

# CM<sup>2</sup> MAGAZINE



第 100 期



南方科技大学海洋磁学中心主编

<http://cm2.sustech.edu.cn/>

## 创刊词

海洋是生命的摇篮，是文明的纽带。地球上最早的生命诞生于海洋，海洋里的生命最终进化成了人类，人类的文化融合又通过海洋得以实现。人因海而兴。

人类对海洋的探索从未停止。从远古时代美丽的神话传说，到麦哲伦的全球航行，再到现代对大洋的科学钻探计划，海洋逐渐从人类敬畏崇拜幻想的精神寄托演变成可以开发利用与科学研究的客观存在。其中，上个世纪与太空探索同步发展的大洋科学钻探计划将人类对海洋的认知推向了崭新的纬度：深海（deep sea）与深时（deep time）。大洋钻探计划让人类知道，奔流不息的大海之下，埋藏的却是亿万年的地球历史。它们记录了地球板块的运动，从而使板块构造学说得到证实；它们记录了地球环境的演变，从而让古海洋学方兴未艾。

在探索海洋的悠久历史中，从大航海时代的导航，到大洋钻探计划中不可或缺的磁性地层学，磁学发挥了不可替代的作用。这不是偶然，因为从微观到宏观，磁性是最基本的物理属性之一，可以说，万物皆有磁性。基于课题组的学科背景和对海洋的理解，我们对海洋的探索以磁学为主要手段，海洋磁学中心因此而生。

海洋磁学中心，简称  $CM^2$ ，一为其全名“Centre for Marine Magnetism”的缩写，另者恰与爱因斯坦著名的质能方程  $E = MC^2$  对称，借以表达我们对科学巨匠的敬仰和对科学的不懈追求。

然而科学从来不是单打独斗的产物。我们以磁学为研究海洋的主攻利器，但绝不仅限于磁学。凡与磁学相关的领域均是我们关注的重点。为了跟踪反映国内外地球科学特别是与磁学有关的地球科学领域的最新研究进展，海洋磁学中心特地主办  $CM^2$  Magazine，以期与各位地球科学工作者相互交流、合作共进！

“海洋孕育了生命，联通了世界，促进了发展”。21 世纪是海洋科学的时代，由陆向海，让我们携手迈进中国海洋科学的黄金时代。

# 目录

1. 海洋磁异常 .....	1
2. 海洋磁测 .....	2
3. 海底构造 .....	4
4. 海洋环境 .....	6
5. 海洋碳循环 .....	8
6. 海洋环境磁学 .....	10
7. 沉积物古地磁 .....	11
8. 极端气候事件 .....	13
9. 全球铁循环 .....	15
10. 蛇纹石化 .....	17
11. 居里面 .....	19
12. 风尘铁肥 .....	21
13. 海洋生物磁学 .....	22

# 1. 海洋磁异常

李园洁



海洋磁异常与陆地上观测到的磁异常不同，在全球磁异常图上，海洋磁异常表现为几乎平行于洋中脊，且极性正负相间呈条带状分布。1963年，Vine 和 Matthews (1963) 基于海底扩张学说和地磁场倒转理论，提出海洋磁异常条带成因：洋中脊下方上地幔部分熔融物质，上涌喷出地表，新生成的洋壳逐渐冷却，当温度低于其中所含磁性矿物的居里温度时，这些磁性矿物就会记录到当时地球磁场的信息，随着海底扩张，洋中脊两侧形成全球性的极性正负相间的对称的条带状磁异常。

观测海洋磁异常的常规方式是航海磁测，即通常船拖着磁力仪沿着垂直于洋中脊方向探测海底的磁信号，得到的磁异常剖面展现出正负相间的波形（图 1）。磁异常剖面携带有地球磁场和洋壳增生的信息，在构建地磁倒转极性年表和重建板块构造过程中发挥巨大的作用。目前通过对海底磁信号的深度挖掘，海洋磁异常在地球磁场古强度变化、精细的洋盆演化过程以及海底热液活动等前沿领域仍发挥重要作用（李园洁等，2019）。未来随着多样化的观测方式，如低轨道磁卫星的发射、无人机航空磁测、近海底磁力观测和矢量观测等的发展，将促进我们更深的理解洋壳记录的地磁场信号，解决洋壳增生过程的重点问题。

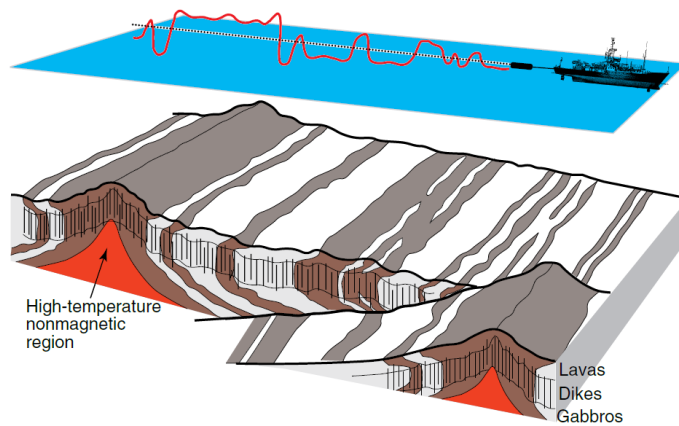


图 1. 洋壳的三维透视图（Gee & Kent, 2007）

Vine, F. J., & Matthews, D. H. (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199(4897), 947-949.

李园洁, 李三忠, 姜兆霞, 索艳慧, 周在征. (2019). 海洋磁异常及其动力学. *大地构造与成矿学*, 43(4), 678-699.

Gee, J. S., & Kent, D. V. (2007). Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity timescale. In G. Schubert (Eds.), *Treatise on Geophysics, Geomagnetism* (Vol. 5, pp. 455–507). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00097-3>

## 2. 海洋磁测



曹伟

海洋磁测是海洋地球物理调查的重要方法，对于认识和开发海洋具有重要意义(Bauer, 1906)。海洋磁测的任务是通过磁法勘探获取海洋区域磁场的分布和变化特征(图2)，为海洋磁力信息的研究、解释和应用提供数据支撑(Golynsky et al., 2018)。

海洋磁测应用广泛，在海洋地质研究、海洋矿产资源勘探、海洋灾害检测和预警、海洋工程调查和海洋军事等领域发挥重要作用(Sager et al., 2019)。海洋磁测发展迅速，测量载体包括卫星磁测、航空磁测、无人机磁测、船载磁测、潜标磁测、水下潜航器磁测以及深拖磁测等平台，测量仪器包括感应线圈式磁力仪、磁通门磁力仪、质子磁力仪、光泵磁力仪、原子磁力仪和超导磁力仪等技术设备。

