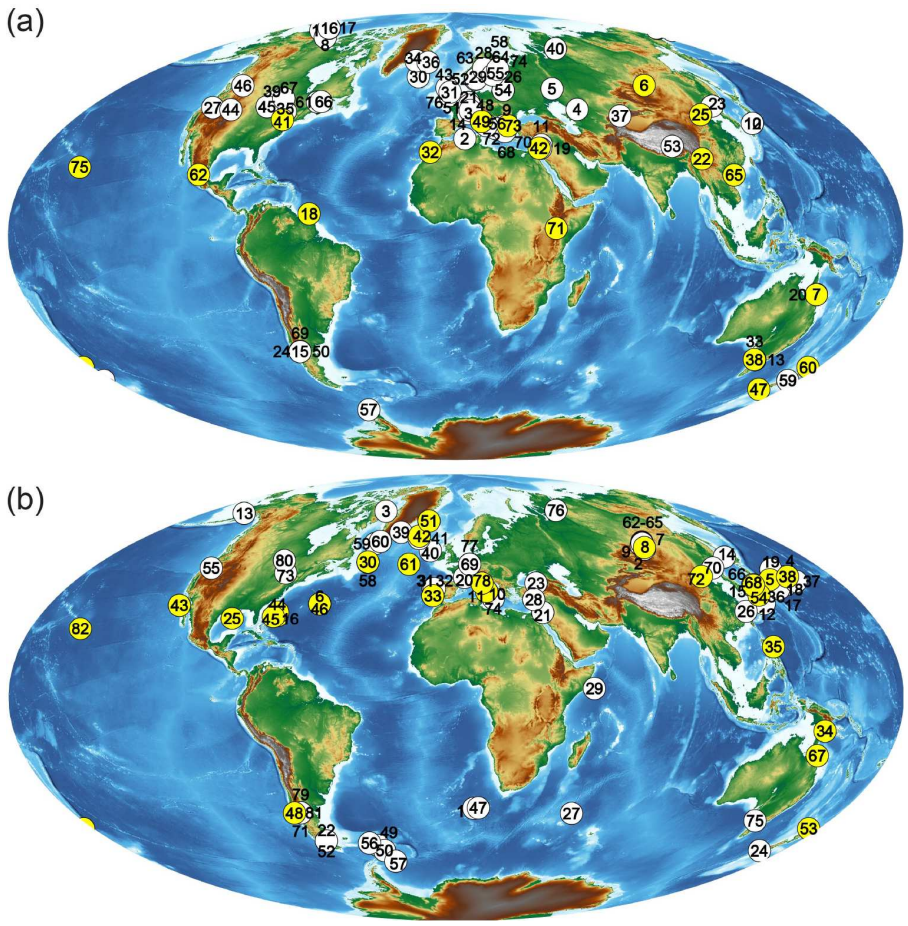


图1 沉积记录的空间分布。(a) 全球海洋与湖泊沉积记录分布，涵盖全新世时期，其中经基于TK03.GAD模型的E/I方法检测显示存在磁倾角浅化现象；(b) 过去10万年沉积记录的全球分布。圆圈(包括白色和黄色)内的数字均表示记录序列编号，其中黄色圆圈标注了经基于TK03.GAD模型的E/I方法分析存在磁倾角浅化的记录，详细列表见补充材料(附表S2和S3)

存在的系统偏差。为排除因沉积物扰动或地磁漂移事件产生的过渡方向等异常数据采用样品VGP相对于平均VGP的Vandamme偏差(Vandamme，1994)作为截断标准进行筛选。所有记录到Hilna Pali、Mono湖、Laschamp、Norwegian-Greenland海及Post-Blake等漂移事件的数据均被剔除。图2展示了来自格陵兰Irminger海盆的ODP 919岩芯(Channell，2006)实例，过渡方向数据通过上述Vandamme cut-off法予以排除。此外，剔除了所有磁倾角或磁偏角数据缺失的记录。在ODP 919记录中，被剔除的时间段总计1970年，其中Laschamp漂移事件占1240年，Mono湖漂移事件占730年。总体而言，因地磁漂移事件被剔除的时间区间相对较短，这主要是因为过去10万年间此类事件的平均持续时间约为1–2 ka(Korte等，2019；Panovska等，2019)。

2.2 数据处理

为评估各记录是否已充分平均掉古长期变的影响，遵循Tauxe等(2024)，对每个记录进行四项统计检验。前两项为Anderson-Darling检验(A^2D，A^2I)，用于检验记录的磁偏角和磁倾角分布是否符合THG24模型的预期(Anderson和Darling，1952；Tauxe等，2024)；后两项检验采用蒙特卡罗模拟，分别检验磁偏角沿拉长方向的分布($V2_{dec}$)以及拉长率本身(E)与模型预测的一致性。若未能通过任何一项检验，则表明该数据集相对于THG24模型，要么未能充分平均掉长期变，要么受到磁倾角浅化的影响。此外，为探究关键参数影响，通过不同Fisher分布的精度参数κ(取值范围为10至无穷大)对上述四项检验结果进行敏感性分析。

若检测到磁倾角浅化，则采用SVEI方法进行校正。本研究重点探讨了基于Tauxe和Kent(2004)提出的原始E/I方法进行磁倾角浅化校正对全球地磁场模型的影响。所有校正计算均使用古地磁数据处理软件PmagPy中集成的SVEI与E/I方法完成(Tauxe等，2016)。校正基于King(1955)的公式：

