



PGL

Letters

第2期 (总第十六期)

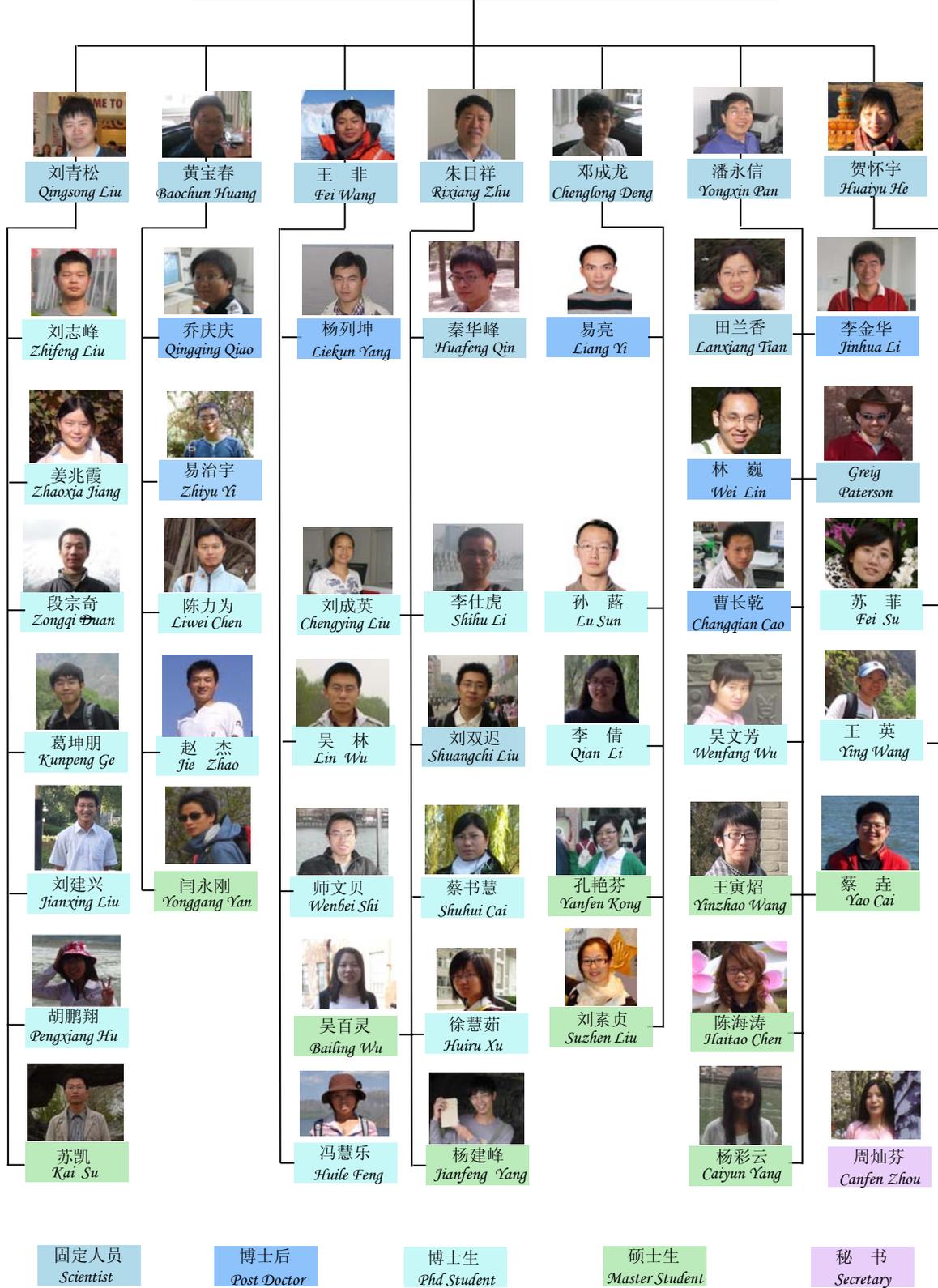


观临夏 (摄影: 胡鹏翔)

2012

Paleomagnetism and Geochronology Laboratory in Beijing

古地磁与年代学实验室 Paleomagnetism and Geochronology Laboratory in Beijing



古地磁与年代学实验室科研人员结构图

期刊首语

夏季总是体育爱好者的天堂。回味无穷的欧洲杯结束后，我们又将迎来伦敦奥运会。西班牙的强势卫冕再次展示了团队合作的魅力，而奥运会更是一项需要全体国家队员团结奋进的赛事。在科学领域，又何尝不是如此？各学科之间的团结互补，才有了今天科学的发展。本期 PGL Letters, 将为大家介绍大量磁学与其他学科的交叉研究，在这些交叉研究中，我们或许会发掘到新的思想，新的方向。

替代指标是过去环境研究中最重要载体。专题介绍中将为大家综述地化指标 ^{10}Be 作为新兴替代性指标在示踪和重建地磁场中的应用。

生物磁学是一门以生命体的磁性研究为手段，探讨生命体的结构功能与演化，环境变迁等问题的学科。趋磁细菌是其中重要的研究对象。本期重点连载将为您带来趋磁细菌的综述研究。详细介绍了近年来趋磁细菌多样性，地理分布，环境磁学及古环境重建中的进展。

文献导读一如既往地为您奉上学术的大餐，从化石磁小体到褶皱冲断带的旋转问题，从微磁

学模拟，到玄武岩中氧化物的出溶问题，从传统磁性地层学到考古磁学，您可以在这里了解到最新的磁学研究与多学科的交叉应用。

人与社会犹如树木与土壤，息息相关又相互制约，逐渐成长为社会主力军的我们，如何去充分利于环境，又如何适当地改良环境？本期的文化动态将与您共同探讨。

说到“交叉”，不禁想起，学科需要交叉，个人也需要“交叉”。正值阳光明媚，活力四射的夏季，也许我们也该把丰富多彩的生活与娱乐交叉到科学研究中。享受自然，享受运动，享受生活的快乐，让科研也灵动起来。

该刊物宗旨：大家刊物大家办，办好刊物为大家！

该刊物的定位：融知识性与趣味性为一体，在拓宽知识面的同时，加强研究深度探讨。

征稿方式：该刊物将由我们实验室所有人员参与创作，同时欢迎同行业人员投稿。

发行对象：向本实验室内部人员，及国内外古地磁界的同行（参考资料）。

发行方式：电子版本（彩色）和纸质版本（黑白）。

栏目设置：详见本刊最后页。

PGL Letters

第2期

2012年7月

目 录

人物介绍

王喜生.....1

专题介绍

^{10}Be -古地磁研究的新兴替代性指标1

重点连载

趋磁细菌多样性及其环境意义.....5

文献导读

从深海环境中找寻化石磁小体.....13

褶皱冲断带里的旋转问题：比利牛斯山南部的古地磁和磁组构比较讨论.....15

稳定旋涡状磁铁矿纳米环：微磁学模拟与实验简述.....16

合成玄武岩中多组分立方氧化物的出溶作用：温度依赖性和磁学性质的意义.....17

里海盆地南部上新世-中新世海侵的磁性地层时代框架19

野外明火实验揭示的不同磁化机制-对考古磁学研究的启示20

化学风化对构造作用的反应：以加利福尼亚San Gabriel山土壤剖面为例.....21

生物标志物又有新发现-伸长各向异性趋磁细菌磁小体新进展.....22

文化动态

树木与土壤.....23

实验室新闻.....24

人物介绍



王喜生, 中国科学院地质力学研究所“古地磁与古构造重建”国土资源部重点实验室研究员

1994年毕业于太原理工大学(原山西矿业学院), 获矿产普查与勘探专业学士学位; 1997年于中国地质大学(北京)获矿产普查与勘探专业硕士学位; 2001年获挪威卑尔根大学古地磁专业硕士学位; 2005年于中国地质科学院获构造地质专业博士学位。2001年至今在中国地质科学院地质力学所工作。2005年获山西省科学技术进步(自然科学类)二等奖(排名第四); 2006年入选国土资源部“创新人才工程”百人计划; 2008年获“马塔切纳青年优秀论文奖”和中国地球物理学会“傅承义青年科技奖”。公开发表论文30余篇。

主要从事晚新生代风成沉积和河湖相沉积的磁性地层学、岩石磁学和环境磁学研究。目前主要研究兴趣: 1) 风成堆积和河湖相沉积的剩磁获得机理和地磁极性转换记录的可靠性研究; 2) 东亚季风灵敏区高分辨率磁气候记录及其区域和全球变化响应; 3) 几万年来地磁场变化与古气候变化相关性调查研究。

专题介绍

^{10}Be —古地磁研究的新兴替代性指标

苏凯

在古地磁场相对强度变化的研究中, 对于传统的研究古地磁的替代性指标的有效性一直争议不断。火山岩覆盖的时空范围有限, 且难以精确测年, 制约着该研究方向的深入开展。沉积物剩磁的获得过程比较复杂, 可能受到成岩作用后期的重新排列或者改造的叠加影响, 磁性矿物的种类、粒度大小甚至气候环境等因素都影响沉积物所记录的地磁场强度的可靠性。新兴的宇宙成因核素的产生与地磁场变化有很好的相关关系, 较少受到成岩等作用的影响, 在未来对于古地磁场的研究势必会有更加广泛的应用。

1. ^{10}Be 示踪地磁场的原理

^{10}Be 主要是由高能宇宙射线与大气中的氧、氮或地表岩石中的石英发生散裂反应生成, 并被分别定义为大气成因和就地成因的 $^{10}\text{Be}^{\text{[1]}}$ 。 ^{10}Be 产生率直接正比于宇宙射线通量。太阳活动和地磁强度变化明显调制着进入地球大气圈的宇宙射线通量。进入大气圈的宇宙射线粒子在地磁场的屏蔽作用下发生偏转, 决定了宇宙成因核素 ^{10}Be 产率与地磁场强度变化之间具有反相关关系^[2], 即地磁场强屏蔽作用强时, 进入地球对流层和平流层的宇宙射线粒子流低, ^{10}Be 产率也随之降低, 反之亦然。在持续数千年的地磁倒转期间, 地磁场强度减小到其正常值的 10% 左右。在一些地磁漂移事件中可分别引起 ^{10}Be 产生率的 50% 的变化^[3]。因此通过测定沉积物中 ^{10}Be 浓度变化, 获得相应的 ^{10}Be 产率信息, 可有效重建古地磁场强度变化历史, 这点在冰芯、海洋沉积物 ^{10}Be 记录的示踪研究中已经得到了充分验证。

2. ^{10}Be 的样品处理

黄土样品化学前处理和加速器质谱 ^{10}Be 测量靶样制备的基本化学步骤为: HF 消化溶解, EDTA+乙酞丙酮+CCl₄ 萃取, 离子交换树脂柱和氨水-B₂(OH)₂ 沉淀纯化, 以及高温 1000℃ 灼烧转化成氧化铍。通过 AMS 测量 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 值实现的。由于 ^{10}Be

与 ^9Be 的化学性质基本相同, 实验过程中可能产生的同位素分馏并不足以达到加速器质谱的测量误差, 从而能够获得样品中的 ^{10}Be 浓度。海洋沉积物样品的 Be 同位素在烘干和粉碎后用 $0.04\text{M NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 和 25% 乙酸萃取。具体的方法 Bourles 等有详细介绍^[4]。

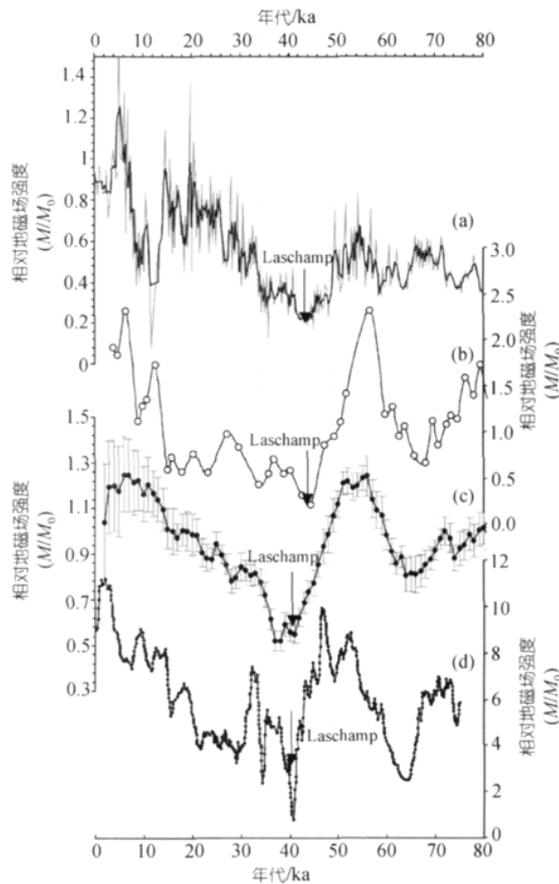


图 1 洛川黄土 ^{10}Be 重建的地磁场强度变化序列与全球不同区域记录的综合对比。(a) 黄土 ^{10}Be 重建结果; (b) 海洋沉积物剩磁记录的地磁场强度曲线; (c) SINT200 地磁场强度曲线; (d) NAPIS75 地磁场强度曲线

