# 古地磁场研究:挑战与机遇

李永祥,刘欣宇

南京大学,大陆动力学研究院,内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 地球科学与工程学院,南京,210023

内容提要:地磁场源于地核流体的运动,至少已有约 35 亿年历史。地磁场的起源及演化一直是地球科学研究 的前沿领域之一,这是因为它既是地球宜居环境的重要保障,也是探究地球系统各圈层联系的重要途径。本文重 点围绕保留在岩石中的"深时"古地磁场记录,分析在地球内部磁场的形成与维持、地磁场极性倒转、以及地磁场强 度变化等古地磁场研究三个方面的主要进展及面临的挑战。同时,结合古地磁测试技术的革新,磁发电机实验和 超算模拟的应用,生物磁学的发展,阐述古地磁与地质学多学科交叉研究有望在揭示古地磁场变化及其对生物演 化方面的贡献。对古地磁场变化的研究不仅有助于理解地磁场的起源与演化规律,也对认识地球的早期演化,甚 至其它行星的演化有重要意义。

关键词:地磁场;磁发电机;极性倒转;古强度;古地磁;磁性地层

罗盘是开展野外地质工作必备的工具。罗盘中 的小磁针沿着地磁场方向指向帮助我们在野外辨别 方位,确定地层以及构造面和构造线等的产状。指 南针是我国古代四大发明之一。尽管人类使用指南 针已经有上千年的历史,但是真正对地磁场开展专 门研究只是过去约四百年的事情。英国科学家 William Gilbert 于 1600 年最早提出地球是一个巨 型球形磁体,而且具有与地球旋转轴近似平行的偶 极子场(Stern, 2002)。随后德国科学家 Gauss 于 1839年最早提出了表述地磁场的数学理论,认为地 磁场主要源于地球内部(Stern, 2002)。之后的科 技发展使我们认识到,地磁场主要包括偶极子场(类 似于条形磁铁产生的磁场)和非偶极子场两部分(图 1a,b)。现代地磁场中偶极子场部分相当于将一个 与地球自转轴之间呈 11.5° 夹角,位于地心的条形 磁铁所产生的偶极子场(图 1a)。观测资料显示,现 代磁场的北极自 1900 年以来一直在从加拿大向西 伯利亚方向漂移,而且自 2019 年以来的漂移速率似 乎正在加快(Witze, 2019; Livermore et al., 2020),会对全球卫星通讯、导航等产生重大影响 (Korte et al., 2019)。不仅如此,地磁场也是行星 地球宜居环境的重要保障。地磁场源于地球内部, 穿越地球系统各个圈层,一直延伸至太空,形成磁 层。磁层既抵御着太阳风对大气圈的剥蚀作用使得 地球上有生物赖以生存的水的存在(Hunten, 1993; Lundin, 2001) 以及大气中充足的氧含量 (Wei Yong et al., 2014),也有效阻挡了宇宙射线 到达地表以避免其对地球上生物的杀伤性损害 (Cockell, 2000; Meert et al., 2016)。在地质历史 时期,长时间尺度平均的地磁场通常认为是一个相 当于位于地心且与地球旋转轴重合的条形磁铁产生 的磁场,即地心轴向偶极子场(GAD)(图 1c)。而 且,在地质历史时期,古地磁场的南、北极曾多次发 生对调,即地磁场极性倒转(Cox et al., 1963; Opdyke et al., 1966; Cande et al., 1995)。地磁场 的这些奇特的现象一直令人着迷,吸引着地磁-古地 磁学家们探索地磁场起源和演化的奥秘。关于地磁 场起源和演化的研究也一直是地球科学研究的前沿 领域之一。例如,美国科学基金会 2020 年 5 月发布 的 2020~2030 十年科学规划中,将"地球内部磁场 如何产生?"作为未来 10 年优先要解决的地球科学 问题。另外,国际著名学术期刊《Science》在其创刊

**引用本文:**李永祥, 刘欣宇. 2021. 古地磁场研究:挑战与机遇. 地质学报,95(1):64~74,doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021015. Li Yongxiang, Liu Xinyu. 2021. Research in the paleo-geomagnetic field: grand challenges and exciting opportunities. Acta Geologica Sinica, 95(1):64~74.

注:本文为国家自然基金项目(编号 41774075,41888101)资助的结果。

收稿日期:2020-09-01;改回日期:2020-10-15;网络发表日期:2020-11-05;责任编辑:黄敏。

作者简介:李永祥,男。教授,博士生导师,主要从事古地磁及其地质应用研究。Email: yxli@nju.edu.cn。

125周年时所总结的 125个前沿科学问题中,"地磁 场极性为什么倒转?"位列其中。地磁场具有从年 际-百万年际不同时间尺度的变化特征(Thébault et al., 2015; Finlay et al., 2016; Biggin et al., 2012; Bono et al., 2019)。本文重点围绕保留在岩 石中的"深时"古地磁场记录,通过简要综述地球内 部磁场的形成与维持、地磁场极性倒转、以及地磁场 强度变化等古地磁场的三个主要方面,旨在探讨古 地磁场研究面临的挑战以及通过与地质学紧密结合 来揭示古地磁场演化的机遇。对古地磁场变化的研 究不仅有助于理解地磁场的起源与演化规律,也对 认识地球的早期演化,甚至其它行星的演化有重要 的启示(Tarduno et al., 2010, 2020; Biggin et al., 2015)。

## 1 地磁场的形成与维持

产生磁场的方式有两种:一是通过物质被磁化; 二是通过电流的电磁感应。任何关于地磁场起源的 模型都必须要能够解释已知地磁场的几个主要特 征:地磁场主要源于地球内部;地磁场已经存在了很 久(35 亿年或更久);地磁场由偶极子场和非偶极子 场组成,且其强度和方向随时间变化;地磁场的极性 可以发生倒转。基于第一种方式,英国科学家 William Gilbert 于 1600 曾提出过"永久磁化"假说, 认为地球内部存在巨大的永磁体,并由此产生了地 表所观测到的磁场。"永久磁化"假说的困难在于, 它不能解释地磁场随时间的变化以及地磁场极性倒 转的特征。而且,地球内部的温度随深度增大而增 高。若以 25℃/km 的地温梯度计算,在 400 km 以 下地球内部的绝大部分区域的温度都在 1000℃以 上。这比所有已知矿物的居里温度都高,无法记录 剩磁。因此,地球内部不可能被永久磁化。围绕第 二种方式一地球内部电流产生磁场的模型有很多。 其中最广为接受的是基于 Joseph Larmor 最早提出 的可自维持的发电机模型(Larmor, 1919), 而逐步 发展起来的磁流体发电机模型(Elsasser, 1956; Parker, 1955)。该模型认为, 在初始弱小磁场中, 富铁地核对流产生电流,并产生增强的磁场。而且, 一旦发电机开始工作,地核对流及相对应的电磁感 应就可以维持发电机的运转,进而维持地磁场的存 在。数值模拟结果显示,该模型可以展示出地磁场 的主要特征,包括偶极子场、地磁场随时间变化、以 及地磁场极性的倒转(Glatzmaier et al., 1995)。