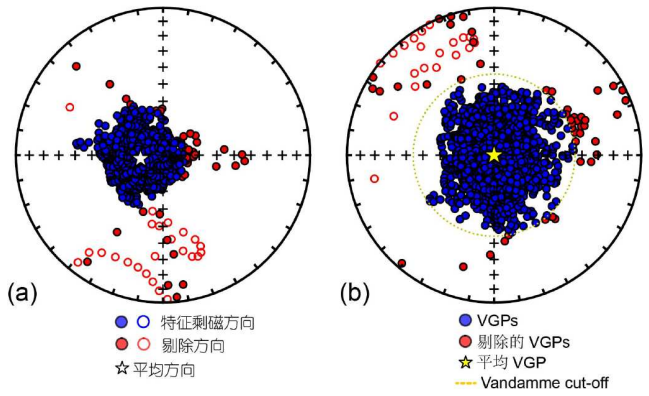


图 2　沉积记录ODP 919的等面积投影的地磁方向与VGP分布。(a) 地磁方向分布，其中圆圈填充与不填充分别表示下半球与上半球投影；(b) 平均值移至中心的VGP分布

$$f = \tan I_0 / \tan I_f \tag{1}$$

其中，f为浅化因子，I_0与I_f分别为校正前、后的磁倾角。PSV会导致地磁方向沿磁子午线(南北向)拉长，且拉长程度与纬度有关；而磁倾角浅化则会使地磁记录方向相对于磁子午线在东西向上发生拉长(Tauxe和Kent，2004)。需注意的是，浅化校正方法的可靠性对数据量敏感。为保证结果的可靠性，通常建议每个记录至少包含100个独立的方向数据(Koymans等，2016；Vaes等，2021)。在本研究数据集中，有两个显示磁倾角浅化的全新世记录所包含的方向数据均不足100个(BAI为58个数据点，LEB为42个数据点)；有两个10万年数据记录的方向数据量少于100，分别为F08-37(54个数据点)(Ge等，2013)和Summer Lake(64个数据点)(Negrini等，2014)。值得注意的是，这些数据量不足的记录均未显示出明显的浅化。与此相对，通过E/I方法识别出磁倾角浅化的记录ODP 1010(Hayashida等，1999)，其方向数据为98个，亦接近建议阈值的下限。

此外，VGP的离散度(S)是量化PSV的常用指标，其定义为各VGP相对于其平均方向角偏差的标准差(Cox，1970)：

$$S^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta_i)^2 \tag{2}$$

其中，Δ表示角偏差，N为独立虚地磁极的数量。

3　结果

3.1　全新世湖泊记录与THG24模型的对比

首先，基于THG24模型对所有全新世记录进行了重新评估，重点关注 Liu等(2023)采用的E/I方法判定存在磁倾角浅化的18个全新世记录。使用TK03.GAD模型时未显示磁倾角浅化的记录，在基于THG24模型的四项参数检验中并未全部通过，由于这些记录在基于TK03.GAD模型的E/I分析中未表现出磁倾角浅化现象，本项研究不再对其进行进一步处理。存在磁倾角浅化的18个全新世湖泊记录中，仅BAI和LEV两个记录在κ值趋近无穷大时通过了全部四项检验(附表S2)。其余16个记录中，大部分未能通过针对磁偏角与磁倾角一致性Anderson-Darling检验(A^2D，A^2I)，相比之下，拉长率(E)在超过50%的记录中(无论κ取何值)得以通过检验。

针对18个未能通过至少一项统计检验的记录，进一步采用SVEI方法进行分析，以判断其与THG24模型所预测的PSV偏差是否由磁倾角浅化引起(附图S1)。

综上所述，大部分最初被怀疑存在浅化的记录既未能通过全部四项统计检验，也未被SVEI方法证实存在真实的磁倾角浅化。这表明，对于这些全新世湖泊记录而言，地磁场的长期变可能并未被充分平均。

3.2　10万年记录与THG24模型对比分析

各沉积记录的古地磁方向如附图S2a1–S2a82所示。其中部分记录具有代表性，例如bb2、ODP 919、ODP 1061B/C、ODP 1233及ps2644-5等记录。大部分记录包含数百个样本，其中9个记录的样本数超过1000个。首先，计算各沉积记录的VGP，其分布见附图S2b1–S2b82。在统计分析中，依据Vandamme cut-off准则剔除偏离平均VGP过大的方向，共有79个记录执行了此项剔除，其中10个记录剔除的数据点少于5个。各记录的平均古地磁方向及相应统计参数详见附表S3。

随后，将每个记录与THG24模型及其预测的PSV分布进行比较。在此基础上，测试不同κ值的影响，结果汇总于附表S4。在κ=50时，沉积记录与THG24模型预测的PSV进行四项统计检验结果总结见附图S3。此时，仅有四个记录(M72/5-22、ODP 1061B/C、ODP 1062B/D/E和Summer)通过了全部四项检验。当κ=100时，除M72/5-22外，其余三个记录及con01-604-2均通过了所有检验。另有Pupuke记录较为特殊，仅在κ=10时能通过全部检验。总体而言，对于任何κ值，大多数记录均未通过磁偏角与磁倾角的一致性检验(A^2D和A^2I)。而在这四项检验中，$V2_{dec}$的通过率最高。此外，数据集能否通过任一项统计检验，与其沉积速率、时间跨度、样本数量或纬度均无显著相关性。

在全部82个记录中，有78个未能通过至少一项统计检验，进一步采用SVEI方法对这些记录进行了磁倾角浅化识别与校正(附图S4)。但仅有一个记录——来自菲律

宾海的合并记录md97-2143/ph05——获得了磁倾角浅化校正值。如图3所示，该记录的SVEI检验结果表明，校正后的倾角与未校正方向在统计上无显著差异。所有参数均显示，当浅化因子*f*值限定于0.55–0.70之间时(图3中黑色垂直点虚线)，该数据与THG24模型相符。

VGP离散度*S*与纬度之间的关系如图4所示。沉积记录所获得的VGP离散度与基于THG24模型构建的参考曲线吻合度不高，且通常低于模型预期值。尽管如此，这些观测值总体上仍处于由年龄小于50 Ma的古新世火山岩数据所确定的离散度范围之内(Engbers等，2024b)。此外，VGP离散度的大小与记录的平均沉积速率(图5a)、所覆盖的时间段(图5b)或样本数量(图5c)均未显示出显著的相关性。

3.3 10万年记录与TK03.GAD模型的对比分析

对全新世古地磁记录的分析表明，在使用TK03.GAD模型显示存在磁倾角浅化的18个记录中，无一在THG24模型检验中仍显示浅化现象。为此，进一步沿用TK03.