3. ^{10}Be 在黄土研究中的应用

3.1 风成沉积物中 ^{10}Be 的化学活动性

^{10}Be 主要以吸附状态赋存于粉尘沉积物粘粒矿物的表面, 部分已结合进自生的粘土矿物中。在粉尘沉积物风化过程中 ^{10}Be 与 ^9Be 和 Al 的活动性相似, 基本没有发生迁移, 其原因是连续沉积的粉尘含有大量的碱性物质, 阻止了 ^{10}Be 的解吸附和淋滤沉积和风化作用^[5]。

3.2 黄土中利用 ^{10}Be 记录重建古地磁场强度的方法

研究表明, 黄土中的 ^{10}Be 主要包括来源于风尘携带和就地上空生成两部分信号^[6], 由于季风降水

不均匀性和粉尘沉降效应的存在, 对地磁场变化部分信号产生了叠加影响^[7]。黄土 ^{10}Be 浓度 $\text{Be}(\text{M})$ 由降尘 $\text{Be}(\text{D})$ 、降雨 $\text{Be}(\text{P})$ 和受地磁场影响的产率 $\text{Be}(\text{GM})$ 3 部分组成, 怎样将微弱的地磁场信号分离出来是黄土中 ^{10}Be 研究的关键问题。采用 LGM 方法^[8]和新的转换方程在利用黄土 ^{10}Be 记录示踪和重建古地磁场强度研究中的实用意义及应用前景。通过研究表明来自粉尘源区的尘降 ^{10}Be 浓度和尘降磁化率具有“准恒定分布”特征。LGM 假设在末次盛冰期降雨量很少, 当时沉积到黄土高原的 ^{10}Be 信号主要是与粉尘通量相关的尘降信息, LGM 阶段的尘降 ^{10}Be 浓度 $\text{Be}(\text{D})$ 与粉尘通量的正相关关系^[9]。这部分信号通过 ^{10}Be 总浓度减去粉尘通量贡献部分, 再根据降水 ^{10}Be 浓度 $\text{Be}(\text{P})$ 和就地成壤磁化率 $\text{SUS}(\text{P})$ 两者都与降水量线性相关, 这样就可以分离出地磁场变化部分引起的 ^{10}Be 浓度变化量。一些学者利用 LGM 方法建立了洛川黄土剖面最近 80 ka 古地磁场强度历史^[10], 曲线无论在细节、还是趋势上与全球典型地磁场强度曲线具有同步变化的特征(见图 1)。然而季风降水的不均匀性决定黄土 ^{10}Be 无法直接显示地磁场变化调制信号。所以黄土 ^{10}Be 无法像海洋和冰芯沉积物 ^{10}Be 记录那样直接指示古地磁场事件, 复杂的叠加作用也使得 ^{10}Be 在黄土中的运用遭受质疑。

4. ^{10}Be 在海洋沉积物古地磁研究中的应用

^{10}Be 在大气圈产生后, 很快被气溶胶吸附, 通过降水沉降至地表和海洋。进入海洋的 ^{10}Be 大部分被生物成因的有机质及含钙有机体等微粒物质吸附并沉积到深海。随着钙质有机质在深海的溶解, 部分 ^{10}Be 被释放并溶解于海水。海水悬浮粒子捕集实验表明, 粒子 ^{10}Be 通量和浓度随深度增加而增加。锰结核从海水吸收 ^{10}Be , 并以氧化物相固定下来。据研究如果沉积速率太低, 地磁倒转所引起的 ^{10}Be 浓度变化就可能被生物扰动抵消。此外, 沉积物矿物组成变化、陆源物质污染以及海洋传输沉积模式变化等都可能对沉积物浓度变化有所影响^[11]。因此研究海洋沉积物记录的 ^{10}Be 变化时, 取样时应该选择远离陆源物质输入、沉积速率相对较高、沉积连续性好的地区, 以保证沉积记录的可靠性^[3]。

海洋沉积物中 ^{10}Be 浓度不仅与 Be 的产率有关, 还与影响沉积物化学组成和粒度组成的环境因素有关。其中尤为显著的特点是: ^{10}Be 与沉积物中碳酸盐组成成反比, 与沉降粒子的比表面积成正比。这表明, 研究 ^{10}Be 的绝对浓度是毫无意义的。由于 ^{10}Be 与 ^9Be 具有相似的化学性质但非同源^[12], ^{10}Be

在大气中产生并以溶解形式输入海洋^[13], ^9Be 少量溶于陆源碎屑一起进入海洋。两种同位素溶解部分在沉积物沉积下来之前均匀混合。这就为我们提供了一种均一化的手段, 大量研究都证明 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 是合适的大气 Be 产量的替代性指标。

深海沉积物中 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 曲线与深海有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有明显的正相关关系^[14, 15], $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与深海沉积物中磁化方向记录、洋底玄武岩磁性异常记录和冰芯中宇宙成因核素的产率证实了地球偶极子场的减弱发生在间冰期结束阶段^[16, 17]。

在现今的海洋沉积物研究中, 宇宙成因核素 ^{10}Be 记录和传统的古地磁记录通常一起用来讨论古地磁场的变化。与其他沉积剩磁不同, 自生成因的 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 记录磁偶极矩变化时具有较好的瞬时性, 没有明显的滞后, 这对时限的界定具有重要的意义^[18]。宇宙成因核素由于其独特的性质可以提供更高的分辨率和更精确的时间界限, 可以为全球研究资料提供一个重要的对比手段。是传统古地磁学方法的重要补充。

Carcaillet JT^[3]等研究在 0.6-1.3Ma 晚松山、早布容期地磁场发生频繁的周期性磁漂移, 并识别出两次松山-布容转向的先导事件和一次内 Jaramillo 事件。在极性漂移期、极性倒转期或者些许滞后的时间段内 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 剧增。通过宇宙成因核素的独立测定, 也证实了相对古地磁强度记录的可靠性, 证实在布容-松山转向期经历了转换前的极性漂移事件, 记录有两次 VDM 低谷, 转向后又经历了快速的回弹。Leduc G 等应用此方法研究拉尚漂移期自生 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 信号(图 2), 并希望能建立一个精确的时限, 对全球古气候资料进行同步^[19]。

Nicolas T 等^[16]在研究葡萄牙陆架边缘沉积物时讨论了传统古地磁学方法的适用性, 详细论述了沉积物中记录的古地磁参数如岩石磁化率 χ_r 、等温剩磁 ARM 和非磁滞剩磁 ARM 对天然剩磁 NRM 进行归一化的方法, 并据此研究自 400Kyr 以来的相对古强度 RPI 的变化。识别出了四次 RPI 的地磁漂移事件, 分别对应 Laschamp 漂移 (42 kyr BP)、Blake 事件(115-122 kyr BP)、Icelandic basin 漂移 (190 kyr BP)和定名为“Portuguese margin”的极性漂移事件, 四次事件都对应着相对古强度的降低, 另外在 Jamaica/Pringle Falls、Mamaku、Calabrian Ridge 1 和 Levantine 极性漂移时期记录有四次非漂移性的 RPI 低值。RPI 记录显示了 100Kyr 左右的周期性, 而且古地磁场强度低的时期常对应间冰期结束阶段。在葡萄牙陆架边缘的研究中 Nicolas Thouveny 等的工作为研究区域自生成因的 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 沉积序列

的建立打下了基础^[18]。在上述的八个时期 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 都明显增加, 对应地磁极矩的减小(图 3)。通过两项工作的仔细对比, 考虑到环境因素对于自生成因 ^{10}Be 浓度的影响, 现今最可靠的宇宙成因核素产率的指标就是 ^{10}Be 和 ^9Be 比率。

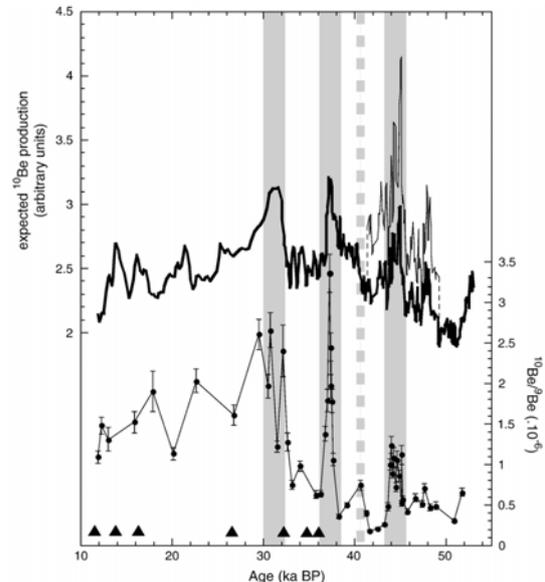


图 2 (据 Leduc, G 等) ^{10}Be 产率的期望变化曲线和实测自生成因 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 曲线, 横坐标是时间轴。 ^{10}Be 产率的期望值^[20]中细线代表未经 RPI 值校正曲线, 粗线代表校正后的曲线^[21]。灰色区域代表三次 RPI 低值以及对应的 ^{10}Be 产率增加期。灰色的虚线代表 Laschamp 漂移。黑色三角对应 ^{14}C AMS 测定的年龄。

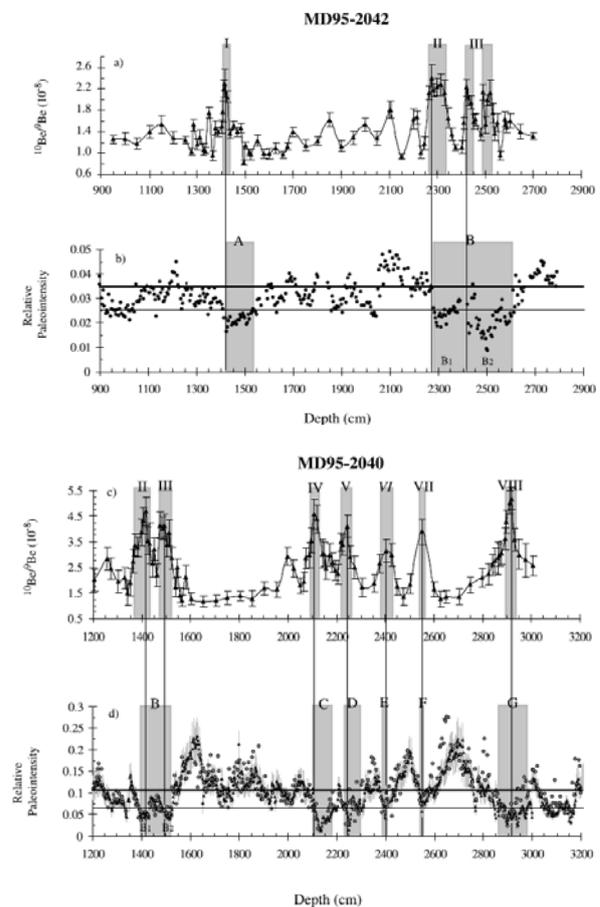


图 3 (据 Carcaillet, J.等): $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 记录和 RPI 记录的比较。(a) MD95-2042 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比率(10^{-8}) (b) MD95-2042 RPI; 黑线代表平均值, 细线代表平均值-1 σ 。(c) MD95-2040 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比率 (10^{-8})。 (d) MD95-2040 RPIs。

参考文献:

- 1 Lal, D., In situ-produced cosmogenic isotopes in terrestrial rocks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1988. 16: p. 355-388.
- 2 Masarik, J. and J. Beer, Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1999. 104(D10): p. 12,099-111.
- 3 Carcaillet, J.T., N. Thouveny, and D.L. Bourles, Geomagnetic moment instability between 0.6 and 1.3 Ma from cosmonuclide evidence. *Geophys. Res. Lett*, 2003. 30(15): p. 1792.
- 4 Bourles, D., G. Raisbeck, and F. Yiou, ^{10}Be and ^9Be in marine sediments and their potential for dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989. 53(2): p. 443-452.
- 5 顾兆炎 and D. Lai, 黄土高原黄土和红粘土 ^{10}Be 地球化学特征. *第四纪研究*, 2000. 20 (005): p. 409-422.
- 6 顾兆炎, et al., 黄土和红粘土中宇宙成因核素定年的潜力: ^{10}Be 浓度与化学成分的关系. *第四纪研究*, 2006. 26 (002): p. 244-249.
- 7 周卫健, et al., 多变量线性回归的平均值概念及其在地学研究中的应用. *中国科学 D 辑*, 2007. 37(10): p. 1392-1399.
- 8 Zhisheng, A., et al., The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990. 7: p. 91-95.
- 9 Feng, X., The Study of the Date Analysis for the Past 80ka Paleo-Geomagnetic Field Tracing and Paleoprecipitation Reconstruction from ^{10}Be in Loess of China. 2007, Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007.[鲜锋. 运用黄土 ^{10}Be 记录重建最近 80 ka 古地磁场强度和季风降水的数理方法北京: 中国科学院研究生院.
- 10 鲜锋, et al., ^{10}Be 产率-地磁场转换方程的建立及其在黄土研究中的应用. *中国科学: D 辑*, 2008. 38(004): p. 463-470.
- 11 沈承德, 深海沉积物 ^{10}Be 记录研究. *第四纪研究*, 1997(003): p. 203-210.
- 12 Brown, E.T., et al., Continental inputs of beryllium to the oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992. 114(1): p. 101-111.
- 13 Rama, R. and P. Zutschi, Annual deposition of cosmic ray produced ^{7}Be at equatorial latitudes. *Tellus*, 1958. 10: p. 99-103.
- 14 Yiou, F., et al., ^{10}Be in ice at Vostok Antarctica during the last climatic cycle. 1985.
- 15 Raisbeck, G., et al., Evidence for two intervals of enhanced ^{10}Be deposition in Antarctic ice during the last glacial period. 1987.
- 16 Thouveny, N., et al., Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP: a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004. 219(3-4): p. 377-396.
- 17 Thouveny, N., et al., Paleoclimatic context of geomagnetic dipole lows and excursions in the Brunhes, clue for an orbital influence on the geodynamo? *Earth and Planetary Science Letters*, 2008. 275 (3-4): p. 269-284.
- 18 Carcaillet, J., et al., A high resolution authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ record of geomagnetic moment variations over the last 300 ka from sedimentary cores of the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004. 219(3-4): p. 397-412.
- 19 Leduc, G., et al., Authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ signature of the Laschamp excursion: a tool for global synchronisation of paleoclimatic archives. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006. 245 (1-2): p. 19-28.
- 20 Lal, D., Expected secular variations in the global terrestrial production rate of radiocarbon. *NATO ASI Series*, 1992. 12: p. 113-126.
- 21 Blanchet, C.L., N. Thouveny, and T. de Garidel-Thoron, Evidence for multiple paleomagnetic intensity lows between 30 and 50 ka BP from a western Equatorial Pacific sedimentary sequence. *Quaternary Science Reviews*, 2006. 25(9-10): p. 1039-1052.

重点连载

本文将在 2012 第四期《第四纪研究》上发表

趋磁细菌多样性及其环境意义

林 巍, 潘永信

摘要 趋磁细菌是一类特殊的微生物, 它们在体内合成有生物膜包裹、粒度均一 (35~120 nm)、结晶程度高、晶形特殊、呈链状排列的磁小体, 其化学成分主要是磁铁矿 (Fe_3O_4) 或胶黄铁矿 (Fe_3S_4), 因此, 它们能沿地磁场磁力线定向游弋。研究表明, 趋磁细菌广泛分布在淡水和海洋环境中, 细胞数量可达 $10^5\sim 10^7$ 个/ml, 其多样性和地理分布与环境有密切关系。磁小体在趋磁细菌死后可以保存在沉积物中, 化石磁小体对沉积物磁学性质有重要贡献, 而且趋磁细菌活动在全球铁元素循环和维持生态系统功能等方面发挥重要作用。本文综述了近年来趋磁细菌多样性、地理分布格局、环境磁学以及古环境重建等方面的研究进展。值得指出的是, 化石磁小体可作为重构古环境的生物标志物, 应予以重视。

生命的生存及演化与环境息息相关, 环境的变迁往往能够引起生物生理活动、种群数量和群落结构发生改变。一些重大地质事件常伴随着生物种群数量和多样性的剧烈变化, 体现了环境对生物演化的制约作用。因此, 地质历史时期保存下来的生物化石、生物成因的矿物和各种标志化合物是用来研究古环境变化的理想材料^[1-3]。

趋磁细菌发现于 20 世纪 60~70 年代, 是一类能沿地磁场磁力线方向运动的微生物的总称, 它们在体内合成磁铁矿 (Fe_3O_4) 或胶黄铁矿 (Fe_3S_4) 磁小体, 多呈链状排列, 因而能感知地磁场 (见图 1)。近年研究发现, 趋磁细菌广泛分布在淡水和海洋环境中^[9], 自然界中趋磁细菌的分布和群落结构与其生存环境有密切关系^[4, 10, 11]。值得指出的是, 趋磁细菌具有趋磁运动的特点, 较其他微生物更易于从自然界中富集纯化, 这为利用它们指示环境变化提供了独特的便利条件^[12]。另外, 磁小体在细菌死后可以长期保存在沉积物或沉积岩石中, 形成化石磁小体^[13]。磁小体具有独特形貌、均一尺寸和链状排列等特点, 沉积物中的化石磁小体可以通过电子显微学、岩石磁学和古地磁学等手段进行检测^[12]。因

此, 化石磁小体是记录古气候和古环境信息的理想载体。化石磁小体在新生代至白垩纪都有发现^[14], 而有一些甚至可以追溯到元古代^[15]。利用化石磁小体重构古环境的研究思路是, 建立现代趋磁细菌与环境的关系, 再根据化石磁小体的数量、种类和形状等信息反推当时趋磁细菌的数量和多样性, 进而根据趋磁细菌群落与环境的关系来恢复当时的古气候和古环境^[1, 13]。可见, 深入认识现代趋磁细菌多样性及其与生存环境的关系是利用化石磁小体重建古环境的重要基础。

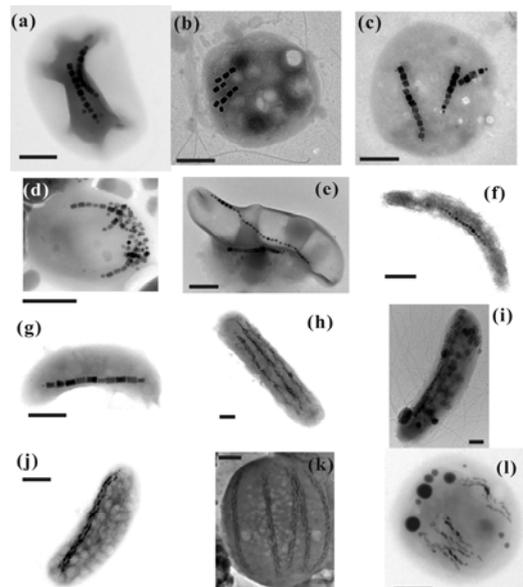


图 1 北京地区代表性趋磁细菌的透射电子显微镜照片 (图中标尺为 500 nm)。修改自文献^[4-8]及本实验室未发表数据

近年来, 趋磁细菌多样性与环境研究取得了一系列进展, 本文综述这些研究成果, 为进一步利用趋磁细菌及其磁小体恢复古环境提供参考。

1. 趋磁细菌的趋磁性与磁小体合成

趋磁细菌广泛分布在湖泊和海洋的水体和沉积物环境中, 目前已发现的趋磁细菌几乎都是微好氧或厌氧菌, 主要生活在淡水和海洋的有氧-无氧过渡带中^[9]。绝大多数趋磁细菌在北半球沿着磁力线方向运动, 在南半球却逆着磁力线运动, 而在赤道附近上述两类细菌均有发现^[16, 17]。由于地磁场的磁力线方向在南半球倾斜向上、在北半球倾斜向下, 因此, 趋磁细菌能借助磁力线方向并结合其他趋化功能在环境中快速有效地定位到低氧或无氧环境^[18]。已知趋磁细菌的游泳速度可达到每秒数百微米^[19, 20]。

随着分子生物学和基因组学的发展,趋磁细菌合成磁小体的生物矿化机理取得重要突破。已知磁小体的矿化过程大致可以分为 4 个阶段:1) 磁小体膜形成;2) 磁小体蛋白质定位到磁小体膜上;3) 磁小体膜链状排列;4) 磁小体晶体形成并成熟^[21~23]。总的来说,磁小体的矿化是由一系列蛋白质精确调控,而编码这些蛋白质的基因大都集中位于趋磁细菌基因组的一个基因大片段中,称为磁小体岛^[22]。磁小体岛结构在不同种类趋磁细菌的基因组中都有发现,推测它们可能通过水平基因转移的方式在不同趋磁细菌中传递^[24, 25]。

在自然界中,趋磁细菌的数量可达 $10^5\sim 10^7$ 个/ cm^3 ^[10],由于单个趋磁细菌细胞内含铁量可达细胞干重的 2%~4%,约合 $10^{-13}\sim 10^{-15}$ g/细胞,比普通细菌的含铁量高出 100 多倍,因此趋磁细菌在自然界铁元素循环中起着重要作用^[26]。有报道称在海洋的一些特定区域,趋磁细菌对铁元素循环的贡献甚至可以达到 10%^[10]。此外,部分趋磁细菌可以在体内储存中间态的硫 (S^0) 并将其作为电子供体^[27, 28],同时还有相当一部份趋磁细菌可以在体内聚集大量硫元素用于合成胶黄铁矿磁小体。因此,趋磁细菌在硫元素循环中也发挥作用。由于磁小体是稳定的单畴磁铁矿或胶黄铁矿颗粒,它们对沉积物的天然剩磁也具有重要贡献^[29, 30]。

2. 趋磁细菌多样性

2.1 系统发育多样性

研究趋磁细菌多样性是认识自然界微生物多样性的重要内容。由于绝大多数趋磁细菌目前仍不能实现实验室纯培养,对自然界中趋磁细菌的多样性认识较浅。趋磁细菌不是一个分类学单位,它包括位于不同系统发育分支的多类细菌。早期的多样性研究主要基于趋磁细菌的表型特征,如利用细胞形态、鞭毛、磁小体成分、磁小体形状和磁小体的排列方式等特点来划分不同种类^[31~36]。但这种基于表型的分类方法比较粗糙。20 世纪 80 年代以来,随着分子生物学的发展,基于 16S rRNA 基因的系统发育分析方法逐渐成为微生物多样性研究的“黄金方法”^[37]。近年来,我们通过磁富集、PCR 扩增和设计特异性分子探针等手段,研究了中国湖泊中趋磁细菌的多样性^[4~8, 19]。根据 16S rRNA 基因的分析结果,结合国外研究成果,目前已知的趋磁细菌全部分布在变形菌门 (*Proteobacteria* phylum)、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae* phylum) 和暂定分类单元 candidate division OP3 (图 2)。下面对每个分类单元进行简单叙述。

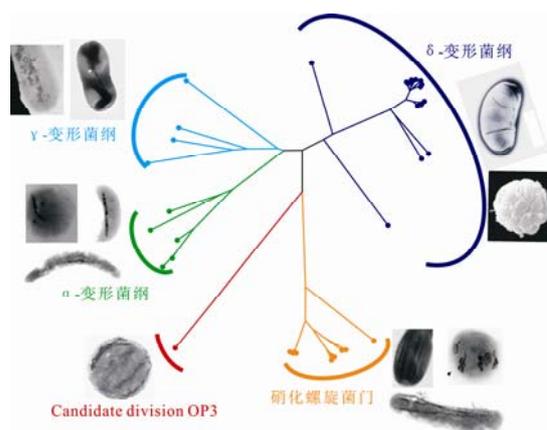


图 2 代表性趋磁细菌的系统发育树。其中趋磁细菌电子显微镜照片来源于文献^[5, 6, 8, 38~42]和本实验室未发表数据

2.1.1 变形菌门

变形菌门是细菌数量最多的原核生物类群之一,它包含至少 200 多个不同属 (genus) 的细菌,是革兰氏阴性细菌的主要组成部分^[43]。变形菌门可以进一步细分为 α -、 β -、 γ -、 δ -和 ϵ -变形菌纲,而已知的趋磁细菌主要分布在 α -、 γ -和 δ -变形菌纲 (图 2)。

绝大多数已发现的趋磁细菌都属于 α -变形菌纲^[44]。这类微生物分布广泛,在美国、德国、瑞典、法国和巴西等国的许多淡水和咸水的湖泊沉积物中^[24, 28, 38, 45~52],以及中国北京、海南、山东、西安等地的淡水和海洋沉积物中^[4, 6~8, 53~55]都发现了大量 α -变形菌纲趋磁细菌。这些细菌形态多样,以球菌居多,但也包括螺旋菌、杆菌和弧菌等类型。目前已知的所有 α -变形菌纲趋磁细菌均合成磁铁矿磁小体,已在实验室成功培养的趋磁细菌也以该类群居多。

γ -变形菌纲趋磁细菌最初由 Simmons 等^[38]在美国的咸水湖中发现,这类杆菌在体内形成无规则形状的胶黄铁矿磁小体。最近, Lefèvre 等^[39]又发现两类产磁铁矿磁小体的趋磁杆菌也属于 γ -变形菌纲,并在实验室初步富集了这两类细菌。 γ -变形菌纲的趋磁细菌目前只在美国有发现,它们是否普遍存在于其他国家和地区还有待进一步研究。