海洋磁测具有巨大的发展潜力，测量载体趋于智能化和立体化，无人机、无人艇等智能技术的应用，综合不同维度的观测平台，共同打造高效、智能、多尺度的海洋立体观测网络(Wu et al., 2021)。测量仪器趋于多要素、高精度和小型化，不断适应海洋磁测环境和平台搭载需求。设备集成和数据处理方面进一步优化补偿校正和干扰压制技术，提高数据质量和应用价值。相关技术的协同发展将使海洋磁测不断突破时空的限制，为探索海洋提供有力支持。

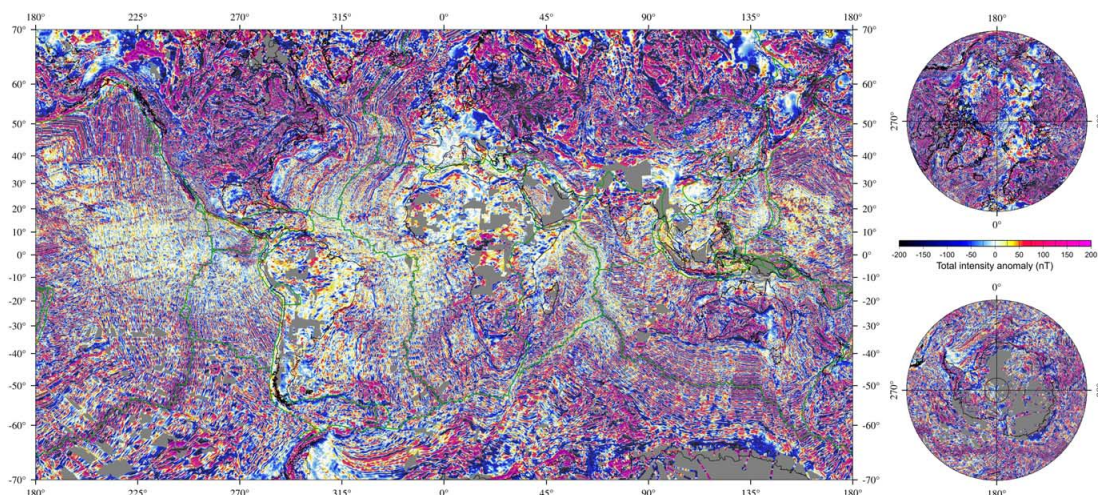


图 2. 全球磁异常模型 EMAG2 (Maus et al., 2009)

Bauer, L. A. (1905). A contemplated magnetic survey of the north pacific ocean by the carnegie institution. *Science*, 21, 594-596. <https://doi.org/10.1126/science.21.537.594>

Golynsky, A. V., Ferraccioli, F., Hong, J. K., Golynsky, D. A., von Frese, R. R. B., Young, D. A., et

al. (2018). New magnetic anomaly map of the Antarctic. *Geophysical Research Letters*, 45, 6437-6449. <https://doi.org/10.1029/2018GL078153>

Sager, W. W., Huang, Y., Tominaga, M., Greene, J. A., Nakanishi, M., Zhang, J. (2019). Oceanic plateau formation by seafloor spreading implied by tamu massif magnetic anomalies. *Nature Geoscience*, 12(8), 661-666. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0390-y>

Wu, T., Tivey, M.A., Tao, C. H., Zhang, J. H., Zhou, F., Liu, Y. L. (2021). An intermittent detachment faulting system with a large sulfide deposit revealed by multi-scale magnetic surveys. *Nature Communications*, 12, 5642. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25880-1>

### 3. 海底构造

刘伟



海底构造是指海洋板块在生成、扩张和俯冲消亡过程中发生的各种构造活动和构造现象的总称，是板块构造的重要组成部分。海底构造的研究对象广泛，包括深海洋盆、海沟、岛弧、海山、海脊以及边缘海等。

海底构造的核心是研究洋壳的演化过程及伴生的地质现象。其中古地磁学在海底构造的研究中发挥着极为重要的作用，是地磁学在海洋地质学中的重要应用，是海洋磁学的重要组成部分。对于海洋板块的运动演化过程，古地磁学基于深海岩心，根据地磁场偶极子模型，能对海洋板块的运动给出准确的量化约束。

前人基于深海钻探岩心和其它地质约束，构建了全球海洋板块运动过程的一级演化模型。但受限于采样密度、仪器精度以及旋转分量的缺失等，全球海洋板块重建的精度还有待提高。近年来，古地磁学在海底构造中的应用逐渐聚焦于对深海长岩心的高分辨率研究 (Richter et al., 2015) 和旋转分量的厘定 (Yamazaki et al., 2021)，并注重与其他研究手段，如物源分析、地震层析成像、地球动力学模拟等的结合，来综合限定海底的构造演化过程 (Liu et al., 2021)。

磁学测量等单一技术手段的提升以及多种方法的集成研究，必将构建更为精细的全球海洋板块构造演化模型，并为深入理解海底矿产资源分布、全球气候演化奠定坚实的构造基础，有利于加深对地球系统多圈层相互作用的理解，有利于深化对“宜居地球”的认识。