在地球演化早期,地球内部温度比现在更高。

固态内核尚未形成。整个地核处于完全熔融状态, 甚至部分地幔底部的物质可能也被熔融。高温地核 流体的热对流(thermal convection)被认为驱动了 地磁发电机工作(Nimmo, 2015)(图 2a)。完全熔 融的地核冷却过程中释放的热能以及部分熔融的地 幔物质析出过程中所释放的重力势能(Badro et al., 2016)为维持地磁发电机工作提供了主要的动 力来源。通过热对流维持磁发电机所能持续的时间 与热导率有关。有模拟结果显示,这样仅可维持较 短时间的地磁发电机运转(O'Rourke et al., 2017)。因此,也有模型提出早期古地磁场源于地核 之上的岩浆洋(Ziegler et al., 2013)。随着地核冷 却,固态内核开始形成(Huguet et al., 2018)(图 2b)。在富铁固态内核形成过程中,含有硫、氧等低 密度流体会被释放到液态外核中。这些低密度流体 受浮力作用上涌,驱动液态外核对流,即产生化学对 流(chemical convection)。固态内核形成过程中所 释放的潜热和重力势能能够维持地磁发电机的运 转,维持地磁场的存在。随着固态内核逐渐生长,体 积慢慢增大,化学对流比热对流在维持地磁发电机 方面的作用更重要。而且,固态内核内部磁场与液 态外核对流的相互作用也有助于维持地磁场的存 在。对于地球固态内核何时开始形成尚有争议 (Biggin et al., 2015; Bono et al., 2019)。对于固 态内核的出现是否引起地磁发电机运作的很大变化 等认识目前仍然不清楚。但是,地震学研究表明地 球内、外核之间存在很大差异。二者之间存在差异 旋转,内核比外核转得更快(Song Xiaodong et al., 1996)。另外,地球外核为均匀、对称的球体,而内核 则表现出很强的各向异性,而且存在内核的复杂结 构(Wang Tao et al., 2015)。地球内核的内部结构 及各向异性说明其经历了一定的变形与流动,其不 均一性在空间上可达半球尺度规模(Irving et al., 2011)。内核这样的巨型构造对地磁发电机早期有 无影响以及如何影响等问题目前都不清楚,而这些 对于理解地球早期的古地磁场演化至关重要。

## 2 地磁场极性倒转

地磁场的方向在随时间发生变化。其中,最极端的情况是地磁场的南、北极对调,即极性发生了倒转。地磁场极性倒转是地磁场最显著的特征之一, 在岩石中留下了清晰的地磁场极性倒转的记录。最近一次地磁场极性倒转发生于大约78万年前 (Ogg, 2012)。地磁场极性倒转现象最早是法国科



图 1 地磁场模型,地磁场由偶极子场(a)和非偶极子场(b)组成

Fig. 1 Geomagnetic field model, geomagnetic field consists of a dipole field (a) and non-dipole fields (b)

(a)一现代地磁场中的偶极子场与地球旋转轴成11.5°夹角;(b)一非偶极子场中的四极子场;

(c)一地史期长时间平均形成的地心轴向偶极子场(GAD)(据 Meert, 2009 修改)

(a)—The dipole of modern geomagnetic field is inclined with respect to the spin axis of the Earth at 11.5°; (b)—an example of non-dipole field-quadrupole field; (c)—the time-averaged geomagnetic field is termed as a geocentric axial dipole (GAD) (modified after Meert, 2009)



图 2 地核演化对磁发电机的影响

Fig. 2 The Earth's core evolution and its impacts on geodynamo

(a)一地球演化早期地核为液态,无固态内核;(b)一固态内核开始形成,并逐渐生长;

(c)一现代地球的地核由固态内核和液态外核组成。(据 Tarduno et al., 2006 修改)

(a)—In early Earth, the core was completely melt; (b)—the birth and growth of the inner core;

(c)-the present-day Earth displaying a solid inner core and a liquid outer core (modified after Tarduno et al., 2006)

学家 Bernard Brunhes 在二十世纪初对年轻的熔岩 流及其下伏黏土开展古地磁研究时发现的 (Brunhes, 1906)。他注意到熔岩流之下的黏土中 的剩磁方向与其上熔岩流的方向正好相差大约 180°,认为地磁场极性发生了反转。如果地磁场极 性发生了反转,则应该具有全球性特征。Mercanton (1926)对采自南、北半球不同地区样品的古地磁研 究证实了极性反转具有全球性特征。随后,结合对 熔岩流的放射性同位素测年研究确定了三、四百万 年以来地磁场不同极性期的年龄(Cox et al., 1963; McDougall et al., 1963; Cox, 1969)。之后 对海洋沉积物的古地磁测量,进一步将地磁极性倒 转序列的时间范围拓展至几十百万年(Foster et al., 1970)。随着海洋磁异常条带的发现及海底扩 张假说的提出,地磁场极性序列延伸到了约160百 万年(Heirtzler et al., 1968; Kent et al., 1986; Cande et al., 1995)。更老的洋壳已因板块构造运 动被俯冲、消减。所以,更早时期的地磁场极性序列 只能通过对陆块上岩石的古地磁研究获得。往往因陆块受后期构造作用影响,从陆块上获得的地磁场极性序列呈现片段化(三叠纪地磁场极性序列, Kent et al., 1999),而且,陆块上的岩石越老,从中获得可靠的地磁极性序列也变得越困难。

地磁场的极性倒转是随机发生的。倒转频率在 不同时间段也不同,相应的每个极性期的平均时限 也不同。例如:过去5百万年以来平均大约倒转4 ~5次/百万年,平均每个极性期接近1百万年;而 在60~50Ma之间的倒转频率大约为1.5次/百万 年,平均每个极性期为约60万年(图3)。从160百 万年以来地磁极性序列整体来看,总体上呈现出三 种模态:一种是极性倒转非常频繁的时期,例如晚侏 罗纪(图3);另一种是很稳定的单一极性时期,称为 极性超时或超静磁期(图3)。其中,120~84Ma之 间为稳定的正极性期,称为白垩纪超静磁期 (Cretaceous Normal Superchron, CNS)。在 CNS 内曾报道出现了几次短暂的反极性期(Tarduno et





al., 1990, 1992; Gilder et al., 2003),但还需要进 一步验证;也有可能是受到了重磁化的影响 (Opdyke et al., 1996)。第三种就是介于上述两种 极端模态之间的"正常"模态(图 3)。实际上,在老 于 160 百万年的岩石记录中也发现了前两种模态的 地磁场极性变化特征,包括晚石炭-中二叠纪稳定的 反极性期-Kiaman 超静磁期,早-中奥陶纪稳定的反 极性期-Moyero 超静磁期(Gallet et al., 1996; Pavlov et al., 2005)(图 3)。在前寒武纪,尤其是地 球演化早期,超静磁期可能出现得更多(Coe et al., 2006; Gallet et al., 2012; Driscoll et al., 2016)。 另外,在新元古代埃迪卡拉纪晚期和寒武纪中期发 现极性倒转频率异常高的时期(Bazhenov et al., 2016; Gallet et al., 2019),其倒转频率比晚侏罗纪 的倒转频率更高(图 3)。