δ -变形菌纲趋磁细菌的多样性较高,主要包括产磁铁矿磁小体的硫酸盐还原菌 *Desulfovibrio magneticus* strain RS-1^[56~58]、一类哑铃状的趋磁细菌^[59]和多种特殊的多细胞趋磁原核生物^[41, 60~64]。多细胞趋磁原核生物的直径通常为 5~10 μm ,一般由 10~30 个细胞有机组成,每个细胞中均含有链状排列的磁铁矿或胶黄铁矿磁小体,这类细菌分布广泛,

在巴西、德国、美国和中国等地均有发现^[64-66]。最近, 我们研究组在西安地区发现了多个类群的趋磁细菌也属于 δ -变形菌纲 (未发表数据)。可以推测, δ -变形菌纲趋磁细菌的多样性可能远高于原先估计。

2.1.2 硝化螺旋菌门

硝化螺旋菌门趋磁细菌最早由 Vali 等^[32]和 Spring 等^[46]在德国基姆湖中发现, 这是一类大杆菌, 细胞长度可以达 8~10 μm , 在体内合成上千个子弹头形状的磁铁矿磁小体, 是目前已知最大的趋磁细菌之一。由于基姆湖处于德国巴伐利亚地区 (Bavaria), 因此这类趋磁细菌被命名为 “*Candidatus Magnetobacterium bavaricum*”。在随后相当长时间内, 该类趋磁细菌并未在其他地区发现, 因此人们一度认为 “*Ca. Magnetobacterium bavaricum*” 是仅有的硝化螺旋菌门趋磁细菌。直到 2005 年以后, 属于硝化螺旋菌门的趋磁细菌相继在中国和美国发现, 说明该类细菌分布非常广泛^[4, 5, 8, 19, 48, 67-69]。通过对已知硝化螺旋菌门趋磁细菌进行系统进化分析发现, 这些趋磁细菌在系统发育树上分别属于 4 个进化分支, 具有很高的多样性, 它们的共同特征是均含有子弹头状的磁铁矿磁小体^[19]。硝化螺旋菌门趋磁细菌在一些沉积物的特定层位中数量较高, 且部分细菌体内可以合成数百个磁小体, 因此对沉积物的磁学性质有重要贡献^[29, 30, 70]。最近, 我们的研究发现, 一类硝化螺旋菌门趋磁细菌对表层沉积物天然剩磁的贡献显著^[19]。此外, 硝化螺旋菌门的趋磁细菌在进化上属于较古老的微生物, 因此是研究趋磁细菌起源和演化的理想对象。

2.1.3 Candidate division OP3

最近, Kolinko 等^[40]在德国基姆湖发现了一类卵球形趋磁细菌, 它们在体内合成约 175 个子弹头形状的磁铁矿磁小体, 在外形上与硝化螺旋菌门的一类细菌非常相似 (图 2)。但是, 通过单细胞分选和系统发育分析, 他们发现这类细菌属于一个暂定分类单元 candidate division OP3。该项发现具有两个重要意义: 一是首次在变形菌门和硝化螺旋菌门之外的其他分类单元中发现趋磁细菌; 二是首次观察到属于 candidate division OP3 的细菌, 在这之前该分类单元中的微生物仅有 DNA 序列信息, 尚无人真正观察到这些微生物。

2.2 磁小体多样性

磁小体是所有趋磁细菌所共有的最重要基本特征, 它们通过细胞精细调控合成, 因此同一种类趋

磁细菌合成的磁小体基本一致。趋磁细菌的磁铁矿磁小体主要分为立方八面体、六面体棱柱和子弹头形状 (图 3)。从目前已知的趋磁细菌来看, 磁铁矿立方八面体磁小体主要属于 α -变形菌纲磁螺菌属趋磁细菌 (*Magnetospirillum*) 和 γ -变形菌纲的一类趋磁杆菌中^[39]; 属于 α -变形菌纲的趋磁球菌、弧菌、杆菌以及 γ -变形菌纲的一类趋磁杆菌则合成磁铁矿六面体棱柱磁小体; 产磁铁矿子弹头状磁小体的趋磁细菌则主要位于 δ -变形菌纲、硝化螺旋菌门和 candidate division OP3 趋磁细菌。胶黄铁矿磁小体主要有子弹头状和不规则形状两种, 前者在 δ -变形菌纲多细胞趋磁原核生物中有发现, 后者在 γ -和 δ -变形菌纲中都有发现 (图 3)。由此可见, 磁小体的成分和形状可在一定程度上反映产生该磁小体趋磁细菌的分类地位, 因此利用化石磁小体在较高的分类水平上反演趋磁细菌的多样性是可行的。

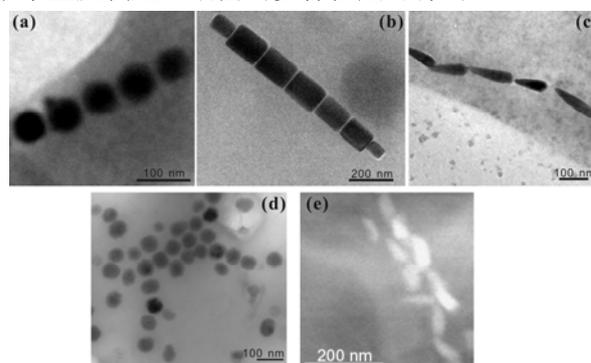


图 3 趋磁细菌磁小体的主要类型。(a)~(c) 为磁铁矿磁小体, (d)和(e)为胶黄铁矿磁小体。(a) 立方八面体, (b) 六面体棱柱, (c)和(e) 子弹头状, (d) 不规则形状。(d)和(e)修改自文献^[41, 71]

3. 趋磁细菌分布与环境的关系

3.1 全球尺度分布

众所周知, 高等的动植物种群具有一定的分布格局, 全球不同的地理环境分布带中都有其独特的代表性动植物类群。由于微生物数量巨大、传代时间短和传播速度快, 19 世纪末期以来人们一度认为微生物在世界范围均一分布, 即 “Everything is everywhere” (EiE 假说), 由此认为微生物没有地理分布格局^[72]。但是随着分子生态学的日趋成熟, 越来越多的研究表明微生物在全球不是随机分布, 而是同动植物类似具有一定的地理分布格局。微生物的多样性和分布与其生存环境具有密切关系, 各种环境因素, 如纬度、温度、盐度、pH 值和营养成分等都可能对微生物分布产生影响^[73]。如上所述, 趋磁细菌具有分布广泛、多样性丰富和易于磁收集等

特点, 它们是否能作为微生物地理分布理论和环境指示研究的模式生物?

目前, 趋磁细菌在中国、美国、欧洲、日本和巴西等国都有发现(图 4)。这些地点不仅包括常见的淡水和咸水湖泊, 还包括泻湖、玛珥湖、热泉、深海等特殊环境^[4, 74, 75]。



图 4 趋磁细菌全球分布图。数据主要来自趋磁细菌数据库(Database of Magnetotactic Bacteria)^[74]、Geographic-BLAST^[76]、文献^[36, 52, 77]和本实验室的未发表数据

我们对北京、山东和海南等地淡水和咸水沉积物中趋磁细菌的分布和多样性进行了系统研究, 并将我国的趋磁细菌多样性与德国、巴西等国已发表的结果进行比较和统计分析, 在全球尺度上研究趋磁细菌的分布^[4]。结果表明, α -变形菌纲趋磁细菌普遍存在于淡水和咸水沉积物中, 在已知绝大多数生境中为优势种群; 淡水趋磁细菌的形态多样性较咸水趋磁细菌丰富。通过系统发育和生物统计分析发现趋磁细菌不仅在全球范围具有一定的分布格局, 而且其群落结构的系统发育相似性与水体盐度显著正相关(Spearman's $\rho=0.619$, $P<0.05$), 说明盐度可能是造成趋磁细菌分布差异和多样性变化的主要控制因子(图 5)。这些结果支持著名的“Everything is everywhere, but, the environment selects”微生物生态学假说^[4], 即趋磁细菌为全球性分布, 其分布格局受到当地环境因子的制约。鉴于趋磁细菌的全球分布与水体盐度有密切关系, 其群落结构或可作为潜在的“古盐度计”^[4]。

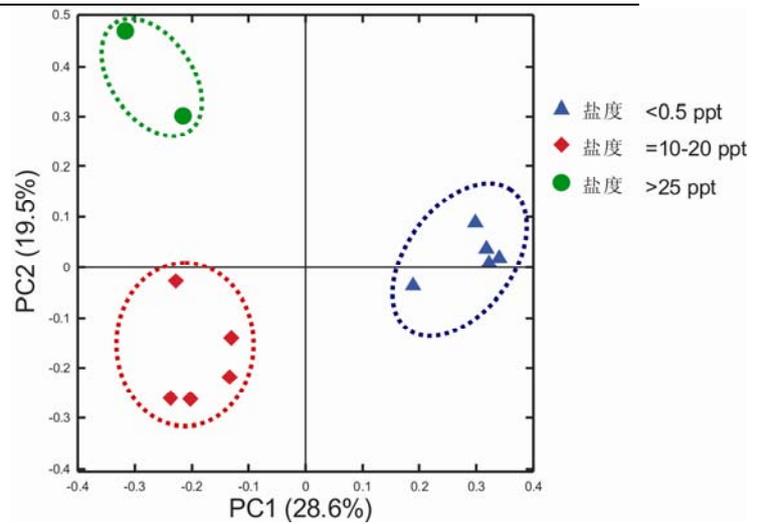


图 5 中国、德国和巴西不同环境中趋磁细菌系统发育的主坐标分析。由图可见趋磁细菌的群落多样性与盐度明显相关, 修改自文献^[4]

3.2 区域尺度分布

区域尺度上趋磁细菌的垂直分布已有较多研究。例如, Petermann 和 Bleil^[77]发现氧气、硝酸盐或其他氮氧化物可能在深海和半深海趋磁细菌的垂直分布中起重要作用。Simmons 等^[38]发现不同种类趋磁细菌在咸水湖有氧-无氧过渡带中分层共存: 产磁铁矿磁小体的 α -变形菌纲趋磁球菌和 δ -变形菌纲趋磁细菌位于有氧-无氧过渡带的上部, 而合成胶黄铁矿的 δ -变形菌纲多细胞趋磁细菌和属于 γ -变形菌纲的趋磁大杆菌则分布在过渡带下部。淡水趋磁细菌也有一定的垂直分布, 这种分布可能与周围微环境的一些物理化学因素有关^[48-50]。但是, 目前对较小尺度上(如同一湖泊中)不同地点趋磁细菌的分布只有少数研究, 其分布机制尚不清楚。

最近, 我们对采集自北京密云水库中两个不同地点的沉积物样品进行了实验室连续观察, 并对其趋磁细菌的群落结构进行了比较, 发现趋磁细菌的多样性随采集地点和保存时间均发生变化, 但同一地点趋磁细菌的群落结构较同一收集时间不同采集地点的细菌群落具有更高的相似性^[67]。进一步分析趋磁细菌群落间差异与其生存环境物理化学因子的关系发现, 密云水库沉积物孔隙水中硝酸盐的含量对趋磁细菌的小尺度区域分布有重要影响^[67]。

除硝酸盐外, 温度也可能影响趋磁细菌的群落结构^[78]。将来源于同一地点的沉积物样品在实验室置于不同温度下(9°C, 15°C, 26°C 和 37°C)保存约一个月发现, 9~26°C 样品中趋磁细菌的群落结构非常相似, 而 37°C 下趋磁细菌的多样性有明显差异, 样品中趋磁细菌的数量也显著降低, 说明在较高温

度下趋磁细菌多样性和数量均发生明显变化。值得特别指出的是,通过对可培养趋磁细菌磁小体进行同位素分析, Mandernack 等^[79]发现磁铁矿磁小体中氧同位素可以指示趋磁细菌生长的环境温度。这些研究表明,化石磁小体可能作为重构趋磁细菌生存环境古温度的重要对象。

4. 古环境研究应用

化石磁小体在许多海洋沉积物和湖泊沉积物中都有发现^[13, 80, 81]。综合利用电子显微镜观察、岩石磁学分析、古地磁学和铁磁共振光谱等方法可以识别沉积物中的化石磁小体,为有效提取当中所携带的古环境信息提供了可能^[13, 82, 83]。但由于有效识别沉积物或岩石中化石磁小体仍较为困难,这方面最近才取得了一些进展。Kopp 等^[84]对美国新泽西州大西洋海岸平原沉积物中的磁小体化石进行研究,发现化石磁小体不仅对该地区古新世-始新世高岭土层的磁学性质有重要贡献,且化石磁小体数量的变化可能与古新世-始新世极热事件有关。Abrajevitch 等^[85]通过岩石磁学方法在三叠纪-侏罗纪层状燧石的红燧石间隔层中发现了许多疑似化石磁小体来源的磁铁矿磁性矿物,他们认为这些含有化石磁小体的红燧石间隔层可以作为认识前中生代古海洋环境的理想研究对象。Roberts 等^[80]最近对南大洋远洋沉积物中化石磁小体的研究表明化石磁小体的数量与粉尘通量、有机碳含量密切相关,沉积物中溶解铁含量也可能是制约化石磁小体数量的一个重要因素。