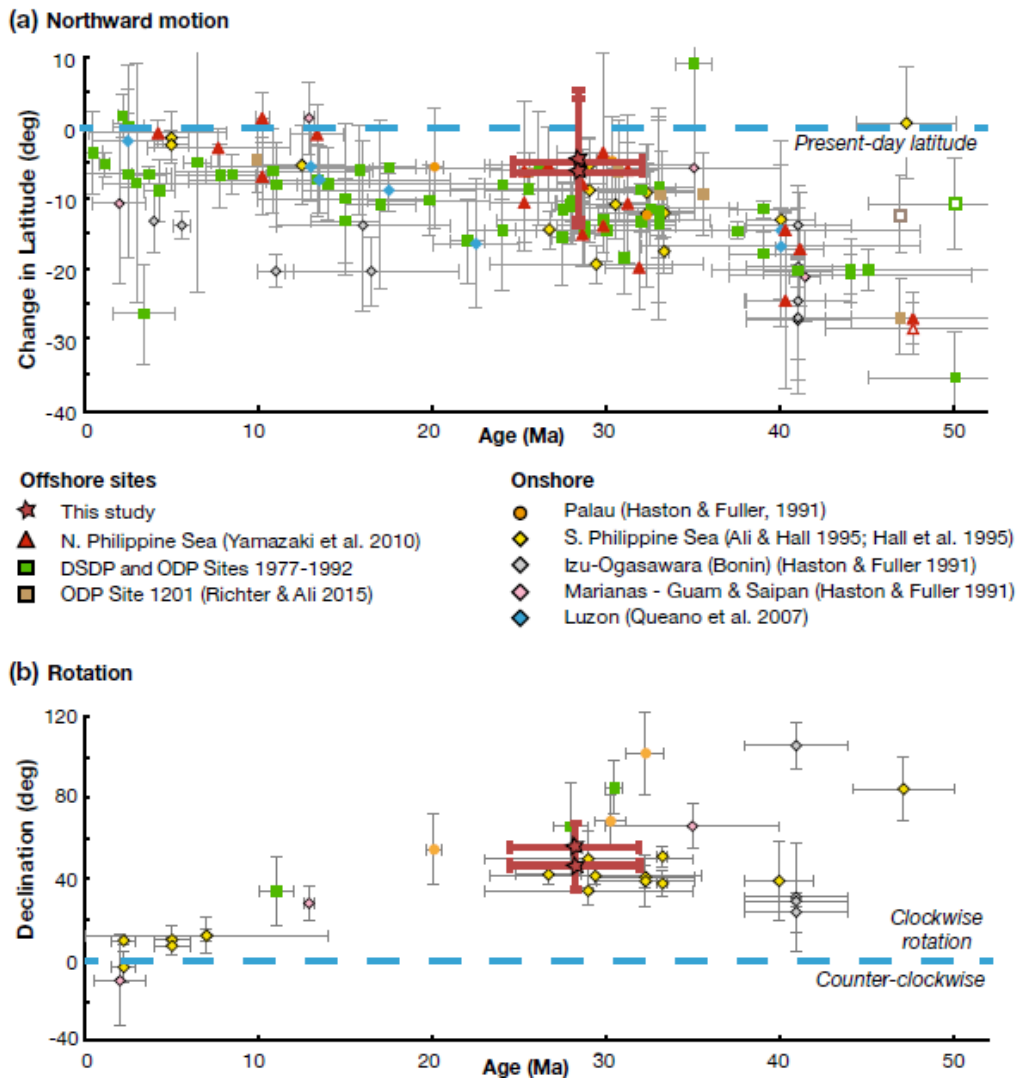


图 3. 菲律宾海板块古纬度变化 (a) 和旋转角度变化 (b) (Yamazaki et al., 2021)

Liu, W., Gai, C., Feng, W., Cao, W., Guo, L., Zhong, Y., et al. (2021). Coeval Evolution of the Eastern Philippine Sea Plate and the South China Sea in the Early Miocene: Paleomagnetic and Provenance Constraints From ODP Site 1177. *Geophys. Res. Lett.* 48. doi:10.1029/2021GL093916.

Richter, C., & Ali, J. R. (2015). Philippine Sea Plate motion history: Eocene-Recent record from ODP Site 1201, central West Philippine Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 410, 165–173. doi:10.1016/j.epsl.2014.11.032.

Yamazaki, T., Chiyonobu, S., Ishizuka, O., Tajima, F., Uto, N., & Takagawa, S. (2021). Rotation of the Philippine Sea plate inferred from paleomagnetism of oriented cores taken with an ROV-based coring apparatus. *earth planets Sp.* 73, 1–10. doi:10.1186/S40623-021-01490-5.



## 4. 海洋环境

仲义



深水底流是全球洋流系统的重要组成部分，其与极向西边界流一起所构成的经向翻转流体系，全球热量和水汽输送的传送带，对全球热量分布、碳循环和气候调节都具有极其重要的影响意义。高纬度地区低温高盐的海水下沉海底，沿着西边界向南流动，驱动了全球经向翻转流。深水底流的变化影响和控制大洋碳储存、氧气输送、氮储库以及沉积物的输运和埋藏。

过去对于古洋流重建方面的研究主要利用沉积学及同位素地球化学的手段，对于洋流的通风状态、水团来源以及动力学方面提供约束，缺少对于底流方向性的研究。而利用沉积物磁学性质，包括磁化率各项异性（AMS）和岩石磁学参数，是古洋流动态重建的重要途径，它为深水底流研究提供底流强度、方向二维属性（Kissel et al., 2010）。磁化率各向异性是一个二阶张量，其对应矩阵的特征向量（ $K_{max}$ ,  $K_{int}$ ,  $K_{min}$ ）则分别指示磁性颗粒的长轴、中轴和短轴，特征值则对应于各向异性度。利用沉积物的磁化率各向参数可以反映排列方向也可用于推断水流方向。在深海稳定水动力环境下，深水底流控制沉积物中磁性矿物的粒度，其流速与磁性矿物粒度大小之间具有密切的关系。

深水底流在地质历史时期可能存在迁移，且底流的水团的来源可能存在转换，因此，需要从底流流速、流向二维动态变化信息，并结合水团的来源和沉积物运输模式，从多个维度区分深水底流变化。比如，Kissel et al. (2013)利用磁化率各项异性指标和粒度可分选性粉砂指标重建全新世以来北大西洋深水底流强度变化；Zhong et al. (2021)利用 AMS 矢量变化和黏土矿物物源变化，综合分析北太平洋中层水在冰期-间冰期的来源变化。因此，未来利用古洋流不同维度信息并结合模拟研究，揭示不同地质历史时期深水底流变化，对于揭示气候模态变化过程及其极端气候变化现象、全球气候变化临界点都具有重要意义。

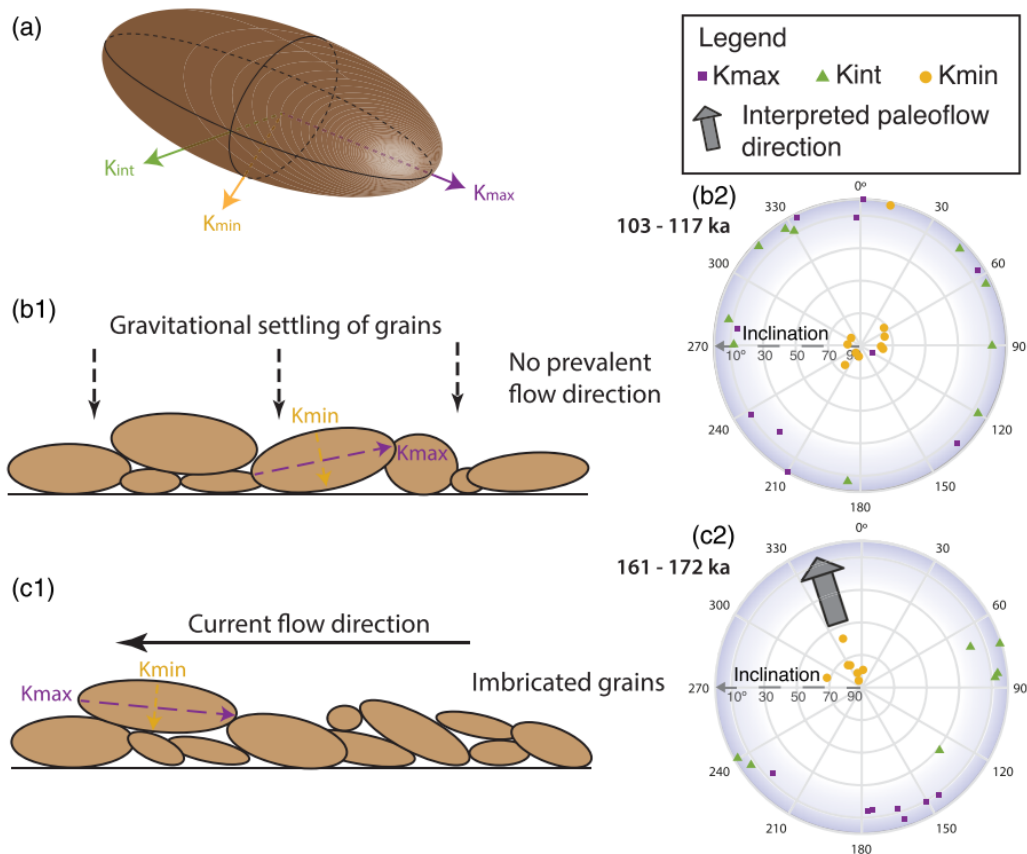


图 4. 磁化率各项异性指示古洋流变化示意图 (Nichols et al., 2020)

Kissel, C., Van Toer, A., Laj, C., Cortijo, E., Michel, E. (2013). Variations in the strength of the North Atlantic bottom water during Holocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 369, 248-259.