除了倒转频率,地磁场极性倒转的快慢,即持续 时间长短也是理解极性倒转过程的重要方面。极性 倒转的持续时间可从高分辨率的沉积岩和火山岩的 古地磁记录中获得。沉积岩对地磁场变化的记录相 对较连续。在沉积速率快的地层中,可根据地层的 数字年龄或生物带获得相应的平均沉积速率,并用 该沉积速率来估算极性转换带所代表的时间。根据 海洋沉积物磁性地层研究,极性转换持续时间大约 为 4000 ~ 5000 年(Niitsuma, 1971; Opdyke, 1972)。不同纬度区海洋沉积物记录显示极性倒转 持续时间为 2000~12000 年,平均持续时间约为 7000年(Clement, 2004)。火山岩只能记录火山喷 发时的地磁场,是对地磁场的不连续记录。但是,火 山岩古地磁记录的优势在于可对火山岩开展高精度 的放射性同位素测年,例如40 Ar/39 Ar, U-Pb 测年, 确定地磁场极性倒转发生的年代和持续时间。在火 山喷发频繁的地区,对包含极性转换的熔岩流层段 测年,再根据极性转换带内熔岩流数与极性稳定的 熔岩流数的比值估算极性转换持续的时间。用此方 法估算的极性倒转持续时间为 4000~6000 年(Cox et al., 1967; Kristjansson, 1985)。其中对美国西 部俄勒冈 Steens Mt 大约 15.5Ma 熔岩流的古地磁 研究发现极性转换的速率非常快,大约 6°/天(Coe et al., 1989; Coe et al., 1995)。如果按照此速率, 一个完整的极性倒转仅需大约1个月左右就可完 成!这一推论受到理论方面的质疑。一方面,按地 磁发电机模型,地磁场源于液态外核流动。如此快 速的极性变化意味着液态外核的粘度也发生了很大 变化,但这似乎比较困难。另外,地磁场源于地核, 但经地幔"滤波"之后,能到达地表的被认为是长于 年际的变化(Merrill, 2010)。有可能 Steens Mt 熔 岩流的古地磁结果受到了重磁化的影响(Merrill et al., 1999)。数值模拟结果显示极性倒转持续时间

多为 2000~7000 年,但也可持续达 22000 年之久 (Coe et al., 2000)。

根据地磁发电机模型,地核中的对流可引起地 磁场倒转。地磁场的倒转频率与核幔边界的热流变 化以及固态内核有关。模拟结果显示,地幔底部的 D"层对地核释放热流产生影响,进一步影响到从地 核释放热流的空间分布,以及地磁场倒转频率 (Glatzmaier et al., 1995)。尤其是在地幔底部对应 于非洲和太平洋下部识别出的巨大的"大型低剪切 波速带(Large Low Shear Velocity Provinces, LLSVPs)"(Lekic et al., 2012; McNamara, 2019) (图 4),其必定会对地核热流向外传导产生重要影 响(Tarduno et al., 2015)。但对于其究竟如何影 响地磁发电机行为目前尚处于初步探索阶段 (Gubbins et al., 2011)。另外,地幔对流本身以及 受板块构造俯冲作用对地幔对流的扰动也可对地磁 场包括极性倒转频率等产生影响(Glatzmaier et al., 1999; Courtillot et al., 2007; Biggin et al., 2012; Hounslow et al., 2018)。模拟研究 (Hollerbach et al., 1993)显示,地磁场倒转先发生 于外核,还包括内核磁场和外核磁场之间的复杂反 馈等过程。而且,当地球内核已形成至一定大小时, 偶极子场较稳定,地磁场的倒转频率相对较低。以 此类推,在地球内核形成的早期或者之前,地磁场的 倒转频率可能较高。这些模拟结果还需要通过可靠 的前寒武纪的古地磁结果来检验。

## 3 地磁场强度变化

古地磁场强度变化一方面可以表征地球深部过程,反映核幔边界状态,磁发电机的工作过程等(Merrill et al., 1990; Zhu Rixiang et al., 1998, 1999, 2002; Biggin et al., 2012; Tarduno et al., 2020);另一方面,作为保护地球的屏障,地磁场强度变化也直接关系到其屏障作用的强弱的变化,进而影响到地球表层系统的气候变化、生物演化等来影响地球的宜居环境等(Seki et al., 2001; Carslaw et al., 2002; Wei Yong et al., 2014)。

古地磁场的强度(亦称为古强度)只能从岩石记 录中获得。对火成岩而言,岩浆在当时地磁场 H<sub>p</sub> 中冷却过程中,当温度低于载磁矿物的居里温度时, 便获得了热剩磁 TRM<sub>p</sub> (Thermal Remanent Magnetization,TRM)。类似地,可在实验室已知磁 场 H<sub>L</sub> 中让火成岩样品获得新的热剩磁 TRM<sub>L</sub>。假 设火成岩记录的热剩磁与其所处磁场的比例关系不 变,就可根据  $TRM_p$ ,  $H_L$ ,  $TRM_L$  算出  $H_p$ ,即绝对 古强度(Tauxe, 2010)。实际操作中,由于实验过程 中通常包括对样品的多次加热,可能会引起矿物磁 学性质发生改变,所以往往在实验过程中需要加入 多级检验(Paterson et al., 2014)。对沉积岩而言, 沉积物在古地磁场中沉积时,其中磁性矿物颗粒沿 古地磁场方向排列,便获得了沉积剩磁 DRM (Depositional Remanent Magnetization, DRM). 目前,关于沉积岩 DRM 的记录机理还没有像火成 岩的 TRM 那样有清晰的认识。DRM 的强度不仅 与古地磁场强度有关,还与沉积物中磁性矿物含量、 粒度等有关。因此,需要将 DRM 用岩石磁学参数 做归一化,剔除沉积物中磁性矿物含量、粒度的影 响,进而得到古地磁场强度的相对变化,即相对古强 度(Tauxe, 1993)。沉积地层中相对古强度可以揭 示出古地磁场强度随地层层位/深度(时间)的相对 变化。如果地层中有火成岩夹层,可从中获得绝对 古强度,并可将相对古强度曲线锚定在火成岩层位 的绝对古强度,进而获得整套地层的古强度记录。