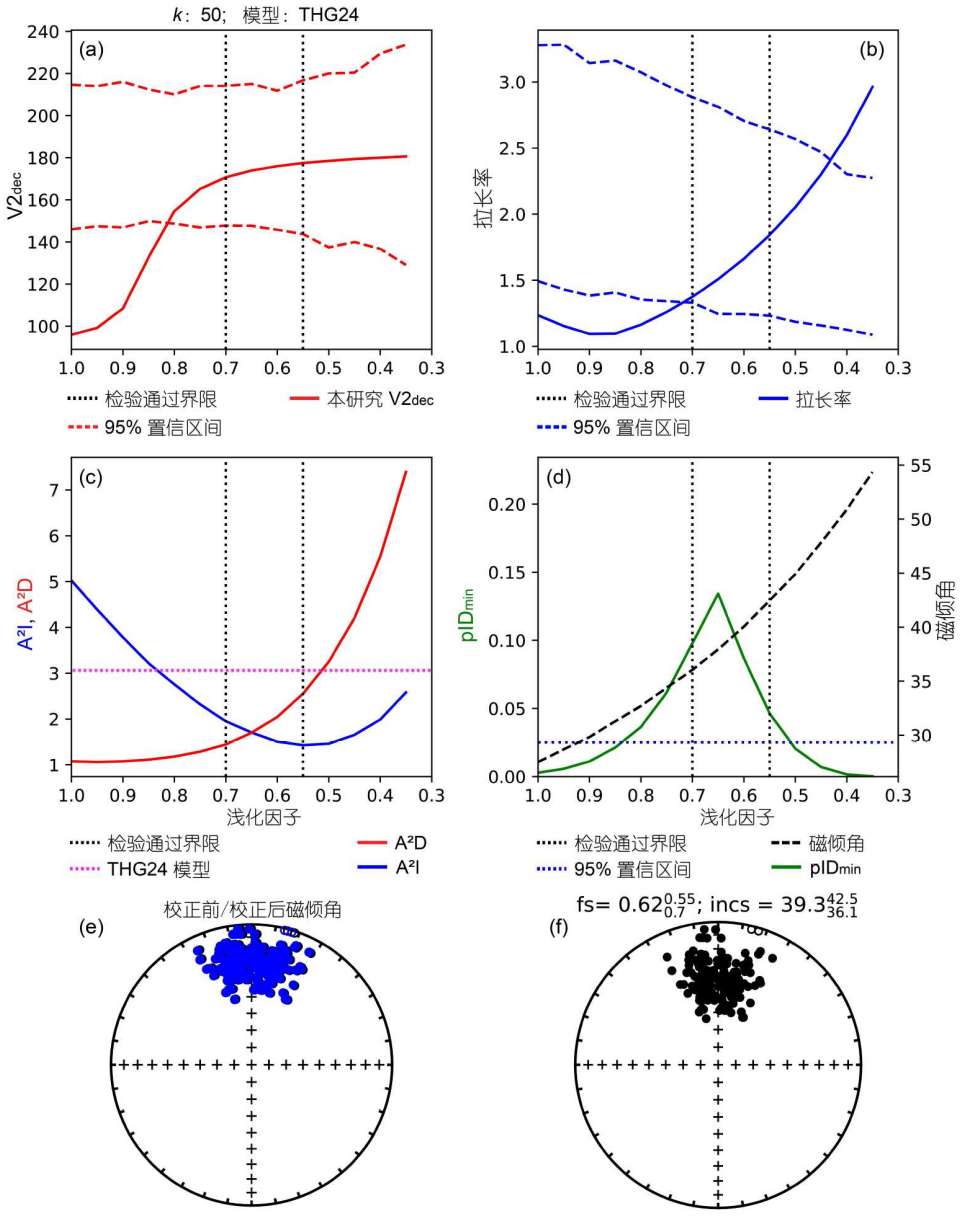


图3 md97-2143/ph05记录的SVEI检验。(a) 蒙特卡罗模拟获得的$V2_{dec}$分布(短划虚线表示95%置信区间)与沉积记录$V2_{dec}$值(实线)随浅化因子*f*变化的对比；(b)与(a)相似，但表示拉长率*E*随*f*的变化(本图及后续图中*E*均表示拉长率)；(c) Anderson-Darling检验结果随*f*的变化，其中红线代表A^2D，蓝线代表A^2I；(d) 黑色短划虚线表示磁倾角随*f*的变化，绿色曲线为pID_{min}，蓝色点虚线为95%置信界限，高于该界限的分布视作与模型一致(本图及后续图均按此标准)；(e) 磁倾角浅化校正前古地磁方向的等面积赤平投影；(f) 磁倾角浅化校正后的古地磁方向投影

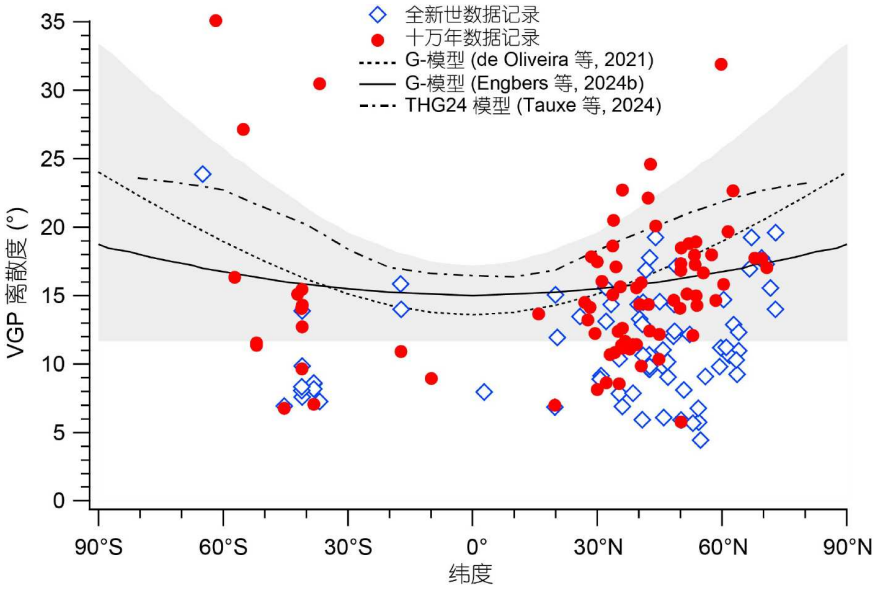


图 4　磁倾角浅化校正前的各沉积记录VGP离散度随纬度的变化关系。其中，红色实心圆代表10万年尺度的记录，蓝色空心菱形代表全新世记录。将上述数据与以下相关模型的预测值进行了对比：基于过去10 Ma数据构建的G-Model预测曲线(黑色点虚线；de Oliveira等，2021)、THG24模型预测曲线(黑色点划线；Tauxe等，2024)，以及Engbers等(2024b)建立的过去50–23 Ma的G-Model趋势线(黑色实线)，其阴影区域表示通过自助法计算得到的95%不确定性范围