Kissel, C., Laj, C., Kienast, M., Bolliet, T., Holbourn, A., Hill, P., Kuhnt, W., Braconnot, P. (2010). Monsoon variability and deep oceanic circulation in the western equatorial Pacific over the last climatic cycle: Insights from sedimentary magnetic properties and sortable silt. *Paleoceanography*, 25(3), PA3215.

Zhong, Y., Liu, Y. G., Gong, X., Wilson, D. J., Lu, Z. Y., Liu, J. B., Song, T. F., Gorbarenko, S. A., Shi, X. F., Yang, X. Q., Liu, Q. S. (2021). Coupled Impacts of Atmospheric Circulation and Sea-Ice on Late Pleistocene Terrigenous Sediment Dynamics in the Subarctic Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 48(19), e2021GL095312.

## 5. 海洋碳循环

张亚南



全球碳循环变化作为地球气候系统中的反馈器,对我们了解过去气候系统变化机制和预测未来气候变化具有重要的作用。海洋通过表层的海气交换,调控着大气  $\text{CO}_2$  的收支平衡。在溶解度泵,生物泵和碳酸盐泵的作用下表层海水吸收大气  $\text{CO}_2$  并随着水循环和沉降作用进入深海。风和潮汐的驱动则会打破水体的分层,将富含碳和营养盐的深水带到表层,从而向大气释放  $\text{CO}_2$ ,从而形成水循环与海洋碳循环之间的关联。在整个海洋碳循环过程中涉及到了生物泵和海洋环流,同时引起氧化还原, pH, 碱度等一系列水体化学性质的改变。此外, Korff (2016) 发现太平洋深水区磁学参数也发生了明显的冰期-间冰期旋回,认为其反映了氧化还原条件对磁性颗粒的影响。磁化率各向异性 (AMS) 等参数也可以通过恢复洋流的路径和强度来重建不同时期的海洋环流模式,进而可以用来追踪深海碳库的变化。在输入端生物泵方面,铁输入变化似乎与生产力之间存在着不一致性 (Chen et al.,2020),这也使得需要对生物可利用性的铁进行更深的研究。磁学和铁循环知识方法的加入能够更好的厘清海洋碳库的收支平衡,从而来更好的认识碳循环的驱动机制。

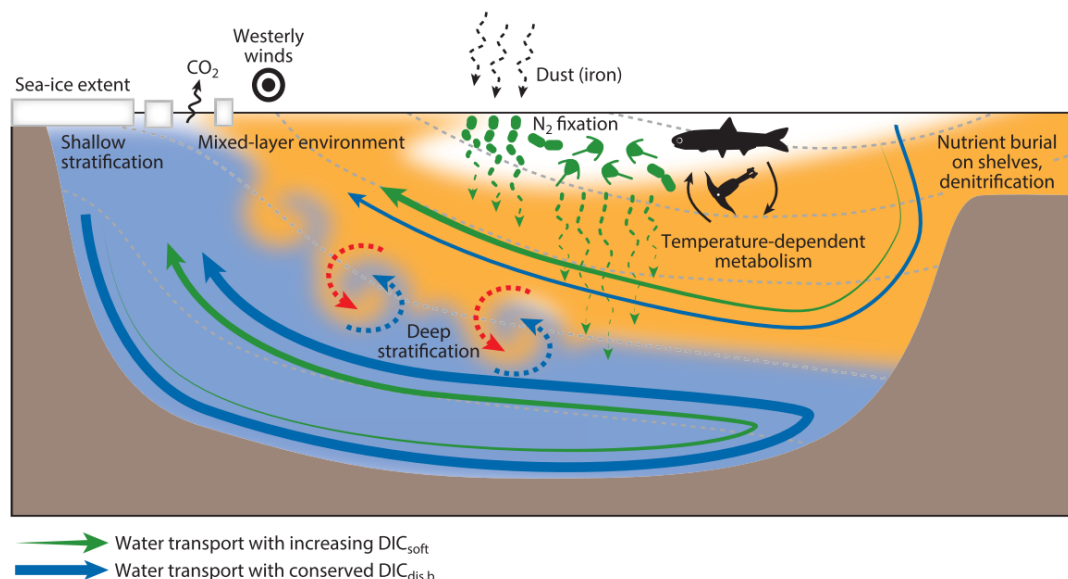


图 5. LGM 时期影响生物泵因素示意图。(Galbraith & Skinner, 2020)

Chen, T., Liu, Q., Roberts, A. P., Shi, X., & Zhang, Q. (2020). A test of the relative importance of iron fertilization from aeolian dust and volcanic ash in the stratified high-nitrate low-chlorophyll subarctic Pacific Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 248, 106577.

Galbraith, E. D., & Skinner, L. C. (2020). The Biological Pump During the Last Glacial Maximum.

Annual Review of Marine Science, 12, 559-586.

Korff, L., Dobeneck, T., Frederichs, T., Kasten, S., Kuhn, G., Gersonde, R., & Diekmann, B. (2016). Cyclic magnetite dissolution in Pleistocene sediments of the abyssal northwest Pacific Ocean: evidence for glacial oxygen depletion and carbon trapping. *Paleoceanography*, 31, 600–624.