由于地磁场主要是由偶极子场构成的,其强度 的空间分布应主要受控于偶极子场,表现为随纬度 变化。也就是说,古地磁场强度在赤道低纬度地区 弱(磁力线稀疏),在两极高纬度地区强(磁力线密 集),应展示出从低纬度向高纬度地区逐渐增强的趋 势。而且,如果是地心轴向偶极子场,其两极的地磁 场强度是赤道地磁场强度的两倍。Tauxe et al. (2007)分析了之前的古强度数据,按每 10°纬度间 隔内的古强度数据平均得到古强度随纬度变化特征 (图 5a)。尽管该结果显示,低纬度地区的古强度比 期望的偶极子场的强度高,在高纬度区的古强度比 期望的偶极子场的强度低,但是总体展示了较弱的 古强度随纬度逐渐增大的趋势。Tauxe (2010)增加 了南极洲的古强度结果,重新分析了古强度的空间 分布特征。结果显示,古强度没有明显随纬度变化 的趋势(图 5b)。尤其是在高纬度地区,其强度明显 比期望的偶极子场的强度还低。因为目前古强度数 据的时间分辨率和其地理分布还很有限,也许这些 结果还不能准确代表古地磁场强度真实的空间分 布。而且,每个纬度间隔内古强度数据的时代跨度 很大。而古地磁场本身就是在随着时间变化的。因 此,对古地磁场强度的空间分布特征刻画最好是对 某一个时间段内从不同地理位置获得古强度数据按 纬度平均,进行分析。另一方面,如果高纬度地区地 磁场强度确实比期望的偶极子场的强度低(图 5b),

则可能指示地球内部磁发电机的运作机制。因为地 球在自转,地磁发电机的运转除了与液态外核流体 运动有关之外,还与固态内核的磁场以及科里奥利



图 4 地震层析成像模型一致揭示的"大型低剪切波速带 (Large Low Shear Velocity Provinces, LLSVPs)"。两个 LLSVPs 分别位于非洲和太平洋之下的下地幔

Fig. 4 Map showing LLSVP consistency between shearwave tomography models and the two LLSVPs below Africa and the Pacific

该图是五个地震层析成像模型的 1000~2800km 深度的对比结果。 颜色比例尺及其中的数字代表对比结果一致的模型数量(据 Lekic et al., 2012)

The map is a result of a cluster analysis by comparing the lower-than-average anomalies in 5 models for the depth range of  $1000 \sim 2800$  km depth. Color is defined by the number of models that agree in that particular region, as indicated by the numbered boxes (after Lekic et al. , 2012)

力的影响有关。综合的结果是,形成以旋转轴为中心,以内核大小为直径的切向圆柱(图 5c)。切向圆柱外的液态外核产生类似的柱状流动,而切向圆柱内的液态外核则产生对流(Busse, 1983)。由此,可能引起高纬度地区较弱的古地磁场强度。检验这一认识的关键在于从高纬度地区获得更多可靠的古强度数据。

古地磁场的强度也随时间变化。目前仅有零星 的前寒武纪古地磁场强度记录(图 6)。这些结果显 示,前寒武纪古地磁场强度变化幅度较大,但总体上 接近或比现代磁场强度弱。另外,前寒武纪的古地 磁场强度似乎有从太古宙~35 亿年-新元古代逐渐 衰减的趋势(图 6a)(Bono et al., 2019)。最近,从 澳大利亚 Jacks Hill 获得的古强度数据显示,~42 亿年的冥古宙时期的古地磁场强度较强(Tarduno et al., 2020)。这些数据量还很少,所揭示的变化 趋势仍有待检验,但这些结果表明,地磁场已经存在 了很久,其自地球形成以来的绝大部分时间都存在, 为揭示地球的演化史提供了久远且独特的维度。显 生宙以来的古强度数据主要集中于过去 160 Ma 以 来(Tauxe et al., 2007)(图 6b)。这些结果显示出 不同时期地磁场的强弱变化。其中,晚侏罗-早白垩 纪期间以及始新世-渐新世期间地磁场较弱,其强度 略低于现代地磁场的强度。而在白垩纪晚期-早新 生代以及 110~120 Ma 期间地磁场较强,其强度高





Fig. 5 Spatial features of paleointensities

(a)一每 10°纬度间隔的平均古强度随纬度变化(据 Tauxe et al., 2007)。红色曲线代表平均偶极矩 6.3×10<sup>22</sup> Am<sup>2</sup>;(b)一每 15°纬度间隔的 平均古强度随纬度变化(据 Tauxe, 2010 修改)。红色曲线代表平均偶极矩 8.0×10<sup>22</sup> Am<sup>2</sup>;(c)一液态外核的流动方式。在切向圆柱体外的 液态外核为柱状流动,而在切向圆柱体内的液态外核表现为三维对流(据 Lawrence et al., 2009; Tauxe, 2010 修改)

(a)—Changes in paleointensity averaged in 10° latitudinal bins with latitudes (from Tauxe et al., 2007); The red curve represents the dipole moment of  $6.3 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ ; (b)—changes in paleointensity averaged in 15° latitudinal bins with latitudes, including data from the Antarctic (from Tauxe, 2010); The red curve represents the dipole moment of  $8.0 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ ; (c)—outer core convections. The outer core outside of the tangential cylinder exhibits column flow and the outer core within the tangential cylinder displays three dimensional convection (after Lawrence et al., 2009; Tauxe, 2010)





Fig. 6 The temporal features of paleointensity

(a)—35亿年以来的古地磁场强度变化。古强度从 35亿年至新元古代晚期显示出逐渐减弱的趋势,之后在显生宙又逐渐增强(据 Bono et al., 2019);(b)—160 Ma 以来的古地磁场强度变化(据 Tauxe et al., 2007)。蓝点代表大洋玄武岩古强度数据;红色菱形代表单颗粒古强度结果;三角形代表其它满足要求的古强度数据

(a)—Changes in paleointensity since ~3500 Ma. The paleointensity data show a gradual decline from ~3500 Ma to the late Neoproterozoic and then an overall increase afterwards in the Phanerozoic (from Bono et al., 2019); (b)—changes in paleointensity since ~160 Ma (after Tauxe et al., 2007). Blue circles represent data from submarine basalts; red diamonds indicate paleointensity data from single crystals; and triangles indicate other paleointensity meeting the selection criteria

于现代地磁场的强度。在白垩纪持续近四千万年之 久的正极性期-白垩纪超静磁期(CNS,120~84 Ma) 内,绝对古强度结果显示更强、更稳定的古地磁场 (Tarduno et al., 2006);相对古强度结果也揭示出 波动变化特征(Granot et al., 2012; Tarduno, 2012)。对地磁场在极性转换期间的古强度研究显 示,古强度经历了先减小后增大的变化过程。无论 是火成岩的绝对古强度结果,还是沉积岩的相对古 强度研究结果均表明,地磁场的极性倒转伴随着地 磁场强度的衰减(Merrill et al., 1999)。而且,地磁 场倒转过程中强度变化所持续的时间比方向发生 180°改变所持续的时间似乎更长(Bogue et al., 1993, Zhu Rixiang et al., 1993)。