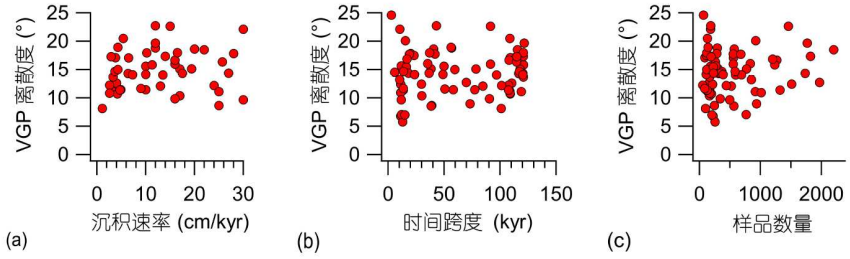


图 5　VGP离散度随各因素的变化关系。(a) 记录的平均沉积速率；(b) 记录所覆盖的时间跨度；(c) 记录中的样本数量

GAD模型，对时间跨度约10万年的沉积记录进行对比研究。在全部82个记录中，基于TK03.GAD模型的E/I分析共识别出27个可获得校正后磁倾角记录(附图S5)。然而，其中三个记录(con-01-604-2、ODP 1061B/C和U1308)的校正后磁倾角位于自助法(bootstrap)置信区间内(附表S5)，另有一个记录(ch89-9)处于统计临界范围。其余23个记录的校正后磁倾角与校正前具有显著差异。特别是，其中有5个沉积记录(BAR、BI2、FAN、MEZ和WAI)不仅在10万年尺度上，在针对全新世时段的研究中也同样表现出显著浅化(Liu等，2023)。Pupuke湖(PUP)记录在全新世期间呈现显著磁倾角浅化现象，而在更长的10万年记录中虽显示出磁倾角浅化特征，但校正前磁倾角与校正后磁倾角并无显著差异。以ODP 1063记录为例，其校正效果显著(图6a)。此外，在其余26个记录中，E/I校正方法虽生成一系列与TK03.GAD模型的交汇点，但无法明确界定磁倾角浅化。例如，记录U1302-03生成了25个自助法交汇点，却未能确定具有统计意义的校正后磁倾角值(图6b)。

基于上述结果，利用这27个记录的校正后倾角数据，分析磁倾角校正浅化对GGF100k模型的影响。

4　构建全球地磁场模型

为探究磁倾角浅化校正对地磁场分量的具体影响，本研究基于校正后的磁倾角数据，构建了一个时间跨度同为过去10万年的新模型(命名为GGF100k-IC，IC代表磁倾角校正(inclination corrected))，并与原始的GGF100k模型(Panovska等，2018b)进行对比。

尽管仅有27个记录显示出浅化且校正幅度有限，但新构建的GGF100k-IC模型与原始GGF100k模型相比，仍呈现出一定的差异(图7)。为验证结果的可靠性，对比了

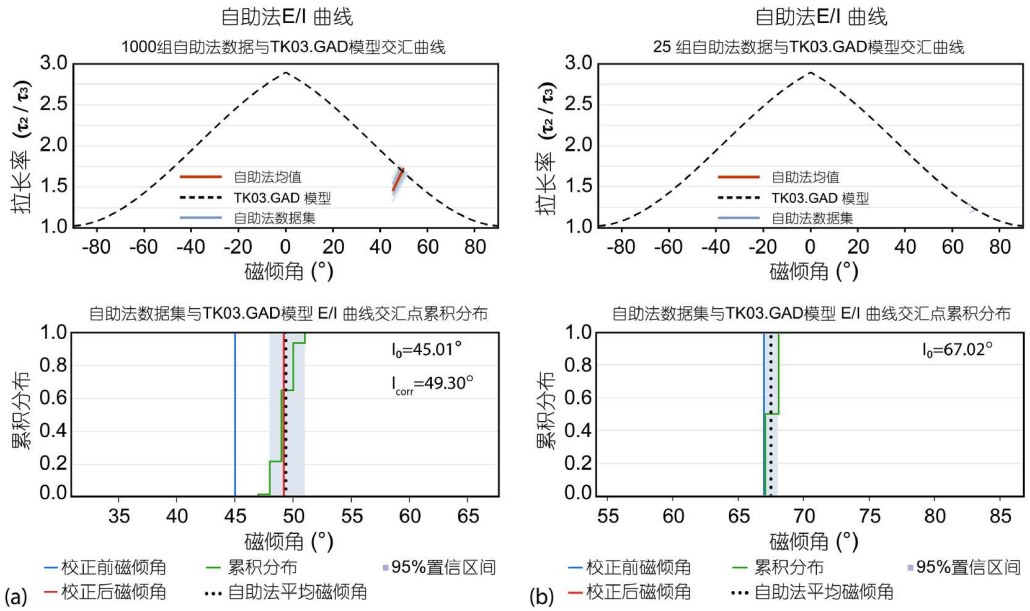


图6 E/I校正。(a) 获得校正后磁倾角值的沉积记录示例(ODP 1063)。上图展示了通过自助法获得的数据对的拉长率与磁倾角变化，及其与TK03.GAD场模型的交汇点分布；下图显示了这些自助法交汇点与TK03.GAD模型交集的累积分布(蓝线为矫正前磁倾角，红线为校正后磁倾角，黑色虚线为平均自助法磁倾角)。(b) 生成了自助法交汇点但不足以获得磁倾角浅化校正值的沉积记录示例(U1302-03)