除了化石磁小体,沉积物中保存下来的趋磁细菌古 DNA 也可能在古环境恢复中具有重要研究价值。一般来说,由于水解作用和氧化作用,生物体的 DNA 在较短时间内就会降解^[86]。但是一些特殊环境,如低温、干燥、弱碱性和厌氧环境等可以有效延长 DNA 的保存时间^[86, 87],这些古 DNA 序列信息为研究古代微生物群落多样性提供了最直接的分子证据。如前面所述,水体的盐度、硝酸盐浓度和温度等理化因子可以影响趋磁细菌的分布、多样性和数量,因此利用古 DNA 研究古代趋磁细菌的群落结构可以为反演当时的环境信息提供重要参考。沉积物中保存下来的古 DNA 往往是来源于多种生物的混合物,如何排除后期污染、有效提取古老趋磁细菌的信息无疑是利用古 DNA 研究趋磁细菌群落的难点。解决这一问题的关键是设计出针对趋磁细菌的特异性引物。最近,我们实验室成功设计了针对淡水 α -变形菌纲趋磁球菌类群的特异性引物^[6]。由于趋磁球菌是自然界中数量最多、分布最广

的一类趋磁细菌,因此该类群特异性引物的构建对提取古 DNA 中趋磁细菌的多样性信息具有重要意义。

5. 结论与展望

趋磁细菌在湖泊、海洋及其沉积物环境中广泛存在,它们多样性丰富,在系统发育上分别属于变形菌门、硝化螺旋菌门和暂定分类单元 candidate division OP3。趋磁细菌的分布受到环境因子,如盐度、硝酸盐和温度等制约。趋磁细菌不仅对全球铁元素循环和沉积物磁性等有重要贡献,而且对其多样性的研究也为认识现代微生物地理分布理论和恢复古环境提供了新思路。化石磁小体或可作为一种新型的生物标志物,通过与其他一些生物标志化合物(如类脂物等)相结合,在古环境重建中发挥重要作用。

沉积物或岩石中化石磁小体的有效识别是目前面临的重要课题。单畴颗粒和链状排列是其岩石磁学识别的关键性标志,化石磁小体的电子显微学和同位素地球化学研究也极具潜力。这些都是环境磁学、沉积磁学和古地磁学研究的新内容。

趋磁细菌与环境的研究方兴未艾,还有诸多问题需要思考。如现代趋磁细菌的分布是否也受到地质事件的影响?海洋和淡水趋磁细菌是如何分化的?化石磁小体的最佳保存条件?如何有效利用化石磁小体重构古环境?等等。

参考文献:

- 1 潘永信,邓成龙,刘青松等. 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, 2004, 49(24): 2505~2510
Pan Y, Deng C, Liu Q *et al.* Biomineralization and magnetism of bacterial magnetosomes. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2563~2568
- 2 邓涛. 临夏盆地晚新生代哺乳动物的多样性变化及其对气候环境背景响应. 第四纪研究, 2011, 31(4): 577~588
Deng T. Diversity variations of the late Cenozoic mammals in the Linxia Basin and their response to the climatic and environmental backgrounds. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(4): 577~588
- 3 傅家谟,盛国英. 分子有机地球化学与古气候、古环境研究. 第四纪研究, 1992, 4(11): 306~320
Fu J, Sheng G. Molecular organic geochemistry and its application to the study of paleoclimate and paleoenvironments. *Quaternary Sciences*, 1992, 4(11): 306~320

- 4 Lin W, Wang Y, Li B *et al.* A biogeographic distribution of magnetotactic bacteria influenced by salinity. *The ISME Journal*, 2012, 6(2): 475~479
- 5 Lin W, Jogler C, Schüler D *et al.* Metagenomic analysis reveals unexpected subgenomic diversity of magnetotactic bacteria within the Phylum *Nitrospirae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(1): 323~326
- 6 Lin W, Pan Y. Specific primers for the detection of freshwater alphaproteobacterial magnetotactic cocci. *International Microbiology*, 2009, 12(4): 237~242
- 7 Lin W, Pan Y. Uncultivated magnetotactic cocci from Yuandadu park in Beijing, China. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(12): 4046~4052
- 8 Lin W, Li J, Schüler D *et al.* Diversity analysis of magnetotactic bacteria in Lake Miyun, northern China, by restriction fragment length polymorphism. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, 32(5): 342~350
- 9 Bazylinski D A, Frankel R B. Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology*, 2004, 2(3): 217~230
- 10 Faivre D, Schüler D. Magnetotactic bacteria and magnetosomes. *Chemical Reviews*, 2008, 108(11): 4875~4898
- 11 Simmons S L, Edwards K J. Geobiology of magnetotactic bacteria, in: D Schüler, ed. *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*. Berlin: Springer, 2007. pp. 77~102.
- 12 潘永信, 朱日祥. 生物地球物理学的产生与研究进展. *科学通报*, 2011, 56(17): 1335~1344
Pan Y, Zhu R. A review of biogeophysics: The establishment of a new discipline and recent progress. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(17): 1335~1344
- 13 Kopp R E, Kirschvink J L. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria. *Earth-Science Reviews*, 2008, 86(1~4): 42~61
- 14 Hounslow M W, Maher B A. Quantitative extraction and analysis of carriers of magnetization in sediments. *Geophysical Journal International*, 1996, 124(1): 57~74
- 15 Chang S B R, Kirschvink J L. Magnetofossils, the magnetization of sediments, and the evolution of magnetite biomineralization. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1989, 17(1): 169~195
- 16 Blakemore R P, Frankel R B, Kalmijn A J. South-seeking magnetotactic bacteria in the southern-hemisphere. *Nature*, 1980, 286(5771): 384~385
- 17 Frankel R B, Blakemore R P, Dearaujo F F T *et al.* Magnetotactic bacteria at the geomagnetic equator. *Science*, 1981, 212(4500): 1269~1270
- 18 Frankel R B, Bazylinski D A, Johnson M S *et al.* Magneto-aerotaxis in marine coccoid bacteria. *Biophysical Journal*, 1997, 73(2): 994~1000
- 19 Lin W, Li J, Pan Y. Newly isolated but uncultivated magnetotactic bacterium of the phylum *Nitrospirae* from Beijing, China. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(3): 668~675
- 20 Pan Y, Lin W, Li J *et al.* Reduced efficiency of magnetotaxis in magnetotactic coccoid bacteria in higher than geomagnetic fields. *Biophysical Journal*, 2009, 97(4): 986~991
- 21 Murat D, Quinlan A, Vali H *et al.* Comprehensive genetic dissection of the magnetosome gene island reveals the step-wise assembly of a prokaryotic organelle. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2010, 107(12): 5593~5598
- 22 Jogler C, Schüler D. Genomics, genetics, and cell biology of magnetosome formation. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63(1): 501~521
- 23 Schüler D. Genetics and cell biology of magnetosome formation in magnetotactic bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 2008, 32(4): 654~672
- 24 Jogler C, Lin W, Meyerdierks A *et al.* Towards cloning the magnetotactic metagenome: identification of magnetosome island gene clusters in uncultivated magnetotactic bacteria from different aquatic sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(2): 3972~3979
- 25 Jogler C, Kube M, Schübbe S *et al.* Comparative analysis of magnetosome gene clusters in magnetotactic bacteria provides further evidence for horizontal gene transfer. *Environmental Microbiology*, 2009, 11(5): 1267~1277
- 26 Simmons S L, Edwards K J. Geobiology of magnetotactic bacteria, in: D Schüler, ed. *Magnetoreception and magnetosomes in bacteria*. Berlin: Springer, 2007. pp. 77~102.
- 27 Bazylinski D A, Dean A J, Williams T J *et al.* Chemolithoautotrophy in the marine, magnetotactic bacterial strains MV-1 and MV-2. *Archives of Microbiology*, 2004, 182(5): 373~387
- 28 Cox B L, Popa R, Bazylinski D A *et al.* Organization and elemental analysis of P-, S-, and Fe-rich inclusions in a population of freshwater magnetococci. *Geomicrobiology Journal*, 2002, 19(4): 387~406
- 29 Pan Y, Petersen N, Winklhofer M *et al.* Rock magnetic properties of uncultured magnetotactic bacteria. *Earth and Planetary*

- 30 Pan Y, Petersen N, Davila A *et al.* The detection of bacterial magnetite in recent sediments of Lake Chiemsee (southern Germany). *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 232(1-2): 109~123
- 31 Petersen N, Weiss D G, Vali H. Magnetic bacteria in lake sediments, in: F Lowes, ed. *Geomagnetism and palaeomagnetism*. Kluwer: NATO ASI Ser. C, 1989. pp. 231~241.
- 32 Vali H, Forster O, Amarantidis G *et al.* Magnetotactic bacteria and their magnetofossils in sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 86(2-4): 389~400
- 33 Wolfe R S, Thauer R K, Pfennig N. A 'capillary racetrack' method for isolation of magnetotactic bacteria. *FEMS Microbiology Ecology*, 1987, 45(1): 31~35
- 34 Moench T T, Konetzka W A. A novel method for the isolation and study of a magnetotactic bacterium. *Archives of Microbiology*, 1978, 119(2): 203~212
- 35 Blakemore R P. Magnetotactic bacteria. *Science*, 1975, 190(4212): 377~379
- 36 Lefèvre C T, Alain B, Nathalie P *et al.* Characterization of Mediterranean magnetotactic bacteria. *Journal of Ocean University of China*, 2007, 6(4): 355~359
- 37 Woese C R. Bacterial evolution. *Microbiological Reviews*, 1987, 51(2): 221~271
- 38 Simmons S L, Sievert S M, Frankel R B *et al.* Spatiotemporal distribution of marine magnetotactic bacteria in a seasonally stratified coastal salt pond. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(10): 6230~6239
- 39 Lefèvre C T, Vilorio N, Schmidt M L *et al.* Novel magnetite-producing magnetotactic bacteria belonging to the Gammaproteobacteria. *The ISME Journal*, 2012, 6(2): 440~450
- 40 Kolinko S, Jogler C, Katzmann E *et al.* Single-cell analysis reveals a novel uncultivated magnetotactic bacterium within the candidate division OP3. *Environmental Microbiology*, 2012, doi:10.1111/j.1462-2920.2011.02609.x
- 41 Wenter R, Wanner G, Schüler D *et al.* Ultrastructure, tactic behaviour and potential for sulfate reduction of a novel multicellular magnetotactic prokaryote from North Sea sediments. *Environmental Microbiology*, 2009, 11(6): 1493~1505
- 42 Sakaguchi T, Arakaki A, Matsunaga T. *Desulfovibrio magneticus* sp. nov., a novel sulfate-reducing bacterium that produces intracellular single-domain-sized magnetite particles. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2002, 52(1): 215~221
- 43 Gupta R S. The phylogeny of proteobacteria: relationships to other eubacterial phyla and eukaryotes. *FEMS Microbiology Reviews*, 2000, 24(4): 367~402
- 44 Amann R, Peplies J, Schüler D. Diversity and taxonomy of magnetotactic bacteria, in: D Schüler, ed. *Magnetoreception and magnetosomes in bacteria*. Berlin: Springer, 2007. pp. 25~36.
- 45 Spring S, Amann R, Ludwig W *et al.* Phylogenetic analysis of uncultured magnetotactic bacteria from the alpha-subclass of *Proteobacteria*. *Systematic and Applied Microbiology*, 1994, 17(4): 501~508
- 46 Spring S, Amann R, Ludwig W *et al.* Dominating role of an unusual magnetotactic bacterium in the microaerobic zone of a freshwater sediment. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(8): 2397~2403
- 47 Spring S, Amann R, Ludwig W *et al.* Phylogenetic diversity and identification of nonculturable magnetotactic bacteria. *Systematic and Applied Microbiology*, 1992, 15(1): 116~122
- 48 Flies C B, Peplies J, Schüler D. Combined approach for characterization of uncultivated magnetotactic bacteria from various aquatic environments. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(5): 2723~2731
- 49 Flies C B, Jonkers H M, de Beer D *et al.* Diversity and vertical distribution of magnetotactic bacteria along chemical gradients in freshwater microcosms. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 52(2): 185~195
- 50 Simmons S L, Bazylinski D A, Edwards K J. Population dynamics of marine magnetotactic bacteria in a meromictic salt pond described with qPCR. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(9): 2162~2174
- 51 Spring S, Lins U, Amann R *et al.* Phylogenetic affiliation and ultrastructure of uncultured magnetic bacteria with unusually large magnetosomes. *Archives of Microbiology*, 1998, 169(2): 136~147
- 52 Postec A, Tapia N, Bernadac A *et al.* Magnetotactic bacteria in microcosms originating from the French Mediterranean coast subjected to oil industry activities. *Microbial Ecology*, 2012, 63(1): 1~11
- 53 Lin W, Tian L, Li J *et al.* Does capillary racetrack-based enrichment reflect the diversity of uncultivated magnetotactic cocci in environmental samples? *FEMS Microbiology Letters*, 2008, 279(2): 202~206
- 54 Pan H, Zhu K, Song T *et al.* Characterization of a homogeneous taxonomic group of marine