极性倒转期间的地磁场强度衰减可能对生物演 化产生重大影响。这是因为地磁场强度减弱意味着 其对地球的保护能力降低,宇宙射线等高能粒子更 易到达地表对生物细胞造成损伤;而且,太阳风对地 球大气层的剥蚀作用相对增强,进而对地表环境产 生重要影响。在埃迪卡拉纪晚期~550 Ma,地磁场 极性出现异常频繁的倒转,超过 20 次/百万年 (Bazhenov et al., 2016),比以往岩石记录中倒转频 率都高,暗示埃迪卡拉纪晚期古地磁场强度减弱。 这很可能是埃迪卡拉纪晚期生物灭绝事件,称为 Kotlinian Crisis(Kolesnikov et al., 2015)发生的诱 因。Meert et al. (2016)认为这一时期减弱的地磁 场强度使得臭氧层遭到破坏,使到达地表的紫外线 增强,导致地表和浅水环境的软体动物灭绝,并为之 后的寒武纪生命大爆发创造了条件。在显生宙,曾 经发生了多次生物灭绝事件(Bond et al., 2016)。 而这些生物灭绝事件与地磁场极性倒转之间似乎并 不存在一对一的必然联系 (Glassmeier et al., 2010)。例如,白垩纪古近纪之交生物灭绝事件发生 于反极性期 C29r 期间,而不是极性倒转期间。通过 模拟地磁场减弱期间氧气的累积逃逸量,并与显生 宙生物灭绝事件对比, Wei Yong et al. (2014)认为 地磁场倒转频率增加,导致其对大气中的氧离子的 保护减弱,氧离子的逃逸频率增加,进而引起大气中 氧含量降低,及至引起最终的生物灭绝事件。总的 来看,地磁场强度减弱与生物灭绝事件之间的具体 联系仍然不清楚,还需要化石记录以及定量实验研 究来检验或揭示不同过程之间的联系。

## 4 讨论与展望

在地磁场起源与早期演化研究方面,古地磁测 试方法的革新使得获得更多前寒武纪可靠的古地磁 数据成为可能。以往前寒武纪可靠的古地磁数据较 少,主要是因为后期多次构造、变质作用叠加改造的 影响。锆石的抗风化、抗变质作用能力强,其中含磁 性矿物包体的单颗粒锆石可用于古地磁研究 (Tarduno et al., 2020)。结合微观磁学显微观测 技术的提高以及微磁模拟的应用(Harrison et al., 2002; Nagy et al., 2019; Fu R R et al., 2020),前 寒武纪的古地磁结果的可靠性有望得到很大提高。 这些新的、可靠的古地磁结果将有助于刻画地球早 期古地磁场的形态,尤其是探测地球内核形成前后 古地磁场的变化,为认识地磁场早期演化提供重要 约束。另外,这些古地磁结果也为探究地球演化早 期板块构造运动(Brenner et al., 2020)和真极移, 即地球的旋转极发生改变(Goldreich et al., 1969; Evans, 2003)等奠定基础。地核对流过程的物理模 拟(King et al., 2015; Aurnou et al., 2018)和数值 模拟(Schaeffer et al., 2017; Mound et al., 2019) 方面的研究将进一步揭示磁发电机的运行机制及相 应的地磁场变化行为。陨石磁学(Fu R R et al., 2012; Wang Huapei et al., 2017)及比较行星学研 究(Moore et al., 2018; Lapôtre et al., 2020)将为 认识地磁场起源及演化等提供新的证据。

准确刻画地磁场极性倒转的模态是认识地磁场 演化的重要基础。对于没有海底磁异常约束的老于 160 Ma的,尤其是老于 300 Ma的地磁极性序列仍 不完整,其可靠性和年代约束仍有待提高。对于年 龄老于洋壳消失之前的岩石而言,因其经历了后期 构造运动的改造,其磁性记录可能会受到影响。构 造运动过程中的重新磁化,即重磁化,可能部分或全 部覆盖岩石形成时的磁性记录。另外,尽管地心轴 向偶极子场(GAD)是古地磁研究的基本假定,地磁 场本身也包含非偶极子场。非偶极子场的存在可能 导致区域极性变化差异,即不是真正意义上的全球 性极性倒转。因此,对于"深时"地磁场极性倒转特 征,句括极性超时和异常高频极性倒转期,需要通过 对不同岩性的岩石(火成岩和沉积岩)以及不同地区 的岩石开展磁性地层研究来确定。同时,检验极性 超时期间是否存在短暂的极性反转, 厘定异常高频 极性倒转期的准确时限和倒转频次。在认识地磁场 极性倒转机理方面,探究影响核幔边界热流的各种 主要因素,包括地幔底部 LLSVPs 的物质组成、热 学和化学性质以及与板块构造运动密切相关的深俯 冲过程等。地球物理探测、高温高压矿物实验、岩石 地化、大地构造以及大陆动力学研究将为进一步约 束这些因素提供新的证据。在此基础上,结合极性 倒转的模态特征的约束,并通过运用超算技术模拟 地磁发电机的工作过程有望在揭示地磁场极性倒转 的成因机制方面取得突破性进展。

古地磁场强度时空变化方面的研究将为探测古 地磁场的空间形态及其对地表环境的影响等提供新 的依据。从古强度结果的空间分布来看,已有的古 强度数据大部分来自中低纬度地区,亟需更多来自 高纬度地区的可靠古强度结果来约束地磁场模型, 揭示液态外核的对流过程。在我国海洋强国战略指 引下正在实施开展的极地研究为探究高纬度古地磁 场强度变化提供了机遇。从古强度结果的时间分布 来看,已有的古强度结果主要是过去~200 Ma 以来 记录,更早的,尤其是前寒武纪的古强度结果还很 少。对于前寒武纪古地磁场强度的变化趋势还有待 于更多可靠古强度数据的限定。由于前寒武纪岩石 易受到后期构造以及变质作用等影响,从古老岩石 中获得可靠的古强度记录往往很困难。随着单矿物 颗粒古强度测试技术的不断提高(Tarduno et al., 2006, 2020),有望从前寒武纪岩石中获取更多可靠 的古强度结果。另外,随着放射性同位素测年技术 的不断改进,对极性超时期间以及极性倒转频次异 常高时期的古强度变化研究也有望取得重要进展, 从而为揭示深时古地磁场变化提供新约束。在古地 磁场变化对生物演化影响方面,生物磁学研究的突飞 猛进(Pan Yongxin et al., 2004, 2011), 尤其是定量-半定量评价生物对地磁场强弱变化、UV 辐射通量大 小变化等的敏感性、忍耐性和/或适应性研究将为阐 明地磁场变化与生物演化之间的联系提供新证据。

**致谢:**衷心感谢评阅老师的意见和建议!感谢 加州大学洛杉矶分校徐宇凡关于地核对流数值模拟 和实验模拟方面研究进展的讨论。

#### References

- Aurnou J M, Bertin V, Grannan A M, Horn S, Vogt T. 2018. Rotating thermal convection in liquid gallium: multi-modal flow, absent steady columns. J. Fluid Mech. 846: 846~876.
- Badro J, Siebert J, Nimmo F. 2016. An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core. Nature, 536: 326~328.
- Bazhenov M L, Levashova N M, Meert J G, Golovanova I V, Danukalova K N, Fedorova N M. 2016. Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: evidence for magnetic field hyperactivity? Earth and Planetary Science Letters, 435: 124~135.
- Biggin A J, Piispa E J, Pesonen L J, Holme R, Paterson G A, Veikkolainen T, Tauxe L. 2015. Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation. Nature, 526: 245~248.
- Biggin A J, Steinberger B, Aubert J, Suttie N, Holme R, Torsvik T, van der Meer D, van Hinsbergen D. 2012. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. Nature Geoscience, 5, 526~533.
- Bogue S W, Paul H A. 1993. Distinctive field behavior following geomagnetic reversals. Geophysical Research Letters, 20: 2399