## 6. 海洋环境磁学

盖聪聪



海洋环境磁学是一门将海洋科学、环境科学和磁学结合的交叉学科。其基本原理是磁性矿物的形成、搬运、沉积和转化，都和环境过程息息相关，因此，海洋沉积物中磁性矿物的种类（组合）、含量、和粒径（磁畴）等特征可以用来重建环境演化过程。

海洋沉积物中磁性矿物来源丰富，包括原生的陆源物质、自生的生物矿化和成岩作用改造形成的磁性矿物。其中，原生磁性矿物的种类可以用来追踪沉积物的陆源物质搬运-沉积过程，生物矿化和成岩作用改造后的磁性矿物可以反映海洋氧化-还原条件。磁性矿物的含量和粒径特征则更多地记录了沉积物运移媒介的特征，如 Kissel et al. (1999) 根据磁性矿物含量变化反演了北大西洋底层流强度的变化、Gai et al. (2020) 应用磁性矿物的含量和粒径指标重建了晚中新世以来东亚季风在南海的记录等。

Gai, C., Liu, Q., Roberts, A. P., Chou, Y., Zhao, X., Jiang, Z., & Liu, J. (2020). East Asian monsoon evolution since the late Miocene from the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 530. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115960>

Kissel, C., Laj, C., Labeyrie, L., Dokken, T., Voelker, A., & Blamart, D. (1999). Rapid climatic variations during marine isotopic stage 3: Magnetic analysis of sediments from Nordic Seas and North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, 489–502. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00162-4)

## 7. 沉积物古地磁

柳加波



水体中的磁性颗粒在沉降和悬浮过程中，能够记录地磁场的方向和相对强度信息，并在沉积之后保存在沉积物之中。此外，沉积物中的宇宙核素  $^{10}\text{Be}$  的相对丰度也能够反映地磁场强度变化。沉积物记录的地磁场极性倒转，是大洋钻孔的重要年代锚点(Lund et al., 2006)。基于连续、高分辨率的沉积物古地磁结果，我们对地磁场的极性倒转、地磁漂移等异常事件和地磁场长期变化的理解不断深入 (Laj & Channell, 2015)。但是，受沉积物年代框架、磁性矿物转化、沉积环境等因素的影响，从沉积物中重建古地磁记录仍存在较大不确定性。量化沉积物古地磁误差，调和与火成岩等其他古地磁记录之间的差异，从全球尺度研究地磁场演化特征是今后沉积物古地磁研究的趋势 (Panovksa et al., 2021)。

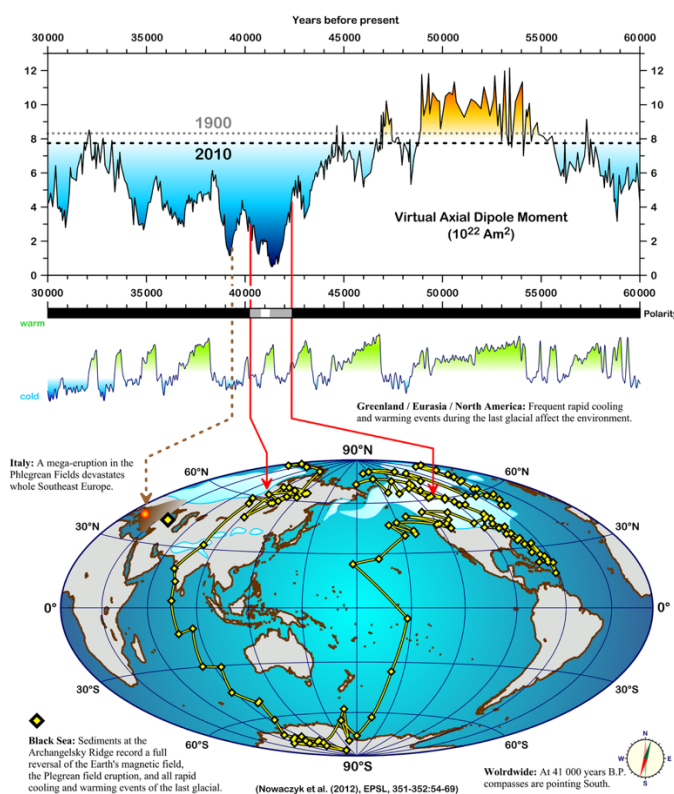


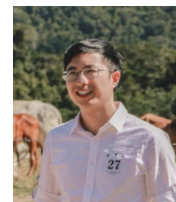
图 6. 黑海沉积物记录的 Laschamp 地磁漂移事件( $\sim 4.1$  ka)期间,全球轴向偶极子场(VADM)与虚拟地磁极(VGP)的连续变化特征。

Lund, S. P., Stoner, J. S., Channell, J. E. T., & Acton, G. (2006). A summary of Brunhes paleomagnetic field variability recorded in Ocean Drilling Program cores. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 156(3–4), 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.10.009>

- Laj, C., & Channell, J. E. T. (2015). Geomagnetic Excursions. In *Treatise on Geophysics* (pp. 343–383). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00104-4>
- Panovska, S., Korte, M., Liu, J., & Nowaczyk, N. (2021). Global evolution and dynamics of the geomagnetic field in the 15–70 kyr period based on selected paleomagnetic sediment records. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2021jb022681>

## 8. 极端气候事件

蒋晓东



极端气候事件是指地质历史时期气候出现了急剧的变化,或变冷、变暖、变干旱或湿润,引起环境甚至生物演化发生巨大转变的事件。例如古新世-始新世极热事件 (PETM), 始新世-渐新世变冷事件 (EOT)。极端气候通常是由板块构造运动、火山喷发、温室气体释放、陨石撞击等因素驱动,引起全球尺度的洋流或大气二氧化碳浓度发生巨变。

现今地球气候正发生着剧烈的变化,因此地质历史时期极端气候事件提供了可类比的研究机会,这对预测未来环境气候变化具有重要的参考意义。这些研究涉及环境气候的方方面面,包括洋流变化,大气二氧化碳变化,生物群落响应,生产力变化,风化剥蚀等。磁学方法在生产率变化、微生物响应、粉尘通量和干湿变化等研究方面具有快速、灵敏的特点。例如 Chang et al. (2018) 通过 FORC 和磁化率分析结合电镜观察确定南大西洋 PETM 期间铁输入增加引起生产力增强进而引起磁小体爆发。大洋中增强的铁输入很可能来自粉尘 (Larrasoña et al., 2012)。联合矫顽力和统计学分析,发现 PETM 期间为响应环境的变化磁小体形态发生了变化 (Chang et al., 2018)。此外 EOT 期间磁小体也呈现出类似的变化,只不过该时段有机质的保存影响了磁小体形态分布 (Lu et al., 2021)。

磁学方法在极端气候环境变化研究中具有高效和无损的优势,但是在系统性方面还有所缺乏。若能联合多种分析方法与手段,尤其同位素地球化学手段,将能系统地解译极端气候时期地球表面各个圈层间的相互作用,借助气候模型更能对各个因素的贡献进行定量化研究,更为清晰的厘定环境变化的过程和机制。多学科交叉或许是将来极端气候研究的一个方向。