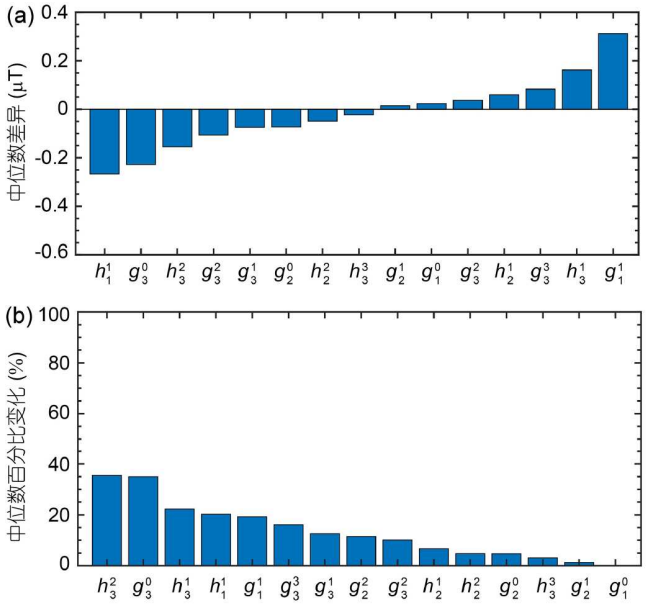


图7 地磁场模型系数对比。(a) GGF100k与GGF100k-IC模型(至3阶)高斯系数中位数差异的升序排列；(b) GGF100k-IC模型相对于GGF100k模型的中位数百分比变化(绝对值)，按降序排列。上述差异统计基于模型覆盖的10万年时段。百分比变化计算公式为($G_{GGF100k}-G_{GGF100k\text{-}IC}$)/$G_{GGF100k}$×100%，其中$G$代表某一给定高斯系数

采用不同正则化参数(即复杂度不同)的一系列模型。所有模型结果均表明，受浅化校正影响最显著的系数为八极子项(附图S6)。GGF100k和GGF100k-IC模型的各阶系数(至3阶)随时间的变化及其差异直方图见附图S7–S10。八极子项受到的影响最为显著，尽管影响程度相对有限(≤~35%)。其中，八极子项h_3^2和g_3^0受到的影响最大(约35%)，其次是h_3^1(约22%)。除八极子项外，赤道偶极子项(g_1^1和h_1^1)也受到了一定影响，这与其对中纬度地区磁场变化较为敏感的特性一致。这一发现与Lhuillier和Gilder(2013)的数值模拟结果相吻合，即磁倾角浅化是所有非偶极子分量共同作用的结果，而并非仅源于八极子项。本研究表明，10万年尺度上，当模型由更全面的数据集(包括未受磁倾角浅化影响的记录)约束时，其稳定性更高，受浅化校正的潜在影响也越小(注：在整个数据集中，相对于仅考虑g_1^0分量的TK03.GAD场模型，仅约33%的记录显示出磁倾角浅化现象)。

5 讨论

在探讨结果之前，需要对本研究使用的数据记录予以说明，构建地球磁场模型需要全球均匀分布的数据，而当前数据的空间覆盖仍以北半球为主；南半球的覆盖在很大程度上依赖于海洋岩芯记录。许多早期的海洋岩芯古地磁研究采用u-channel连续测量技术，与离散样品测量相比，该方法会使测试结果产生一定程度的平滑效应(例如，Channell等，2017；Philippe等，2018)。然而，若在建模中排除这些u-channel记录，将严重削弱全球，

特别是南半球的数据覆盖度。类似的方法学局限也存在于仅提供叠加平均数据的长期变研究中，例如本研究所用的JAPANSV和Mavora记录。以JAPANSV记录为例，其数据叠加处理导致观测到的方向离散度降低，从而与THG24模型预测的离散度产生偏差(图8)。值得指出的是，尽管该记录中五个岩芯总体平均方向与叠加数据存在差异，但这种局部差异对全球尺度磁场模型的整体影响有限。综上，为从根本上评估和校正此类方法学偏差，强烈建议未来研究将用于生成叠加数据的原始测量数据公开共享于古地磁数据库中，这将有利于极大地提高长期变模型和古磁场模型的可靠性。

本研究揭示，用于定义时间平均磁场的地磁场模型(GAD或包含高阶项的模型)直接决定了磁倾角浅化的识别结果。对比分析表明，当使用基于TK03.GAD的E/I方法时，在76个全新世记录与82个约10万年的记录中，分别有18个和27个显示出磁倾角浅化特征，且这些记录主要分布于中低纬度区域(图1)。针对10万年记录，依据仅包含纯GAD场的TK03.GAD模型进行了磁倾角浅化校正，并评估了其对GGF100k全球场模型(Panovska等，2018b)的影响。结果表明，此类校正对地磁场的八极子项的影响最为显著。为便于比较，将时间平均场各分量标准化表示为相对于轴向偶极子项(g_1^0)的百分比。如图9所示，校正与未校正模型各分量的百分比贡献表明，10万年尺度时间平均场中非轴向偶极子项的贡献与已发表的百万年尺度研究结果一致。具体而言，本模型轴向四极子项贡献约占g_1^0的4%，符合以往研究中报道的2%–5%范围(Johnson和McFadden，2015)。对于轴向八极子项，基于火山岩数据估计的过去5 Ma轴向八极子项贡献约为1.3%(Cromwell等，2018)。而本研究中10万年记录的对应值为g_1^0的2.5%。经过磁倾角浅化校正后，模型中轴向八极子项的贡献下降至1.5%。需要指出的是，上述百分比估计值均存在一定的不确定性。目前，10万年尺度古地磁场模型中的不确定度尚未被充分量化，本研究也未直接对此进行专门的校正。