- 55 magnetotactic cocci within a low tide zone in the China Sea. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(5): 1158~1164
邢素娥, 潘红苗, 朱开玲等. 青岛汇泉湾海洋趋磁细菌多样性研究. 高技术通讯, 2008, 18(3): 312~317
Xing S, Pan H, Zhu K *et al.* Diversity of marine magnetotactic bacteria in the Huiquan bay near Qingdao city. *Chinese High Technology Letters*, 2008, 18(3): 312~317
- 56 Kawaguchi R, Burgess J G, Sakaguchi T *et al.* Phylogenetic analysis of a novel sulfate-reducing magnetic bacterium, RS-1, demonstrates its membership of the delta-Proteobacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 1995, 126(3): 277~282
- 57 Sakaguchi T, Burgess J G, Matsunaga T. Magnetite formation by a sulfate-reducing bacterium. *Nature*, 1993, 365(6441): 47~49
- 58 Nakazawa H, Arakaki A, Narita-Yamada S *et al.* Whole genome sequence of *Desulfovibrio magneticus* strain RS-1 revealed common gene clusters in magnetotactic bacteria. *Genome Research*, 2009, 19(10): 1801~1808
- 59 Simmons S L, Bazylinski D A, Edwards K J. South-seeking magnetotactic bacteria in the Northern Hemisphere. *Science*, 2006, 311(5759): 371~374
- 60 Farina M, Esquivel D M S, Lins de Barros H G P. Magnetic iron-sulfur crystals from a magnetotactic microorganism. *Nature*, 1990, 343(6255): 256~258
- 61 DeLong E F, Frankel R B, Bazylinski D A. Multiple evolutionary origins of magnetotaxis in bacteria. *Science*, 1993, 259(5096): 803~806
- 62 Abreu F, Lopes Martins J, Souza Silveira T *et al.* 'Candidatus Magnetoglobus multicellularis', a multicellular, magnetotactic prokaryote from a hypersaline environment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, 57(6): 1318~1322
- 63 Simmons S L, Edwards K J. Unexpected diversity in populations of the many-celled magnetotactic prokaryote. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(1): 206~215
- 64 Zhou K, Zhang W-Y, Yu-Zhang K *et al.* A novel genus of multicellular magnetotactic prokaryotes from the Yellow Sea. *Environmental Microbiology*, 2012, 14(2): 405~413
- 65 张圣姐, 潘红苗, 周克等. 多细胞趋磁原核生物研究进展. 生态学报, 2010, 30(12): 3311~3318
Zhang S, Pan H, Zhou K *et al.* Progress in study of multicellular magnetotactic prokaryotes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3311~3318
- 66 Zhou K, Pan H, Zhang S *et al.* Occurrence and microscopic analyses of multicellular magnetotactic prokaryotes from coastal sediments in the Yellow Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(2): 246~251
- 67 Lin W, Pan Y. Temporal variation of magnetotactic bacterial communities in two freshwater sediment microcosms. *FEMS Microbiology Letters*, 2010, 302(1): 85~92
- 68 Lefèvre C T, Frankel R B, Abreu F *et al.* Culture-independent characterization of a novel, uncultivated magnetotactic member of the *Nitrospirae* phylum. *Environmental Microbiology*, 2011, 13(2): 538~549
- 69 Lefèvre C T, Abreu F, Schmidt M L *et al.* Moderately thermophilic magnetotactic bacteria from hot springs in Nevada. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(11): 3740~3743
- 70 Li J, Pan Y, Liu Q *et al.* Biomineralization, crystallography and magnetic properties of bullet-shaped magnetite magnetosomes in giant rod magnetotactic bacteria. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 293(3-4): 368~376
- 71 Lins U, Keim C N, Evans F F *et al.* Magnetite (Fe₃O₄) and greigite (Fe₃S₄) crystals in multicellular magnetotactic prokaryotes. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(1): 43~50
- 72 Fontaneto D. Biogeography of microscopic organisms: is everything small everywhere? ed. by D J Gower. Vol. 79, *The Systematics Association Special Volume Series* Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- 73 Martiny J B H, Bohannan B J M, Brown J H *et al.* Microbial biogeography: putting microorganisms on the map. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, 4(2): 102~112
- 74 Lin W, Li B, Pan Y. DMTB: a comprehensive online resource of 16S rRNA genes, ecological metadata, oligonucleotides, and magnetic properties of magnetotactic bacteria. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(6): 476~478
- 75 张文燕, 张圣姐, 肖天等. 趋磁细菌的地域分布特征. 环境科学, 2010, 31(2): 450~458
Zhang Wenyan, Zhang Shengdan, Xiao Tian *et al.* Geographical distribution of magnetotactic bacteria. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 450~458
- 76 Kottmann R, Kostadinov I, Duhaime M B *et al.* Megx.net: integrated database resource for marine ecological genomics. *Nucleic Acids Research*, 2010, 38(Database issue): D391~D395
- 77 Petermann H, Bleil U. Detection of live magnetotactic bacteria in South-Atlantic

- deep-sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117(1~2): 223~228
- 78 Lin W, Wan Y, Pan Y. Short-term effects of temperature on the abundance and diversity of magnetotactic cocci. *MicrobiologyOpen*, 2012, doi: 10.1002/mbo3.7
- 79 Mandernack K W, Bazylinski D A, Shanks W C *et al.* Oxygen and iron isotope studies of magnetite produced by magnetotactic bacteria. *Science*, 1999, 285(5435): 1892~1896
- 80 Roberts A P, Florindo F, Villa G *et al.* Magnetotactic bacterial abundance in pelagic marine environments is limited by organic carbon flux and availability of dissolved iron. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(3~4): 441~452
- 81 Kopp R E, Schumann D, Raub T D *et al.* An Appalachian Amazon? Magnetofossil evidence for the development of a tropical river-like system in the mid-Atlantic United States during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Paleoceanography*, 2009, 24(PA4211): doi:10.1029/2009PA001783
- 82 Faivre D, Zuddas P. An integrated approach for determining the origin of magnetite nanoparticles. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(1~2): 53~60
- 83 Kind J, Gehring A U, Winklhofer M *et al.* Combined use of magnetometry and spectroscopy for identifying magnetofossils in sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12: Q08008
- 84 Kopp R E, Raub T D, Schumann D *et al.* Magnetofossil spike during the Paleocene-Eocene thermal maximum: ferromagnetic resonance, rock magnetic, and electron microscopy evidence from Ancora, New Jersey, United States. *Paleoceanography*, 2007, 22(PA4103)
- 85 Abrajevitch A, Hori R S, Kodama K. Magnetization carriers and remagnetization of bedded chert. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305(1~2): 135~142
- 86 Hofreiter M, Serre D, Poinar H N *et al.* Ancient DNA. *Nature Reviews Genetics*, 2001, 2(5): 353~359
- 87 盛桂莲, 赖旭龙, 侯新东. 古 DNA 实验体系及技术. *中国生物化学与分子生物学报*, 2009, 25(2): 116~125
Sheng Guilian, Lai Xulong, Hou Xindong. Standard experimental system and new technologies on ancient DNA research. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2009, 25(2): 116~125

文献导读

从深海环境中找寻化石磁小体

吴文芳

趋磁细菌是指一类能够在体内合成由细胞膜包裹的链状排列的纳米级磁铁矿(Fe_3O_4)和/或胶黄铁矿(Fe_3S_4)颗粒——磁小体的原核生物。其中磁铁矿磁小体通常是形成于微氧化的环境中,而胶黄铁矿磁小体常在硫化环境中发现。微氧化或还原的环境对于趋磁细菌矿化合成磁小体至关重要,因为较高氧浓度会对趋磁细菌产生抑制作用,从而导致形成的磁铁矿颗粒偏小,且形状不规则。趋磁细菌不仅分布在常规的表生环境中,在深海环境中(如深海4500m)趋磁细菌也有发现。这些分布在海洋中的趋磁细菌死后,磁小体颗粒被埋藏,形成化石磁小体。由于趋磁细菌磁小体颗粒具有形状规则、粒径分布窄、呈典型SD颗粒、结晶好、化学纯度高、独有的特点,成为剩磁的理想载体。然而,它们极小的颗粒粒径也意味着在深海环境中保存需要一定的化学条件,如在厌氧的条件下化石磁小体极易被有机质溶解。同时深海中的铁浓度对于趋磁细菌的矿化是一个重要的限制性营养元素。虽然在深海底层的铁浓度相比浅水要高,但是可以被趋磁细菌利用的铁浓度却很低。在近海岸富有机质的环境中铁浓度通常很高,但是同时存在的高浓度有机质又限制了化石磁小体的稳定保存。最近,Roberts *et al.* (2011)综合运用电子顺磁共振(EPR)、岩石磁学和透射电子显微镜(TEM),对南海ODP738B孔始新世沉积物进行了详细的分析,并利用碳酸质成分中的微型化石来指示古环境的变化,探讨了有机碳和溶解铁对深海沉积物中趋磁细菌磁小体的影响。

研究结果显示,ODP738B孔沉积物中含有丰富的化石磁小体颗粒,如下图1所示,其中的化石磁小体颗粒形态多样,有立方体、立方八面体、棱面体等,选区电子衍射结果(图1中插图)显示其矿物成分为磁铁矿。FORC图结果(图2)显示颗粒以SD颗粒为主,在纵轴上展布极窄,表明基本无相互作用,同时峰值矫顽力分布在17-30 mT左右,为典型的完整磁小体链特征。FORC图外围部分强度较弱,指示了少量的粗颗粒矿物的存在。 χ -T曲线在580°C和680°C左右都有明显的下降,指示了沉积物中磁铁矿和赤铁矿颗粒的共同存在。从IRM获得曲线中也可以看出载磁矿物高、低矫顽力组分都有,通过

计算 $IRM_{900mT}-IRM_{300mT}$ 可以估算赤铁矿的含量, 其中 55-80% 的 IRM 为软磁性成分所携带。考虑到赤铁矿的自发磁矩约为磁铁矿的 1/200, 由此估算沉积物中的载磁矿物赤铁矿和磁铁矿含量大致相当。所有 EPR 吸收谱(图 3)都显示有尖锐的细线(6 个强的和 10 个弱的, 见图 3a 和 3c), 这是由方解石颗粒中的 Mn^{2+} 离子所致。经快速傅里叶变换消除高频成分后的 EPR 谱在低场有两个不对称的峰, 并向低场方向延伸, EPR 谱形状与文献报导的典型的完整磁铁矿磁小体链一致。其中 g_{eff} 值为 1.95-1.99, 与所有发表的含磁铁矿磁小体的 g_{eff} ($g_{eff}<2.12$)一致, α 值为 0.24-0.29, 也与生物成因磁铁矿的经验参数 $\alpha<0.3$ 很好的吻合。

综合以上实验指示的磁铁矿和赤铁矿含量和碳酸质成分中的微型化石分析结果 (图 4), 可以看出二者有很好的对应关系, 从中可以得出以下结论:
 1. 岩石磁学方法结合 EPR 谱和 TEM 观察, 可以很好地指示地质记录中的化石磁小体颗粒; 2. 铁和有机碳是趋磁细菌代谢的重要限制性因素; 3. 强磁性矿物和弱磁性矿物的间隔出现也可以发生在未经历明显的还原成岩作用的远洋碳酸盐中。其中的有机碳一方面可以促进颗粒的还原性溶解, 另一方面又可以为趋磁细菌提供营养物质从而增加化石磁小体丰度。作者最后还指出, 古生产力与磁记录信号的关系较为复杂, 尤其是古生产力(paleoproductivity)变化导致磁记录反应的成岩破坏, 和古生产力变化刺激引起的化石磁小体增加和磁记录信号增强, 这二者之间的临界或是平衡需要进一步的研究。

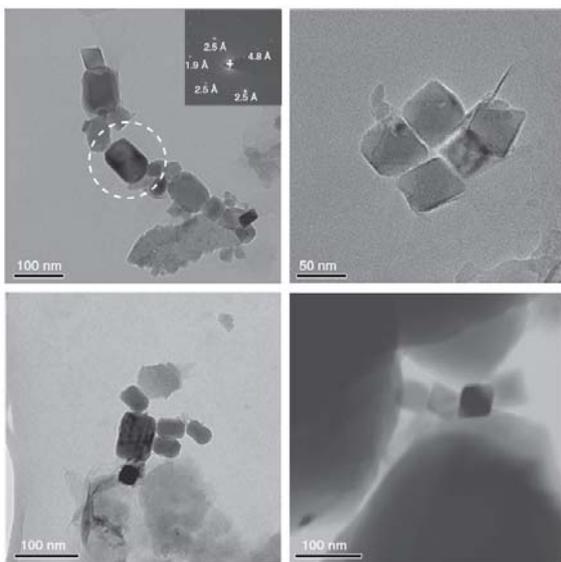


图 1 样品 738B-5H-2-101cm 中的化石磁小体 TEM 照片, 结果显示沉积物中含有丰富多样的磁小体, 有立方体、立方八面体、棱柱体等。右上角的图中插图为圆圈区域样品的选区电子衍射图, 从中可见磁铁矿颗粒的 {420}, {311} 和 {111}