 $\sim 2402.$ 

- Bond D P G, Grasby S E. 2016. On the causes of mass extinctions. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 478: 3~29.
- Bono R K, Tarduno J A, Nimmo F, Cottrell R D. 2019. Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. Nature Geoscience, 12: 143~147.
- Brenner A R, Fu R R, Evans D A D, Smirnov A V, Trubko R, Rose I R. 2020. Paleomagnetic evidence for modern-like plate motionvelocities at 3.2 Ga. Science Advance, 6: eaaz8670.
- Brunhes B. 1906. Recherchessur le direction d'aimantation des roches volcaniques. Journal de Physique Théoriqueet Appliquée, 5(1): 705~724.
- Busse F. 1983. A model of mean zonal flows in the major planets. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 23: 153~174.
- Cande S C, Kent D V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. Journal of Geophysical Research, 100: 6093~6095.
- Carslaw K S, Harrison R G, Kirkby J. 2002. Cosmic rays, clouds, and climate. Science, 298: 1732~1737.
- Clement B M. 2004. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. Nature,  $428:637{\sim}640$ .
- Cockell C S. 2000. Ultraviolet radiation and the photobiology of earth's early oceans. Origins of Life and Evolution of Biospheres, 30: 467~499.
- Coe R S, Glatzmaier G. 2006. Symmetry and stability of the geomagnetic field. Geophysical Research Letters, 33: L21311.
- Coe R S, Hongre L, Glatzmaier G A. 2000. An examination of simulated geomagnetic reversals from a palaeomagnetic perspective. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 358: 1141~1170.
- Coe R S, Prévot M. 1989. Evidence suggesting extremely rapid field variation during a geomagnetic reversal. Earth and Planetary Science Letters, 92: 292~298.
- Coe R S, Prévot M, Camps P. 1995. New evidence for extraordinary rapid change of the geomagnetic field during a geomagnetic reversal. Nature, 374, 687~692.
- Courtillot V, Olson P. 2007. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events. Earth and Planetary Science Letters, 260: 495~504.
- Cox A, Dalrymple G B. 1967. Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of Potassium-Argon dating. Journal of Geophysical Research, 72: 2603~2614.
- Cox A, Doell R R, Dalrymple G B. 1963. Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry. Nature, 198: 1049~1051.
- Cox A. 1969. Geomagnetic reversals. Science, 163: 237~245.
- Driscoll P E, Evans D A D. 2016. Frequency of Proterozoic geomagnetic superchrons. Earth and Planetary Science Letters,  $437: 9 \sim 14$ .
- Elsasser W. 1956. Hydromagnetic dynamo theory, Reviews of Modern Physics, 28: 135~163.
- Evans D. 2003. True polar wander and supercontinents. Tectonophysics, 362: 303~320.
- Finlay C C, Olsen N, Kotsiaros S, Gillet N, Toeffner-Clausen L. 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. Earth, Planets and Space, 68: 112.
- Foster J H, Opdyke N D. 1970. Upper Miocene to recent magnetic stratigraphy in deep-sea sediments. Journal of Geophysical Research, 75: 4465~4473.
- Fu R R, Lima E A, Volk M W R, Trubko R. 2020. Highsensitivity moment magnetometry with thequantum diamond microscope. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21: e2020GC009147.
- Fu R R, Weiss B P, Shuster D L, Gattacceca J, Grove T L. 2012. An ancient core dynamo in asteroid Vesta. Science, 338: 238~241.
- Gallet Y, Pavlov V. 1996. Magnetostratigraphy of the Moyero river section (north-western Siberia): constraints on geomagnetic reversal frequency during the early Paleozoic. Geophysical Journal International, 125(1): 95~105.

- Gallet Y, Pavlov V, Halverson G, Hulot G. 2012. Toward constraining the long-term reversing behavior of the geodynamo: anew "Maya" superchron 1 billion years ago from the magnetostratigraphy of the Kartochka Formation (southwest-ern Siberia). Earth and Planetary Science Letters, 339: 117~126.
- Gallet Y, Pavlov V, Korovnikov I. 2019. Extreme geomagnetic reversal frequency during the Middle Cambrian as revealed by the magnetostratigraphy of the Khorbusuonka section (northeastern Siberia). Earth and Planetary Science Letters, 528: 115823.
- Gilder S, Chen Y, Cogne J P, Tan X D, Courtillot V, Sun D J, Li Y G. 2003. Paleomagnetism of Upper Jurassic to Lower Cretaceous volcanicand sedimentary rocks from the western Tarim basin and implications for inclination shallowing and absolute dating of the M-0 (ISEA?) chron. Earth and Planetary Science Letters, 206: 587~600.
- Glassmeier K H, Vogt J. 2010. Magnetic polarity transitions and biospheric effects. Space Science Reviews, 155: 387~410.
- Glatzmaier G A, Coe R S, Hongre L, Roberts P H. 1999. The role of the Earth's mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals. Nature, 401: 885~890.
- Glatzmaier G A, Roberts P H. 1995. A three-dimensional selfconsistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. Nature, 377: 203~209.
- Goldreich P, Toomre A. 1969. Some remarks on polar wandering. Journal of Geophysical Research, 74: 2555.
- Granot R, Dyment J, Gallet Y. 2012. Geomagnetic field variability during the Cretaceous normal superchron. Nature Geoscience, 5 (3): 220~223.
- Gubbins D, Sreenivasan B, Mound J, Rost S. 2011. Melting of the Earth's inner core. Nature, 473: 361~363.
- Harrison R J, Dunin-Borkowski R E, Putnis A. 2002. Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99: 16556  $\sim$ 1656.
- Heirtzler J R, Dickson G O, Herron E M, Pitman III W C, Le Pichon X. 1968. Marine magnetic anomalies, geomagnetic reversals and motions of the ocean floors and continents. Journal of Geophysical Research, 73: 2119~2136.
- Hollerbach R, Jones C A. 1993. Influence of the Earth's core on geomagnetic fluctuations and reversals. Nature, 365: 541  $\sim 543.$
- Hounslow M W, Domeier M, Biggin A J. 2018. Subduction flux modulates the geomagnetic polarity reversal rate. Tectonophysics, 742: 34~49.
- Huguet L, Van Orman J A, Hauck II S A, Willard M A. 2018. Earth's inner core nucleation paradox. Earth and Planetary Science Letters, 487: 9~20.
- Hunten D M. 1993. Atmospheric evolution of the terrestrial planets. Science, 259, 915~920.
- Irving J C E, Deuss A. 2011. Hemispherical structure in inner core velocity anisotropy. Journal of Geophysical Research, 116: B04307.
- Kent D V, Gradstein F M. 1986. A Jurassic to recent chronology. In P R Vogt and B E Tucholke, Eds. The Geology of North America, Vol. M, The Western North Atlantic Region: Geological Society of America, 45~50.
- Kent D V, Olsen P. 1999. Astronomically tuned geomagnetic polarity time scale for the Late Triassic. Journal of Geophysical Research, 104: 12831~12841.
- King E M, Aurnou J M. 2015. Magnetostrophic balance as the optimal state for turbulent magneto convection. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112 (4): 990~994.
- Kolesnikov A V, Marusin V V, Nagovitsin K E, Maslov A V, Grazhdankin D V. 2015. Ediacaran biota in the aftermath of the kotlinian crisis: Asha Group of the south Urals. Precambrian Research, 263: 59~78.