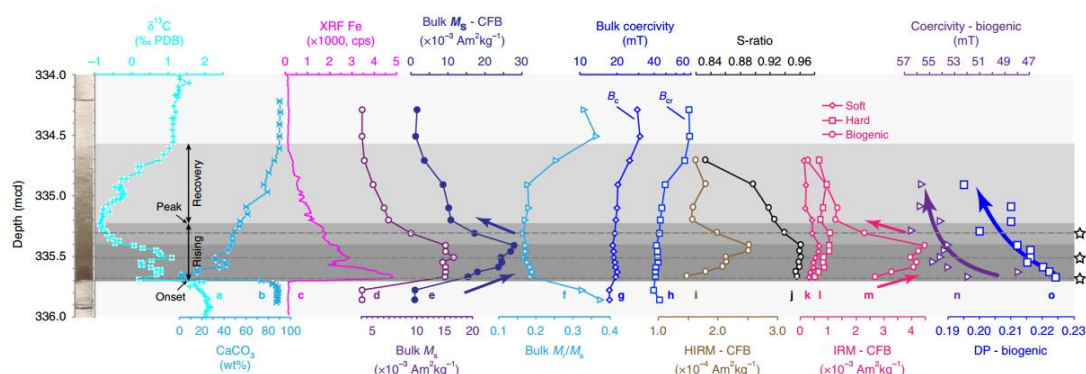


图 7. 南大西洋 PETM 时段沉积物各参数变化。(a-c) 已发表的全岩碳同位素、碳酸钙和铁含量。(d-o) 全岩的  $M_s$ 、 $M_{rs}/M_s$ 、 $B_c$ 、 $B_{cr}$ 、HIRM、S-ratio、 $B_{1/2}$  等磁学参数



- Chang, L., Harrison, R. J., Zeng, F., Berndt, T. A., Roberts, A. P., Heslop, D., & Zhao, X. (2018). Coupled microbial bloom and oxygenation decline recorded by magnetofossils during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum. *Nature Communications*, 9(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06472-y>
- Larrasoana, J. C., Roberts, A. P., Chang, L., Schellenberg, S. A., Gerald, J. D. F., Norris, R. D., & Zachos, J. C. (2012). Magnetotactic bacterial response to Antarctic dust supply during the Palaeocene–Eocene thermal maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 333, 122-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.003>
- Lu, Y., Wang, D., Jiang, X., Lin, Z., Yang, Y., & Liu, Q. (2021). Paleoenvironmental significance of magnetofossils in pelagic sediments in the equatorial Pacific Ocean before and after the Eocene/Oligocene boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(9), e2021JB022221. <https://doi.org/10.1029/2021JB022221>

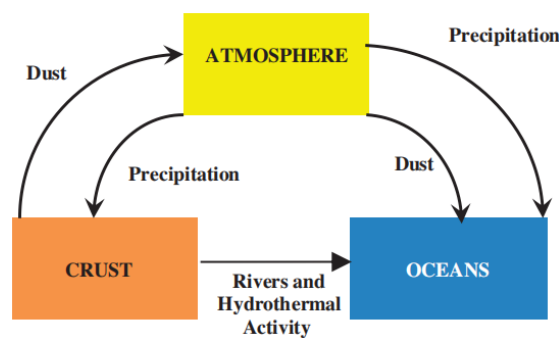
## 9. 全球铁循环



冯婉仪

全球铁循环是指铁元素在地球的大气圈、水圈、生物圈、土壤圈和岩石圈间进行迁移和转化的过程。风尘、大气降水、极地冰川活动、河流和热液活动等方式可以使铁元素在各个铁储库之间迁移。铁循环不是单一方向的，也不是在一个封闭体系中进行的 (Raiswell & Canfield, 2012)。陨石和岩浆活动可以带来额外的铁，而俯冲作用则会导致铁丢失。1987 年 Lovley 从沉积物中分离出金属还原地杆菌 GS15，标志着铁循环研究的开始。目前，关于铁循环的研究主要集中在铁元素的来源、铁元素迁移和转化的过程（如：外部供应模式、化学形态和转化、微生物与矿物间的相互作用等）及其驱动机制、铁循环对海洋生态系统和全球气候的影响以及在重金属固定和污染物转化等方面的作用 (Hutchins & Boyd, 2016; Zhang et al., 2020)。主要的研究方法包括地球化学、环境磁学和微生物学等。未来铁循环的研究将进一步考虑多种因素共同控制铁循环过程，并量化它们的累积效应。

a



b

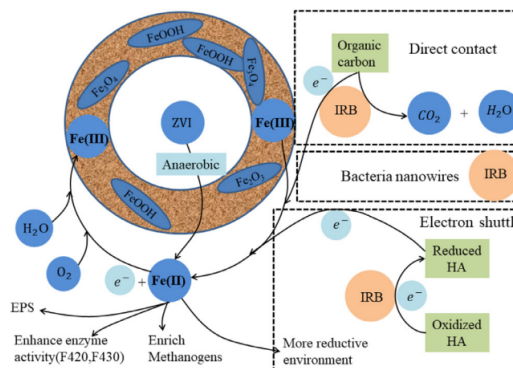


图 8. (a) 全球铁循环简化示意图(Raiswell & Canfield, 2012); (b) 铁的生物地球化学循环过程示意图(Hutchins & Boyd, 2016; Zhang et al., 2020)

- Raiswell, R., & Canfield, D. E. (2012). The iron biogeochemical cycle past and present. *Geochemical perspectives*, 1(1), 1-220.
- Hutchins, D. A., & Boyd, P. W. (2016). Marine phytoplankton and the changing ocean iron cycle. *Nature Climate Change*, 6(12), 1072-1079.
- Zhang, J. X., Qu, Y. Y., Qi, Q. X., Zhang, P. S., Zhang, Y. B., Tong, Y. W., & He, Y. L. (2020). The bio-chemical cycle of iron and the function induced by ZVI addition in anaerobic digestion: a review. *Water Research*, 186(45), 116405.

## 10. 蛇纹石化

杨会会



蛇纹石化是超基性岩的一种变质现象，是中、低温热液对含镁的岩石进行交代产生蛇纹石的一种水岩蚀变作用（图9）。大规模的蛇纹石化作用主要发生在海底，洋中脊和俯冲带。蛇纹石化改变了大洋岩石圈和俯冲带地幔楔的物理和化学性质，如岩石密度降低，地震波速降低和铁磁性矿物的变化。

蛇纹石化岩石中的磁铁矿是次生磁性矿物，具有稳定的化学剩磁，剩磁强度 $\geq 10^{-3}\text{emu/cm}^3$ ，因而大规模蛇纹石化的地区可能导致海洋磁异常（Dunlop & Prevot, 1982）。早期模拟研究发现磁铁矿的产量随着蛇纹石化程度的增加而增加（Toft et al., 1990）。进一步模拟表明适度的热液冷却活动和发生在 200-300 °C 的蛇纹石化可以很好地解释中-慢速扩张洋脊的海平面磁异常（Dyment et al., 1997）。后续研究者甚至建立了蛇纹石化程度和岩石天然剩磁及磁化率之间的关系：当岩石的蛇纹石化程度 < 75 % 时，其磁化率较低；当蛇纹石化程度 > 75 % 时，磁化率快速增强，由此把岩石的天然剩磁和磁化率的高值（NRM: 4-10 A/m; K:  $\sim 0.07$  SI）作为洋壳中高度蛇纹石化，即蛇纹石化程度 > 75 % 的特征信号（Oufi et al., 2002）。后人也证实了随着蛇纹石化程度的不断加深，磁铁矿逐渐生成：橄榄石经流体的蛇纹石作用形成蛇纹石和铁水镁石后，在更开放的体系下发生进一步的蛇纹石作用，铁水镁石被分解形成磁铁矿（Boch et al., 2006）。最近，精细的矿物学研究证实：在高度蛇纹石化的样品中，磁铁矿是形成天然剩磁的唯一来源。在陆地岩石圈环境中，蛇纹岩中的磁铁矿贡献了 8-12 km 深度的磁异常（Yu & Tikoff, 2020）。