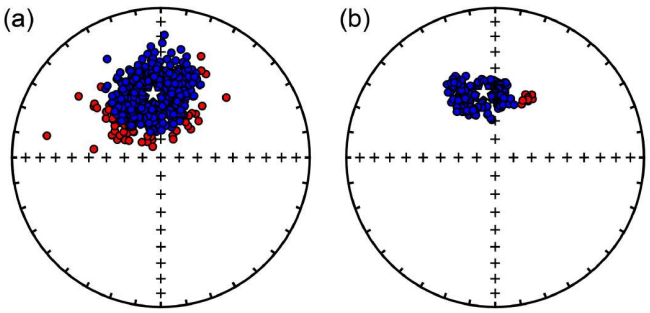


图 8　下半球等面积投影对比。(a) 用于构建叠加记录JAPANSV的七个岩芯中的五个岩芯的原始古地磁方向(平均方向: 354.2°/54.0°)；(b) 叠加记录对应的古地磁方向分布(平均方向: 348.3°/53.2°)

GGF100k与GGF100k-IC模型的对比揭示了磁倾角浅化校正中地磁场高阶项的关键作用。具体而言，THG24模型引入了相当于地心轴向偶极子系数(g_1^0)0.6%的四极子分量和2.2%的八极子分量，这些高阶分量的加入，这使得全新世及10万年沉积记录检验中不再显示倾角浅化现象。

THG24地磁场模型还可用于通过统计检验，评估古地磁方向的分布特征是否与模型预测一致，进而判断数据是否已充分平均地磁场长期变(Tauxe等，2024)。应用该模型的四项检验发现，无论是78个全新世记录还是82个约10万年的记录，通过全部检验的比例极低(分别仅为2个和4个)。进一步分析表明，检验结果与沉积记录的沉积速率、时间跨度、样本数量或站点纬度之间均无明确关联。值得关注的是，绝大多数记录未通过Anderson-Darling(A^2D，A^2I)检验。其主要原因在于，实际观测数据的VGP分布过于集中，离散程度小于基于THG24模型预测的累积分布(附图S3)。这暗示，真实地磁场中非轴向偶极子分量的贡献可能高于THG24模型的预测值。部分记录(如附图S3中的第1、15、27、31和50部分)的累积分布虽与THG24模型预测非常接近，但仍未通过统计检

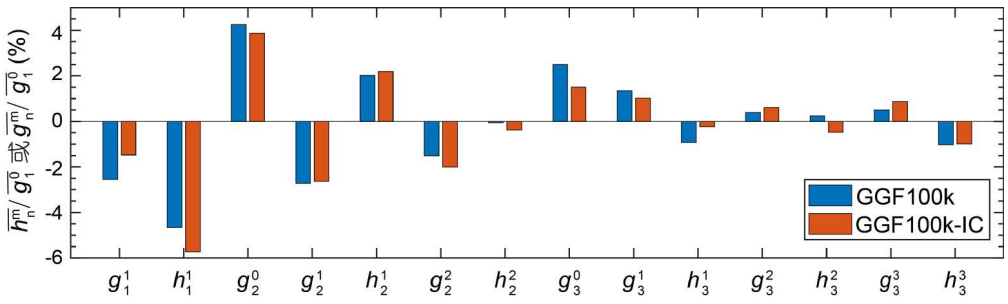


图 9　时间平均非轴向偶极子项与轴向偶极子系数(g_1^0)的比值(截至3阶)。比值基于GGF100k与GGF100k-IC模型估计的时间平均场计算得出

验标准。若考虑置信区间范围，其中一些记录可能落在95%的置信范围之内。

如图4所示，过去10万年以来大多数沉积记录的VGP离散度(S)均位于过去50–23 Ma火山记录的置信区间内。但部分记录的S值系统地低于模型预期，且这一现象在众多全新世记录中普遍存在。尽管沉积记录的持续时间或年龄与离散度之间未发现显著相关性(图5)，但这些偏低的S值表明，单个沉积记录的时间跨度可能不足以完整捕捉地核发电机过程所产生的全部磁场变化(Lund，2018)。

利用古地磁数据进行板块重建的基本前提是GAD假说，通常认为PSV在约1万年的时间尺度内可被有效平均(例如，Merrill和McFadden，2003)。然而，平均PSV所需的时间跨度因数据类型与分析方法而异。基于历史时期地磁场(1840–1990年)的观测，偶极子分量的典型时间尺度τ约为400–500年(例如，Christensen和Tilgner，2004；Lhuillier等，2011)。若以2–3τ获取一个统计独立样本，并要求超过100个独立读数，则平均掉PSV所需的时间下限可长达约10万年。此外，也有研究指出，在数千年尺度上地磁场平均方向已可近似满足GAD假说，其误差不超过5°(Pavón-Carrasco等，2014)，这构成了古地磁研究的基本假设。与此同时，近年来的研究逐渐认识到，地磁场高阶项可能在长时间尺度上持续存在(Lhuillier等，2023；Engbers等，2024a；Engbers等，2024b)。这些研究提示，实测数据与GAD假说的偏离可能源于古地磁数据集质量不高或时空分布不均。Engbers等(2024b)在对中新世古地磁数据的详细评估中发现，过去23 Ma的地磁场确实显著偏离GAD模型。

近期研究表明，过去10万年的沉积记录中确实保存着地磁场的高阶分量，正如Pavón-Carrasco等(2014)针对全新世研究所指出的，此类非偶极子分量对GAD场的偏离可能尚不足以产生超过5°的误差，但它明确提示我们，在开展古地磁研究时，必须审慎考量数据所涵盖的时间跨度。本研究进一步为地质时间尺度上存在非GAD结构的地磁场几何形态提供了证据，也与此前多位学者的观点一致(例如，Veikkolainen等，2014；Veikkolainen等，2017；Rolf和Pesonen，2018；Lhuillier等，2023)。正是这些持续存在的非偶极子分量的贡献，导致了基于纯GAD场的TK03.GAD模型与包含高阶项的THG24模型在评估沉积记录磁倾角浅化时，会得出不同的结论。