- Korte M, Mandea M. 2019. Geomagnetism: From Alexander von Humboldt to current challenges. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20: 3801~3820.
- Kristjansson L. 1985. Some statistical properties of paleomagnetic directions in Icelandic lava flows. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 80, 57~71.
- Lapôtre M G A, O'Rourke J G, Schaefer L K. Siebach K L, Spalding C, Tikoo S M, Wordsworth R D. 2020. Probing space to understand Earth. Nature Review: Earth and Environment, 1: 170~181.
- Larmor J. 1919. Possible rotational origin of magnetic fields of Sun and Earth, Electrical Review, 85: 512.
- Lawrence K P, Tauxe L, Staudigel H, Constable C G, Koppers A, McIntosh W, Johnson C L. 2009. Paleomagnetic field properties at high southern latitude. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10: Q01005.
- Lekic V, Cottaar S, Dziewonski A, Romanowicz B. 2012. Cluster analysis of global lower mantle tomography: a new class of structure and implications for chemical heterogeneity. Earth and Planetary Science Letters, 357~358, 68~77.
- Livermore P W, Finlay C C, Bayliff M. 2020. Recent north magnetic pole acceleration towards Siberia caused by flux lobe elongation. Nature Geoscience, 13: 387~391.
- Lundin R. 2001. Erosion by the solar wind. Science, 291: 1909.
- McDougall I, Tarling D H. 1963. Dating of polarity zones in the Hawaiian islands. Nature, 200:  $54{\sim}56$ .
- McNamara A K. 2019. A review of large low shear velocity provinces and ultra low velocity zones. Tectonophysics, 760: 199~220.
- Meert J G. 2009. Palaeomagnetism: In GAD we trust. Nature Geoscience, 2: 673~674.
- Meert J G., Levashova N M, Bazhenov M L, Landing E. 2016. Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation. Gondwana Research, 34: 149~157.
- Mercanton P L. 1926. Inversion de l'inclinaison magnétique terrestre aux ages géologiques. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 31(4), 187~190.
- Merrill, R. T. 2010. Our magnetic Earth: the science of geomagnetism. Chicago: The University of Chicago Press, 261.
- Merrill R T, McFadden P L. 1990. Paleomagnetism and the Nature of the Geodynamo. Science, 248: 345~350.
- Merrill R T, McFadden P L. 1999. Geomagnetic polarity transitions. Reviews of Geophysics, 37: 201~226.
- Moore K M, Yadav R K, Kulowski L. Cao H, Bloxham J, Connerney J E P, Kotsiaros S, Jørgensen J L, Merayo J M, Stevenson D J, Bolton S J, Levin S M. 2018. A complex dynamo inferred from the hemispheric dichotomy of Jupiter's magnetic field. Nature, 561: 76~78.
- Mound J, Davies C, Rost S, Aurnou J. 2019. Regional stratification at the top of Earth's core due to core-mantle boundary heat flux variations. Nature Geoscience, 12: 575~580.
- Nagy L, Williams W, Tauxe L, Muxworthy A. 2019. From nano to micro: Evolution of magnetic domain structures in multidomain magnetite. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20: 2907 ~2918.
- Niitsuma N. 1971. Detailed study of the sediments recording the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal. The science reports of the Tohoku University. Second series, Geology, 43: 1~19.
- Nimmo F. 2015. Energetics of the core. In: Schubert G, (Ed.), Treatise on Geophysics, second edn. Oxford: Elsevier, 27~55.
- Ogg JG. 2012. Geomagnetic polarity time scale. In Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D (Eds), The Geologic Time Scale. Boston: Elsevier, 85~113.
- Opdyke N D. 1972. Paleomagnetism of deep-sea cores. Reviews of Geophysics and Space Physics, 10: 213~249.
- Opdyke N D, Channell J E T. 1996. Magnetic Stratigraphy. American: Academic Press, 346.

Opdyke N D, Glass B, Hays J D, Foster J. 1966. Paleomagnetic study of Antarctic deep-sea cores. Science, 154: 349~357.

- O' Rourke J G, Korenaga J, Stevenson D J. 2017. Thermal evolution of Earth with magnesium precipitation in the core. Earth and Planetary Science Letters, 458: 263~272.
- Pan Yongxin, Deng Chenglong, Liu Qingsong, Petersen N, Zhu Rixiang. 2004. Progress in biomineralization and magnetic properties of magnetotactic bacteria magnetosomes. Chinese Science Bulletin, 49 (24): 2505 ~ 2510 (in Chinese without English abstract).
- Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2011. A review of biogeophysics: The establishment of a new discipline and recent progress. Chinese Science Bulletin, 56 (17): 1335 ~ 1344 (in Chinese without English abstract).
- Parker E N. 1955. Hydromagnetic dynamo models, The Astrophysical Journal, 122(2), 293~314.
- Paterson G A, Tauxe L, Biggin A J, Shaar R, Jonestrask L C. 2014. On improving the selection of Thellier-type paleointensity data. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15: 1180~1192.
- Pavlov V, Gallet Y. 2005. A third superchron during the Early Paleozoic. Episodes, 28(2): 78~84.
- Schaeffer N, Jault D, Nataf H-C, Fournier A. 2017. Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core. Geophysical Journal International, 211(1): 1~29.
- Seki K, Elphic R C, Hirahara M, Terasawa T, Mukai T. 2001. On atmospheric loss of oxygenions from Earth through magnetospheric processes. Science, 291: 1939~1941.
- Song Xiaodong, Richards, P. G. , 1996. Seismological evidence for differential rotation of the earth's inner core. Nature, 382, 221  $\sim$  224.
- Stern D P. 2002. A millennium of geomagnetism. Review of Geophysics, 40: 3.
- Tarduno J A. 1990. A brief reversed polarity interval during the Cretaceous Normal Polarity Superchron. Geology, 18: 638  $\sim$ 686.
- Tarduno J A. 2012. Hum from the quite zone. Nature Geoscience, 5(3): 161.
- Tarduno J A, Cottrell R D, Bono R K, Oda H, Davis W J, Fayek M, Erve O, Nimmo F, Huang W, Thern E R, Fearn S, Mitra G, Smirnov A V, Blackman E G. 2020. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(5): 2309~2318.
- Tarduno J A, Cottrell R D, Smirnov A V. 2006. The paleomagnetism of single silicate crystals: Recording geomagnetic field strength during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth. Review of Geophysics, 44: RG1002.
- Tarduno J A, Cottrell R D, Watkeys M K, Hofmann A, Doubrovine P V, Mamajek E E, Liu D, Sibeck D G, Neukrich L P, Usui Y. 2010. Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago. Science, 327: 1238~1240.
- Tarduno J A, Lowrie W, Sliter W V, Bralower T J, Heller F. 1992. Reversed polarity characteristic magnetizations in the Albian Contessa Section, Umbrian Apennines, Italy: Implications for the existence of a Mid-Cretaceous Mixed Polarity Interval. Journal of Geophysical Research, 97 (B1): 241~271.
- Tarduno J A, Watkeys M K, Hufman T N, Cottrell R D, Blackman E G, Wendt A, Scribner C A, Wagner C L. 2015. Antiquity of the South Atlantic anomaly and evidence for top-down control on the geodynamo. Nature Communications, 6: 7865.
- Tauxe L. 1993. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: theory and practice. Reviews of Geophysics, 31: 319~354.
- Tauxe, L. 2010. Essentials of Paleomgnetism. California: University of California Press, 489.
- Tauxe L, Yamazaki T. 2007. Paleointensities. In Kono M, (Ed.), Geomagnetism, volume 5 of Treatise on Geophysics.