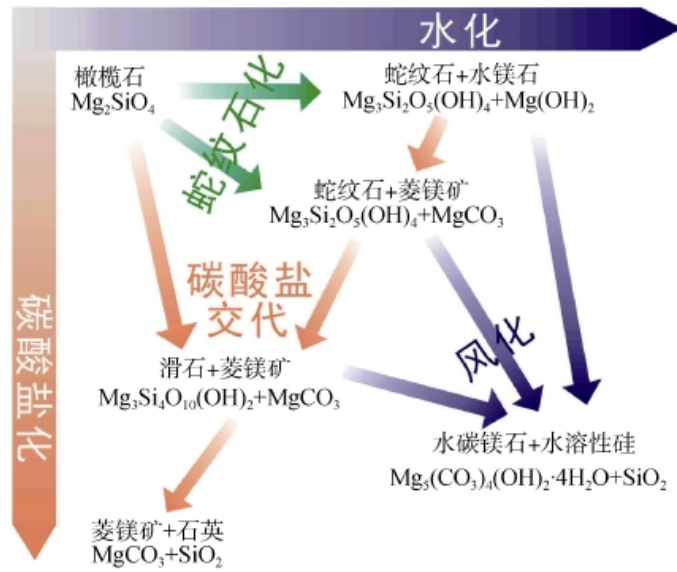


图 9. 橄榄岩蛇纹石化和碳酸盐化的变质过程

- Bach, W., Paulick, H., Garrido, C. J., Ildefonse, B., Meurer, W. P., Humphris, S. E. (2006). Unraveling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274), *Geophysics Research Letter*, 33, L13306, doi:10.1029/2006GL025681.
- Dunlop D. J. & Prevot M. (1982). Magnetic properties and opaque mineralogy of drilled submarine intrusive rocks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 69(3), 763-802.
- Dyment J., Arkani-Hamed J., Ghods A. (1997). Contribution of serpentinized ultramafics to marine magnetic anomalies at slow and intermediate spreading centers: insights from the shape of the anomalies. *Geophysical Journal International*. 129, 691-701.
- Oufi O., Cannat M. & Horen H. (2002). Magnetic properties of variably serpentinized abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research*, 107, B5, 2095, doi: 10.1029/2001JB000549
- Toft P. B., Arkani-Hamed J. and Haggerty S. E. (1990). The effects of serpentinization on density and magnetic susceptibility: a petrophysical model. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 65: 137-157.
- Yu Y. & Tikoff B. (2020). Magnetic cr-rich spinel in serpentinized ultramafic complexes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11), doi: 10.1029/2020JB020443

## 11. 居里面

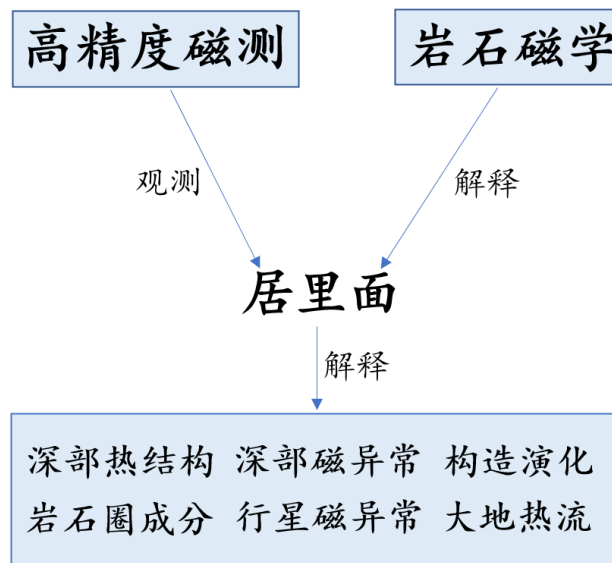
张伟杰



地温处于居里温度的深度称为居里深度点，居里深度点组成等温面称为居里面。温度高于铁磁性矿物的居里温度以后，铁磁性矿物自发磁化消失转变为顺磁性，即居里面以下铁磁性物质转变为顺磁性，强磁性消失。居里温度磁性矿物的磁化强度急剧衰减，此性质使其成为了解深部热相关过程的重要工具。结合高精度磁测，可以快速地获得区域上岩石圈热状态，进而可以约束地球深部热结构、区域构造演化、不同地区热流值等，以及帮助理解火星特殊的磁异常及其意义。

长波长磁异常得到的下地壳磁异常结果大于下地壳物质剩磁、感磁推导出的磁异常结果没有得到很好的解释 (Shive, et al., 1989)。地幔通常认为是高温无磁性的，磁测数据与磁性矿物高温高压实验展示出核幔边界之下可能存在磁化层 (Ferré et al., 2021)。通常磁测数据处理解释时居里面温度参考常压下磁性矿物的居里温度、磁性矿物磁化率采用恒定的磁化率、磁性矿物剩磁变化特征参考常压下随温度变化特征。然而，磁性矿物居里温度、磁化率、剩磁跟磁性矿物成分、所处的温度压力密切相关 (Haggerty, 1978)。

高精度磁测与岩石磁学相结合。磁测数据解释需要进一步结合不同成分磁性矿物在不同温度压力下的磁学特征，优化对岩石圈磁层结构、岩石圈热状态、岩石圈成分、区域构造演化等的理解。



- Ferré, E. C., Kuppenko, I., Martín-Hernández, F., Ravat, D., Sanchez-Valle, C. (2021). Magnetic sources in the Earth's mantle. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1), 59-69.
- Haggerty, S. E. (1978). Mineralogical constraints on Curie isotherms in deep crustal magnetic anomalies. *Geophysical Research Letters*, 5(2), 105-108.
- Shive, P. N. (1989). Can remanent magnetization in the deep crust contribute to long wavelength magnetic anomalies? *Geophysical Research Letters*, 16(1), 89-92.