6 结论

尽管地心轴向偶极子(GAD)在地磁场长期演化中占据主导地位已获广泛认可，但非偶极子分量始终存在并在地磁场结构中起着重要作用。这一认识对磁倾角浅化校正及地磁场模型构建过程中是否纳入非偶极子项具有根本性影响。本研究表明，在仅考虑GAD的TK03.GAD模型下，许多中低纬度的全新世乃至长达10万年的沉积记录存在磁倾角浅化现象；然而，当采用包含四极子与八极子分量的THG24场模型时，这些记录不再呈现浅化特征。这表明，中低纬度地区观测到的所谓“浅化”更可能源于非偶极子场的贡献，而非真实的沉积压实作用。因此，未来进行磁倾角浅化检验时，尤其是针对中纬度记录，建议采用THG24等包含高阶项的模型作为分析基础。

本研究结果提示，10万年的时间尺度可能仍不足以完全平均掉地磁场的高阶项。这意味着，在开展古地磁研究时，需审慎评估数据的时间跨度是否充分。以往认为仅需约1万年即可实现平均的观点(Merrill和McFadden，2003)可能需要重新考量。进而，在确定古地磁极位置并用于古地理重建时，可能需要更长的时间跨度。上述认识与近期研究相呼应，即可能需超过百万年的平均才能将均值的标准偏差约束至其10%范围内(Buffett和Avery，2025)。本工作进一步明确：过去10万年间沉积记录并未发生由压实作用导致的系统性磁倾角浅化；相反，基于SVEI方法的分析揭示了该时期地磁场本身具有显著的非偶极子特征。综合来看，未来为更可靠的解析长期变与平均场，获取并共享沉积记录中完整、未经平滑滤波的原始古地磁数据至关重要。

致谢 衷心感谢两位审稿专家富有建设性的意见，亦感谢刘庆生教授、赵千博士与张运昌的宝贵意见，文中多处完善得益于与他们的有益讨论，在此一并表示诚挚感谢。本研究使用的SVEI程序可在https://github.com/PmagPy/PmagPy获取。所有沉积记录可通过链接https://earthref.org/ERDA/2223/获取，各记录详细信息见附表S1。

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

Anderson T W, Darling D A. 1952. Asymptotic theory of certain “goodness of fit” criteria based on stochastic processes. Ann Math Statist, 23: 193–212

Anson G L, Kodama K P. 1987. Compaction-induced inclination shallowing of the post-depositional remanent magnetization in a synthetic sediment. Geophys J Int, 88: 673–692

Biggin A J, Bono R K, Meduri D G, et al. 2020. Quantitative estimates of average geomagnetic axial dipole dominance in deep geological time. Nat Commun, 11: 6100