Amsterdam: Elsevier, 509~563.

- Thébault E, Finlay C, Beggan C D, Alken P, Aubert J, Barrois O, Bertrand F, Bondar T, Boness A, Brocco L, Canet E, Chambodut A, Chulliat A, Coïsson P, Civet F, Du A, Fournier A, Fratter I, Gillet N, Hamilton B, Hamoudi M, Hulot G, Jager T, Korte M, Kuang W, Lalanne X, Langlais B, Léger J, Lesur V, Lowes F J, Macmillan S, Mandea M, Manoj C, Maus S, Olsen N, Petrov V, Ridley V, Rother M, Sabaka T J, Saturnino D, Schachtschneider R, Sirol O, Tangborn A, Thomson A, Tøffner-Clausen L, Vigneron P, Wardinski I, Zvereva T. 2015. International Geomagnetic Reference Field, the 12<sup>th</sup> generation. Earth Planets and Space, 67(1), 79.
- Wang Huapei, Weiss B P, Bai Xuening, Downey B G, Wang Jun, Wang Jiajun, Suavet C, Fu R R, Zucolotto M E. 2017. Lifetime of the solar nebula constrained by meteorite paleomagnetism. Science, 355: 623~627.
- Wang Tao, Song Xiaodong, Xia H. 2015. Equatorial anisotropy in the inner part of Earth's inner core from autocorrelation of earthquake coda. Nature Geoscience, 8(3): 224~227.
- Wei Yong, Pu Zuyin, Zong Qiugang, Wan Weixing, Ren Zhipeng, Fraenz M, Dubin E, Tian Feng, Shi Quanqi, Fu Suiyan, Hong Minghua. 2014. Oxygen escape from earth during geomagnetic reversals: implications to mass extinctions. Earth and Planetary Science Letters, 394: 94~98.
- Witze A. 2019. Earth's magnetic field is acting up. Nature, 565: 143~144.
- Zhu Rixiang, Ding Zhongli, Wu Hanning, Huang Baochun, Jiang Li. 1993. Details of magnetic polarity transition recorded in Chinese loess. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 45 (4): 289~299.
- Zhu Rixiang, Liu Qingsong, Pan Yongxin. 1999. Correlation between geomagnetic polarity reversal and global geological

events. Chinese Science Bulletin, 44(15):  $1582 \sim 1589$  (in Chinese without English abstract).

- Zhu Rixiang, Pan Yongxin, Liu Qingsong. 1998. The dynamic implication of the variation characteristics of the earth's magnetic field in Mesozoic. In Chen Yong, (Ed.), Cundan collection, a collection of academic papers celebrating the 50th anniversary of academician Liu Guangding's work. Beijing: Science Press, 611~617 (in Chinese without English abstract).
- Zhu Rixiang, Pan Yongxin, Shi Ruiping. 2002. The restriction of the earth's magnetic field intensity on the dynamic process of the earth's interior. Science in China (Series D), 32(4),  $265 \sim 270$  (in Chinese without English abstract).
- Ziegler L B, Stegman D R., 2013. Implications of a long-lived basal magma ocean in generating Earth's ancient magnetic field, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14: 4735~4742.

#### 参考文献

- 潘永信,邓成龙,刘青松,Petersen N,朱日祥.2004. 趋磁细菌磁小体的生物矿化作用和磁学性质研究进展.科学通报,49 (24): 2505~2510.
- 潘永信,朱日祥.2011.生物地球物理学的产生与研究进展.科学通报,56(17):1335~1344.
- 朱日祥,刘青松,潘永信.1999. 地磁极性倒转与全球性地质事件 的相关性.科学通报 44(15):1582~1589.
- 朱日祥,潘永信,刘青松. 1998. 中生代地球磁场变化特征的动力 学含义.见:陈颙主编.《寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作 50 周 年学术论文集》.北京:科学出版社,611~617.
- 朱日祥,潘永信,史瑞萍. 2002. 地球磁场强度对地球内部动力学 过程的制约. 中国科学(D辑), 32(4):265~270.

### Research in the paleo-geomagnetic field: grand challenges and exciting opportunities

LI Yongxiang\*, LIU Xinyu

Institute of Continental Geodynamics, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023

\* Corresponding author: yxli@nju.edu.cn

#### Abstract

The Earth's magnetic field is produced by convection of the molten outer core and has been in existence for at least 3.5 billion years. The origin and evolution of the geomagnetic field has been one of the scientific frontiers in earth science because it is crucial for the habitability of the Earth and also provides an important means of probing the connections between different spheres of the Earth system. This paper is focussed on the record of the deep-time geomagnetic field documented in rocks, and reviews the recent advances and grand challenges in the following: the origin and persistence of the geomagnetic field, magnetic field reversal, and paleointensity. In addition, we show the exciting opportunities in the interdisciplinary research of paleomagnetism and geology on elucidating changes in paleo-geomagnetic field and their impacts on biological evolution in light of the emergence of the novel paleomagnetic measurement techniques, application of analogue geodynamo modeling experiments, and super-computing facilities in numerical modeling, as well as rapid advances in biogeomagnetism. Research on the paleo-geomagnetic field changes will contribute to not only better understanding of the origin and evolution of the Earth's magnetic field, but also the evolution of early stage of Earth's history and even other planetary bodies.

**Key words**: geomagnetic field; geodynamo; polarity reversal; paleointensity; paleomagnetism; magnetostratigraphy