晶面 (Roberts *et al.*, 2011)。

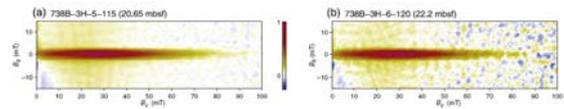


图 2 典型样品的的 FORC 结果, 样品以 SD 颗粒为主, 相互作用极弱或无, 峰值矫顽力集中分布在 17-30 mT, 符合典型的趋磁细菌完整链状磁小体颗粒特征。

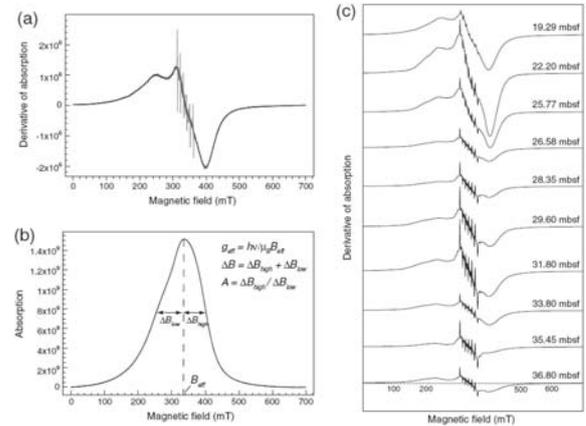


图 3 ODP738B 孔样品的 EPR 谱, 其中(a)为其中一个典型样品的 EPR 微分吸收谱; (b)为经平滑后的 EPR 吸收谱, 指示了各个参数的定义; (c)为样品 19.29 到 36.80mbsf 的 EPR 微分吸收谱。

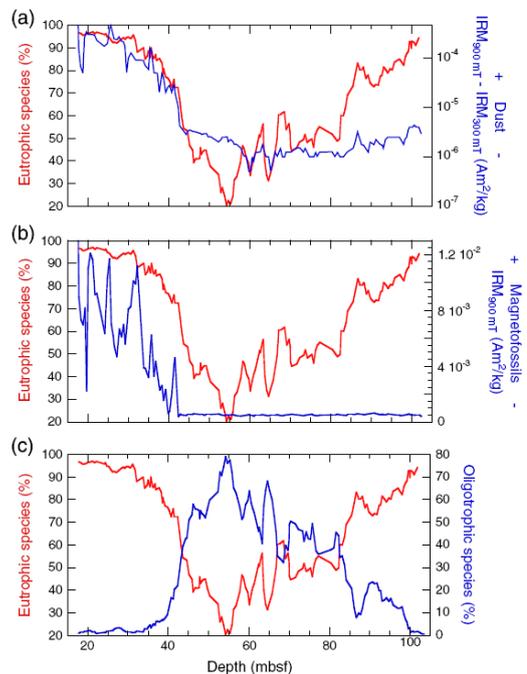


图 4 ODP738B 孔沉积物磁性参数和生态参数组合, 其中(a)为赤铁矿含量和富营养环境中微型化石变化图; (b)为 IRM(指示磁铁矿含量)与富营养环境中微型化石变化图; (c)为贫营养和富营养环境中微型化石变化图。

Roberts, A.P., Florindo, F., Villa, G., Chang, L., Jovane, L., Bohaty, S.M., Larrasoana, J.C., Heslop, D. & Fitz

Gerald, J.D., 2011. Magnetotactic bacterial abundance in pelagic marine environments is limited by organic carbon flux and availability of dissolved iron, *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 441-452.

褶皱冲断带里的旋转问题：比利牛斯山南部的古地磁和磁组构比较讨论

陈力为

垂直轴旋转在褶皱和冲断构造中很容易发生,从微细结构到区域大尺度上都存在。传统的结构地质方法去研究褶皱冲断带里的几何和动力问题将会变得非常复杂,若考虑到旋转问题的话。目前有多种研究手段来分析构造旋转问题,如: a 详细绘图,对截断关系或者沿走向比较平衡横截面的缩短量; b 古应变或应力的突然改变; c 应变标志如褶皱轴,断层,劈理以及变形物的改变; d 对方解石双晶或者断层动力学数据得到的古应力分析; e 古水流方向的改变。但是,无论如何,古地磁以它绝对的控制优势使它成为评估旋转的一个最可靠工具。以上所说的方法(包括古地磁手段)都由于本身高密度的采样和耗时的实验过程而都有着缺陷性。另一方面来说,磁化率各向异性一种快速可靠的方法用来评估矿物的优先定向。近来有些研究已经注意到弱变形条件下早期 AMS 的锁定现象。于是 AMS 可以用来反映变形,进而估计垂直旋转量。Anchuela et al. (2012) 综合古地磁数据和 AMS 来量化垂直旋转这一过程,研究区域位于南部比利牛斯山。

区域地质情况: 始新世时期,叠瓦状冲断构造初次发育在 Gavarnie 基底上。主体走向从前缘结构 WNE-ESE to NW-SE 逐步转变到倾斜结构的 N-S to NW-SE。这一系统的侵位是穿时的,西部更偏年轻。第二个冲断系发育在中新世时期。采样的区域有三个剖面(自西向东): Cinco Villas, Santa Barbara 和 Oroel。地质特征也彼此不同。冲断前缘没有在最西头区域出现,倾斜褶皱时有出现。

从 AMS 结果来看(图 1), Oroel 和 Santa Barbara 剖面的磁线理平行于比利牛斯主要趋势(N090E to N110E), Cinco Villas 略有差别。根据地层的走向和磁线理的关系可以将磁组构分为三个类型: 1 磁线理平行地层走向; 2 磁线理不平行走向,但通常呈现 N-S 的方向,这可看成区域尺度上非比利牛斯集中的特征; 3 磁线理不平行走向,但地层校正后与比利牛斯山走势一致。从古地磁结果来看, Cinco 的旋转不显著($D=8$, $I=33$, $\alpha_{95}=18$), Oroel 和

Santa 有相似的平均结果($D=8$, $I=42$, $\alpha_{95}=24$; $D=14$, $I=33$, $\alpha_{95}=15$)。接下来将具体讨论磁组构的解释以及和古地磁结果的相关性问题。

Type 1 磁组构线理垂直于缩短方向。这种组构可以解释为垂直于缩短方向主轴的颗粒早期重新定向,也就是说与褶皱之前的成岩第一阶段相关, type 3 磁组构也是通过这个过程获得的,因为它的线理和区域构造方向平行。Type 2 磁线理平行于东边的

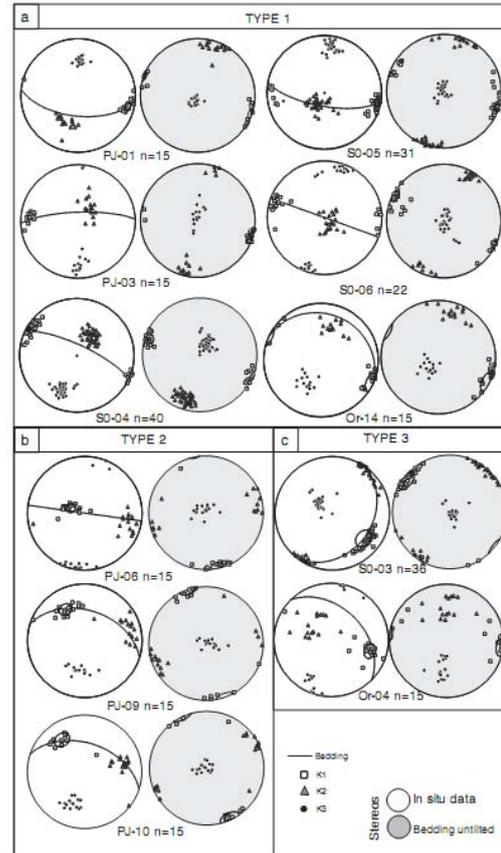


图 1 磁组构的特征, 图中实线圆弧代表地层层位。

倾斜结构走向。而由此推断的缩短方向和后期的地层倾斜方向也不一样。如果两个很近的采点具有不同方向的磁线理,那么可以推断它们彼此的旋转量各不相同。古地磁分析是将采点得到的古地磁矢量和参考方向相减得到旋转量的,但 AMS 却没有参考方向这一依据。若将 AMS 线理数据和 VAR (vertical axis rotation obtained from paleomagnetism) 进行作图分析(图 2),可以发现这两者之间存在着相关性。回归线与横轴的交点($Pmag-VAR=0$)对应的磁线理就是发生旋转之前的初始线理。对于 Type 2, 这个初始值是 N146E, Type 1 是 N090E-N110E。于是,当 local 磁线理大于初始线理,就说明发生了顺时针旋转,反之,亦然。旋转的显著性问题用指标 S 来衡量: $S=VAR/\alpha_{95}$ 。当 $S>1$ 时,认为旋转显著。从结果来看(图 3),

S 参数对于 AMS 技术要比由古地磁数据得到的要更高 (特别是碎屑沉积岩)。基于此, 如果将 AMS 技术和古地磁技术结合起来, 对旋转的结果解释具有更可靠的精度。

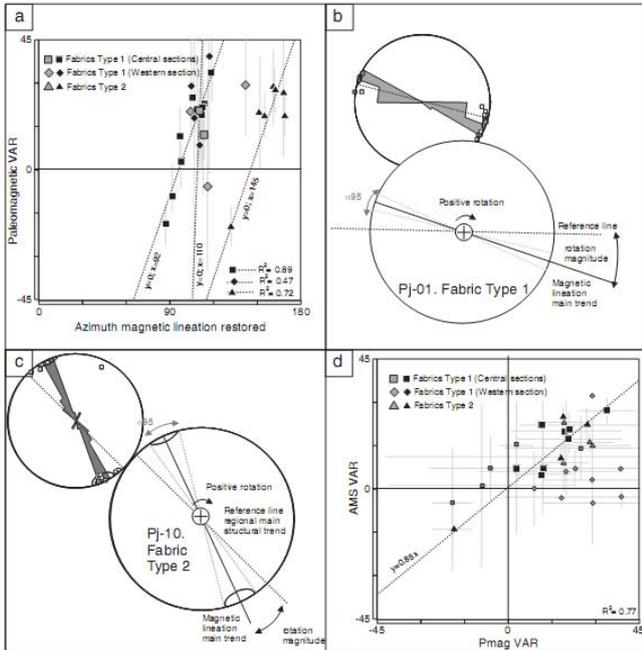


图 2 a) 纵轴是古地磁得到的旋转, 横轴是恢复之后的磁线理。b)和 c) 从 AMS 得到的旋转量。d)古地磁得到的旋转和 AMS 得到的旋转对比图, 图中回归线用的是 S>1 的数据。

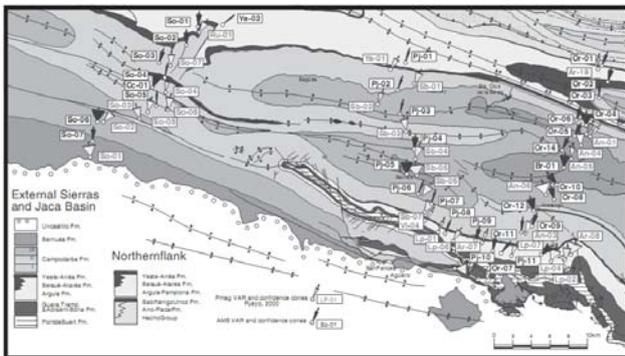


图 3 所有数据的 AMS 旋转结果和古地磁旋转结果: 实心圆锥: 磁组构; 灰色圆锥: 古地磁

Pueyo Anchuela, Ó., E. L. Pueyo, A. Pocoví Juan, and A. Gil Imaz (2012), Vertical axis rotations in fold and thrust belts: Comparison of AMS and paleomagnetic data in the Western External Sierras (Southern Pyrenees), *Tectonophys.*, 532–535(0), 119–133.