Blow R A, Hamilton N. 1978. Effect of compaction on the acquisition of a detrital remanent magnetization in fine-grained sediments. Geophys J Int, 52: 13–23
Bourne M, Mac Niocaill C, Thomas A L, et al. 2012. Rapid directional changes associated with a 6.5 kyr-long Blake geomagnetic excursion at the Blake-Bahama Outer Ridge. Earth Planet Sci Lett, 333-334: 21–34
Bourne M D, Mac Niocaill C, Thomas A L, et al. 2013. High-resolution record of the Laschamp geomagnetic excursion at the Blake-Bahama Outer Ridge. Geophys J Int, 195: 1519–1533
Buffett B, Avery M. 2025. Quantifying uncertainty in time averages of the geomagnetic dipole. Geophys Res Lett, 52: e2025GL118741
Channell J E T. 2006. Late Brunhes polarity excursions (Mono Lake, Laschamp, Iceland Basin and Pringle Falls) recorded at ODP Site 919 (Irminger Basin). Earth Planet Sci Lett, 244: 378–393
Channell J E T, Vázquez Riveiros N, Gottschalk J, et al. 2017. Age and duration of Laschamp and Iceland Basin geomagnetic excursions in the South Atlantic Ocean. Quat Sci Rev, 167: 1–13
Christensen U R, Tilgner A. 2004. Power requirement of the geodynamo from ohmic losses in numerical and laboratory dynamos. Nature, 429: 169–171
Constable C, Korte M, Panovska S. 2016. Persistent high paleosecular variation activity in southern hemisphere for at least 10 000 years. Earth Planet Sci Lett, 453: 78–86
Cox A. 1970. Latitude dependence of the angular dispersion of the geomagnetic field. Geophys J Int, 20: 253–269
Cromwell G, Johnson C L, Tauxe L, et al. 2018. PSV10: A global data set for 0–10 Ma time-averaged field and paleosecular variation studies. Geochem Geophys Geosyst, 19: 1533–1558
de Oliveira W P, Hartmann G A, Terra-Nova F, et al. 2021. Paleosecular variation and the time-averaged geomagnetic field since 10 Ma. Geochem Geophys Geosyst, 22: e2021GC010063
Engbers Y A, Holme R, Biggin A J. 2024a. Miocene time-averaged geomagnetic field model suggests long lived mantle control and recurring structure in the South Atlantic. Earth Planet Sci Lett, 626: 118535
Engbers Y A, Thallner D, Bono R K, et al. 2024b. A global paleosecular variation database for the Paleogene: Stationary secular variation behavior since the Triassic? Geochem Geophys Geosyst, 25: e2023GC011203
Ge S, Løvlie R, Shi X, et al. 2013. Relative paleointensity recorded in the core from northwestern Philippine Sea over the last 125 ka and its influencing factors. Chin J Geophys, 56: 27–42
Hayashida A, Verosub K L, Heider F, et al. 1999. Magnetostratigraphy and relative palaeointensity of late Neogene sediments at ODP Leg 167 Site 1010 off Baja California. Geophys J Int, 139: 829–840
Horng C S, Roberts A P, Liang W T. 2003. A 2.14-Myr astronomically tuned record of relative geomagnetic paleointensity from the western Philippine Sea. J Geophys Res, 108: 2001JB001698
Hyodo M, Itota C, Yaskawa K. 1993. Geomagnetic secular variation reconstructed from magnetizations of wide-diameter cores of Holocene sediments in Japan. J Geomagn Geoelec, 45: 669–696
Johnson C L, McFadden P. 2015. The Time-Averaged Field and Paleosecular Variation. In: Schubert G, ed. Treatise on Geophysics. 2nd ed. Oxford: Elsevier
King R F. 1955. The remanent magnetism of artificially deposited sediments. Geophys J Int, 7: 115–134
Korte M, Brown M C, Panovska S, et al. 2019. Robust characteristics of the Laschamp and Mono lake geomagnetic excursions: Results from global field models. Front Earth Sci, 7: 86
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
Laj C, Kissel C, Roberts A P. 2006. Geomagnetic field behavior during the Iceland Basin and Laschamp geomagnetic excursions: A simple transitional field geometry? Geochem Geophys Geosyst, 7: 2005GC001122
Lhuillier F, Fournier A, Hulot G, et al. 2011. The geomagnetic secular-variation timescale in observations and numerical dynamo models. Geophys Res Lett, 38: L09306
Lhuillier F, Gilder S A. 2013. Quantifying paleosecular variation: Insights from numerical dynamo simulations. Earth Planet Sci Lett, 382: 87–97
Lhuillier F, Shcherbakov V P, Sycheva N K. 2023. Detecting dipolarity of the geomagnetic field in the paleomagnetic record. Proc Natl Acad Sci USA, 120: e2220887120
Liu P, Panovska S, Zhang K, et al. 2023. Assessing inclination flattening in the Holocene: Insights from sediment data and global models. Geophys J Int, 233: 1271–1278
Lund S P. 2018. A new view of long-term geomagnetic field secular variation. Front Earth Sci, 6: 40
McElhinny M W. 1973. Palaeomagnetism and Plate Tectonics. London: Cambridge University Press
Meng Q Y, Li A C, Li T G, et al. 2009. Relative paleointensity of the geomagnetic field during the past 200 ka from the West Philippine Sea and its chronological significance. Sci China Ser D-Earth Sci, 52: 1115–1126
Merrill R T, McElhinny M W, Stevenson D J. 1979. Evidence for long-term asymmetries in the Earth's magnetic field and possible implications for dynamo theories. Phys Earth Planet Inter, 20: 75–82
Merrill R T, McFadden P L. 2003. The geomagnetic axial dipole field assumption. Phys Earth Planet Inter, 139: 171–185
Mitra R, Tauxe L. 2009. Full vector model for magnetization in sediments. Earth Planet Sci Lett, 286: 535–545
Negrini R M, McCuan D T, Horton R A, et al. 2014. Nongeocentric axial dipole field behavior during the Mono Lake excursion. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 2567–2581
Opdyke N D, Henry K W. 1969. A test of the dipole hypothesis. Earth Planet Sci Lett, 6: 139–151
Panovska S, Constable C G, Brown M C. 2018a. Global and regional assessments of paleosecular variation activity over the past 100 ka. Geochem Geophys Geosyst, 19: 1559–1580
Panovska S, Constable C G, Korte M. 2018b. Extending global continuous geomagnetic field reconstructions on timescales beyond human civilization. Geochem Geophys Geosyst, 19: 4757–4772
Panovska S, Korte M, Constable C G. 2019. One hundred thousand years of geomagnetic field evolution. Rev Geophys, 57: 1289–1337
Panovska S, Korte M, Liu J, et al. 2021. Global evolution and dynamics of the geomagnetic field in the 15–70 kyr period based on selected paleomagnetic sediment records. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2021JB022681
Pavón-Carrasco F J, Osete M L, Torta J M, et al. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. Earth Planet Sci Lett, 388: 98–109
Philippe É G H, Valet J, St-Onge G, et al. 2018. Are paleomagnetic records from U-channels appropriate for studies of reversals and excursions? Geochem Geophys Geosyst, 19: 4130–4142
Rolf T, Pesonen L J. 2018. Geodynamically consistent inferences on the uniform sampling of Earth's paleomagnetic inclinations. Gondwana Res, 63: 1–14
Strangway D W. 1970. History of the Earth's Magnetic Field. New York: McGraw-Hill
Tarling D H. 1971. Principles and Applications of Palaeomagnetism. London: Chapman and Hall
Tauxe L. 2005. Inclination flattening and the geocentric axial dipole

hypothesis. Earth Planet Sci Lett, 233: 247–261
Tauxe L, Heslop D, Gilder S A. 2024. Assessing paleosecular variation averaging and correcting paleomagnetic inclination shallowing. J Geophys Res-Solid Earth, 129: e2024JB029502
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: Timescales of the Paleomagnetic Field. Geophysical Monograph Series. 101–115
Tauxe L, Shaar R, Jonestrask L, et al. 2016. PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetics Information Consortium (MagIC) Database. Geochem Geophys Geosyst, 17: 2450–2463
Torsvik T H, Müller R D, Van der Voo R, et al. 2008. Global plate motion frames: Toward a unified model. Rev Geophys, 46: RG3004
Turner G M, Howarth J D, de Gelder G I N O, et al. 2015. A new high-resolution record of Holocene geomagnetic secular variation from New Zealand. Earth Planet Sci Lett, 430: 296–307
Vaes B, Li S, Langereis C G, et al. 2021. Reliability of palaeomagnetic poles from sedimentary rocks. Geophys J Int, 225: 1281–1303
Vandamme D. 1994. A new method to determine paleosecular variation. Phys Earth Planet Inter, 85: 131–142
Veikkolainen T, Heimpel M, Evans M E, et al. 2017. A paleointensity test of the geocentric axial dipole (GAD) hypothesis. Phys Earth Planet Inter, 265: 54–61
Veikkolainen T, Pesonen L, Korhonen K. 2014. An analysis of geomagnetic field reversals supports the validity of the Geocentric Axial Dipole (GAD) hypothesis in the Precambrian. Precambrian Res, 244: 33–41
Wilson R L. 1970. Permanent aspects of the Earth's non-dipole magnetic field over upper tertiary times. Geophys J Int, 19: 417–437
Wilson R L. 1971. Dipole offset—The time-average palaeomagnetic field over the past 25 million years. Geophys J Int, 22: 491–504
Yamamoto Y, Yamazaki T, Kanamatsu T, et al. 2007. Relative paleointensity stack during the last 250 kyr in the northwest Pacific. J Geophys Res, 112: 2006JB004477

（责任编委：林巍）