## 12. 风尘铁肥

王敦繁



不同的地质历史时期在不同的气候状态下,海洋中陆源风尘的输送是地球由陆向海多圈层相互耦合的重要纽带。海洋中陆源风尘的研究不仅可以反映过去特定时期陆地古环境变化,而且可以追溯当时海洋环境中与铁相关的生物地球化学循环过程,这些海陆协同演变深刻影响大气二氧化碳的含量和地球环境的变化(Yasuda, 2021; Erhardt et al., 2017)。近些年研究表明,磁学方法在追踪过去陆源风尘输入和海洋铁肥效应过程中具有不可替代的优越性,比如简易的测试分析流程和少量无损的样品需求等越来越多的研究表明,磁学是研究海洋中陆源风尘输入和与铁相关的生物地球化学循环的重要手段(Zhang et al., 2018; Yamazaki et al., 2020)。

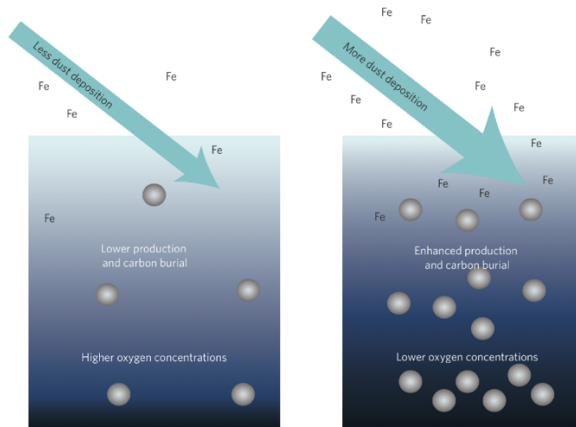


图 11. 海洋中陆源风尘的输入对海洋生产力和碳埋藏以及底层水含氧量的影响(Erhardt, 2017)。

Yasuda, J. (2021). A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production. *Journal of Oceanography*,

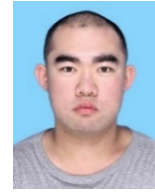
Erhardt, A. (2017). Tropical ties. *Nature Geoscience*, 10(10): 714-715.

Zhang, Q., Liu, Q., Li, J., et al. (2018). An Integrated Study of the Eolian Dust in Pelagic Sediments From the North Pacific Ocean Based on Environmental Magnetism, Transmission Electron Microscopy, and Diffuse Reflectance Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5): 3358-3376.

Yamazaki, T., Fu, W., Shimono T., et al. (2020). Unmixing biogenic and terrigenous magnetic mineral components in red clay of the Pacific Ocean using principal component analyses of first-order reversal curve diagrams and paleoenvironmental implications. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 120.



### 13. 海洋生物磁学



王浩森

全球海洋中分布着大量的由趋磁细菌产生的生物磁性颗粒，称为磁小体。磁小体是海洋生物磁学研究的重要载体。一方面，磁小体是反映古环境演化的一个重要指标，其形态的变化与海洋的氧化还原环境变化密切相关 (Yamazaki et al., 2020); 另一方面，磁小体的丰度变化能够作为反映古气候的有效指标 (Paasche et al., 2004) 同时，在气候适宜时期，海洋中的高营养盐能够促进趋磁细菌的生物矿化过程，从而增加磁小体的生成。例如在全新世环境适宜期以及古新世-始新世极热时期。

此外，磁小体还是一种理想的单畴磁性颗粒 (Wagner et al., 2021)，其用于记录地磁场的效率是小颗粒磁铁矿的 2-4 倍 (Ouyang et al., 2014) 因此磁小体除了进行古环境古气候的研究，还可以用于古地磁场的研究工作。

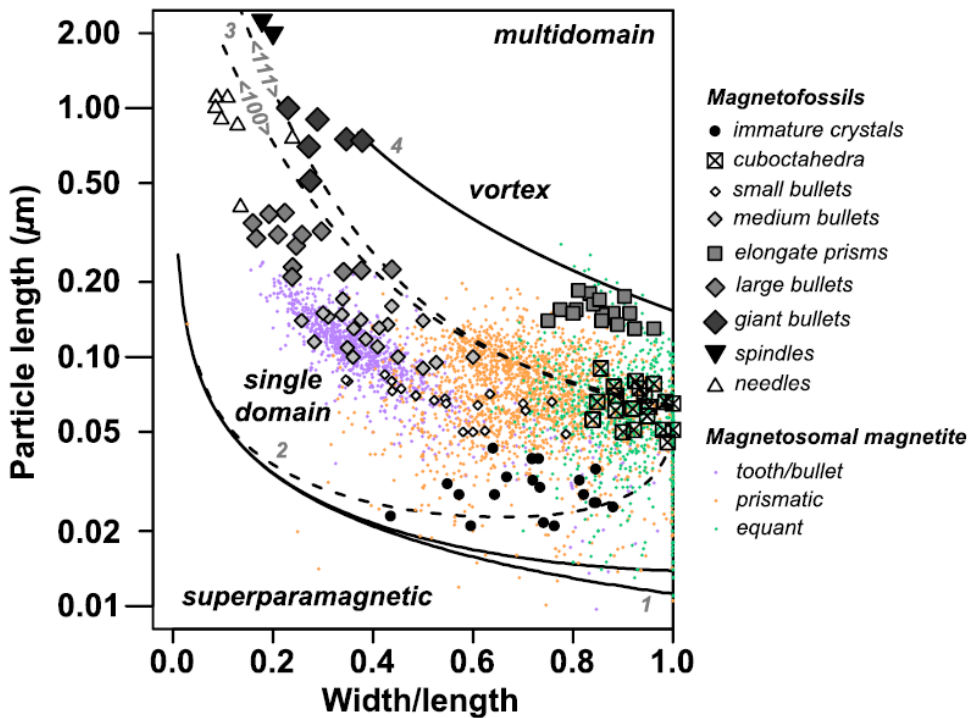


图 12. 关于不同形态磁小体的磁畴分布情况 (Wagner et al., 2021)。

Ouyang, T., Heslop, D., Roberts, A. P., Tian, C., Zhu, Z., Qiu, Y., & Peng, X. (2014), Variable remanence acquisition efficiency in sediments containing biogenic and detrital magnetites: Implications for relative paleointensity signal recording, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7), 2780-2796, <https://doi.org/10.1002/2014GC005301>.

Paasche, Ø., Løvlie, R., Dahl, S. O., Bakke, J., & Nesje, A. (2004), Bacterial magnetite in lake

sediments: late glacial to Holocene climate and sedimentary changes in northern Norway, *Earth and Planetary Science Letters*, 223(3), 319-333, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.001>.

Wagner, C. L., Egli, R., Lascu, I., Lippert, P. C., Livi, K. J., & Sears, H. B. (2021), In situ magnetic identification of giant, needle-shaped magnetofossils in Paleocene–Eocene Thermal Maximum sediments, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(6).

Yamazaki, T., Fu, W., Shimono, T., & Usui, Y. (2020), Unmixing biogenic and terrigenous magnetic mineral components in red clay of the Pacific Ocean using principal component analyses of first-order reversal curve diagrams and paleoenvironmental implications, *Earth, Planets and Space*, 72(1), 120, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01248-5>.