稳定漩涡状磁铁矿纳米环: 微磁学模拟与实验简述 葛坤朋

磁性胶体 (magnetic colloid) 是一种稳定的

磁纳米颗粒悬浮液, 因为其在高烧治疗、核磁共振成像、磁靶向药物输运等方向的广泛的生物医学应用而受到重视。最初, 超顺磁颗粒因其在撤去外加场后几乎不携带剩磁, 使得相互作用很弱, 不容易凝聚, 并且在生理环境下性质稳定等优势而被广泛使用。但是, 超顺磁颗粒的弱相互作用是以牺牲饱和和磁化强度为代价的。因为小的颗粒具有更大的相对表面积, 导致产生大量斜交的表面自旋而降低了饱和和磁化强度。因此超顺磁颗粒对外磁场的响应就相对较弱, 所以结果并不理想。

近年来, 科学家发展了一种新型的替代方法, 即使用磁纳米环 (图 1)。由于相互作用的产生主要是由于游离场 (stray field) 的存在, 而在磁纳米环中因为漩涡状的磁畴状态, 使得磁力线呈顺时针或者逆时针的涡旋形态, 而致使游离场很低, 所以相互作用很弱。同时漩涡的磁畴状态使磁化强度矢量彼此抵消, 所以剩磁也很弱。否则, 高的剩磁和相互作用将导致磁颗粒的凝聚, 而失去其生物医学的作用。更为重要的是, 磁纳米环粒径不再受到超顺磁粒径的限制, 可以达到很高的饱和磁化强度, 所以对外界的磁场响应更为敏感。因此磁纳米相对于超顺磁颗粒拥有更广泛的应用前景。

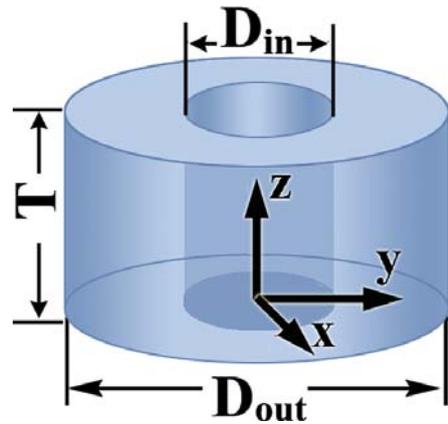


图 1 磁纳米环的微磁学模型 其中 $\beta = D_{in} / D_{out}$

本文作者通过三维 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 微磁学模拟给出了磁纳米环的基态相图以及 100 nm 内不同的外径 D_{out} 、厚度 T 、内外径之比 β 产生的稳定漩涡区域。同时也研究了缺口、离心率、结晶学方向对于漩涡结构的影响。

图 2 展示了不同形态磁纳米环的磁滞回线和磁畴状态图像。结果显示, 对于典型的磁纳米环颗粒 ($D_{out}=70 \text{ nm}$, $T=50 \text{ nm}$, $\beta=0.6$, 图 2a), 随着外加场的变化, 磁畴状态从一致磁化状态变为洋葱圈 (onion) 状态, 然后在外场为零时变为漩涡状 (vortex) 形态, 呈现 onion-vortex-onion 行为。而

对于厚度较薄的磁纳米环 ($D_{out}=70\text{ nm}$, $T=50\text{ nm}$, $\beta=0.6$, 图 2b) 随着外场的变化, 磁畴状态呈现 onion-onion 行为, 不再存在 vortex 行为。

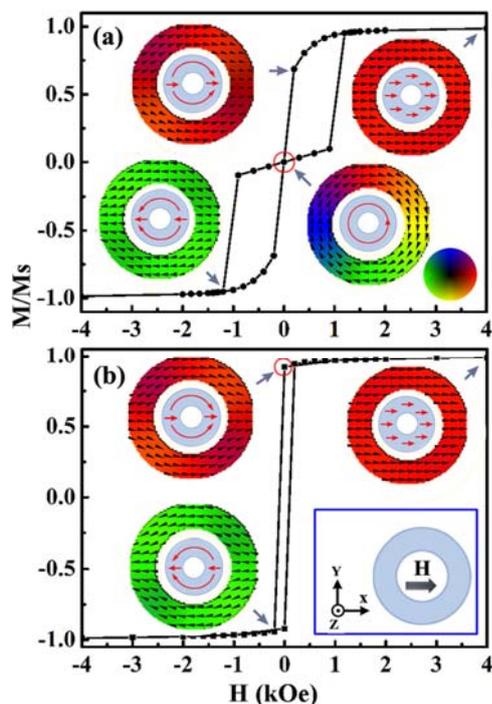


图 2 磁纳米环的磁滞回线图。图 a 为 $D_{out}=70\text{ nm}$, $T=50\text{ nm}$, $\beta=0.6$, 图 b $D_{out}=70\text{ nm}$, $T=30\text{ nm}$, $\beta=0.6$ 。彩色插图 为所指回线处的磁畴状态, 蓝色方框内指示了加场方向。

相互作用研究显示, 对于典型的磁纳米环颗粒, 横向排列颗粒相聚为 20 nm 时可以达到稳定的漩涡结构。垂向排列颗粒相聚为 2 nm (一个剖分单元) 时仍可以达到稳定的漩涡结构。图 3 展示了不同排列方式的磁纳米环的退磁曲线以及剩磁状态。在横向排列时, 相距 20 nm 以上的磁纳米环仍然具有零场下的漩涡结构 (图 3a), 而当距离减小到 15 nm (图 3b) 时, 零场下的漩涡结构消失, 是磁纳米环保留了剩磁。对于纵向排列的磁纳米环, 即使距离非常接近 (图 3c), 仍然具有零场下稳定的漩涡状结构。

微磁学模拟还发现, 缺口、偏心等缺陷会扩大磁漩涡状结构的存在范围, 这使得我们不必担忧实验制备过程中所产生的形状偏差。而针对易磁化轴方向的影响, 模拟发现 $[113]$ 易磁化轴指向的磁纳米环具有更宽的漩涡结构存在范围。

在实验中, 磁纳米环颗粒通过磷酸化悬浮剂加工后, 颗粒间距超过了 20 nm 。磁学实验发现, 这种悬浮胶体具有很低的剩磁并且不会发生聚合效应。由此验证了模拟结果的正确性, 为磁纳米环的生物学应用前景提供了理论依据。

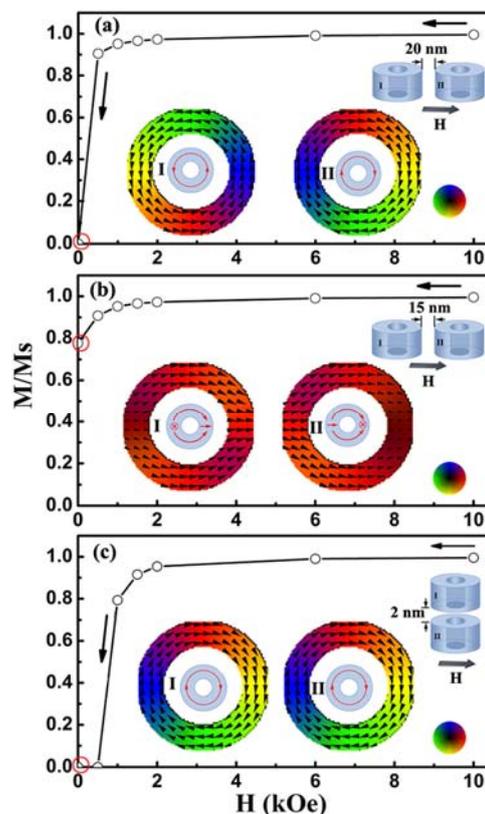


图 3 不同相邻方式的典型磁纳米环 ($D_{out}=70\text{ nm}$, $T=50\text{ nm}$, and $\beta=0.6$) 的退磁曲线和剩磁的磁畴状态。图 a 为横向相聚 20 nm , 图 b 为横向相距 15 nm , 图 c 为纵向相距 2 nm 。

参考文献:

Stable vortex magnetite nanorings colloid: Micromagnetic simulation and experimental demonstration. Yong Yang et al. J. Appl. Phys. 111, 044303 (2012); doi: 10.1063/1.3684963

Low Temperature Surface Spin-Glass Transition in $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles. Martinez et al. 1998 Phys. Rev. Lett. 80(1), 181-184

合成玄武岩中多组分立方氧化物的出溶作用: 温度依赖性和磁学性质的意义

胡鹏翔

在慢速冷却, 但不太氧化的环境中, 氧化物会经历出溶作用产生细小的共生矿物, 这些共生矿物在组分上比原始晶体更接近最终产物。出溶作用可以显著改变氧化物的磁学性质。例如, 在钛磁铁矿

的出溶作用中, 细小的纯磁铁矿颗粒被非磁性的钛尖晶石母质所分离, 导致磁畴缩小和居里温度的上升(Hargraves et al., 2001)。然而, 出溶作用影响磁学性质的动力学和热力学机制一直没有在实验研究中得到解决, 其主要原因是二元氧化物的反应速率非常缓慢。另一个关键的科学问题是, 磁性颗粒的出溶温度是否高于居里温度, 从而可以获得全部的热剩磁。已有的研究表明, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$ 二元相溶解最高温度低于 600°C , 因此只有快速出溶的钛磁铁矿可以获得全部热剩磁的磁铁矿成分。而 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeAl}_2\text{O}_4$ 的最高溶解温度较高, 因此很大程度上这种多组分的立方体氧化物可以获得热剩磁。由于许多自然铁氧化物含有多种阳离子, 比如 Ti, Mg, Al, 因此, 理解氧化物出溶对磁学性质影响的关键在于确定 Fe-Mg-Al-Ti 立方体氧化物溶解度曲线的温度组成面。本研究合成了玄武岩, 用 Fe-Mg-Al-Ti 氧化物将它们饱和, 置于半固体环境下 ($590\text{-}790^\circ\text{C}$, 从而考察它们在较短的时间内是否可以发生出溶作用。另外, 对半固体进行退火处理, 研究这些退火产物的微结构, 组成和磁学特征, 对多组分溶解度曲线提出约束, 并探讨出溶作用对磁学性质影响的意义。

本研究合成了两种性质的玄武岩, 一种 Fe/Al 值比较高 (M 型), 一种 Fe/Al 值比较低 (T 型)。两种类型的玄武岩被部分为三批进行部分结晶, 其中 Batches 1 and 2 由于保存在石英玻璃, 可能会有氧气混入而氧化程度较高, Batches 3 在 $\text{H}_2\text{-CO}_2$ 环境中而氧化程度较低。所有样品经过退火处理后, 出现两种出溶类型。Type 1 是出溶在磁铁矿-钛尖晶石固溶体边界的二相共生体, 其中, 以富钛磁铁矿的寄主含 Ti 和 Al 较多, 而以富磁铁矿的寄主含 Fe 和 Mg 较多。Type 1 型出溶导致了不规则的相边界 (图 1a, b)。Type 2 型出溶粒径更小, 是出现在至少两个 001 面的纹层。此类型出溶在纹层中富集 Mg 而在寄主中富集 Al, 且边界规则 (图 1c, d)。随着退火温度的增加, 出溶作用最强的样品显示出居里温度与退火前样品较大的差异, 且居里温度的离散度高 (图 2), 这说明温度的增加有利于出溶作用的进行, 也暗示着退火温度是在溶解温度曲线之下的。退后处理后, 出溶作用较强的样品矫顽力和饱和剩磁都大幅度增加 (图 3), 证明这类出溶可以对磁化强度及其稳定性产生影响。随着退火温度的升高, 磁畴从单畴变为多畴, 反映在较高温下, 微结构变粗的速度变大。这说明时间和温度都影响受出溶作用影响的玄武岩的磁化强度。由于多组分系统的

会熔点远高于立方尖晶石的居里温度, 如果出溶作用在 580°C 以上发生, 存在此类出溶作用的玄武岩可以携带全部的热剩磁。

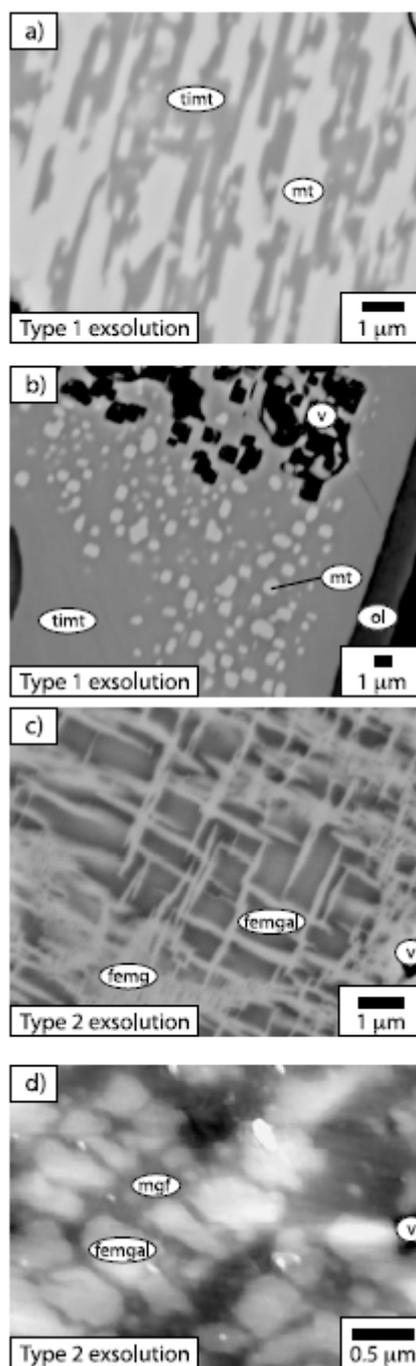


图 1 不同类型出溶体的电子背散射和原子力显微镜图。

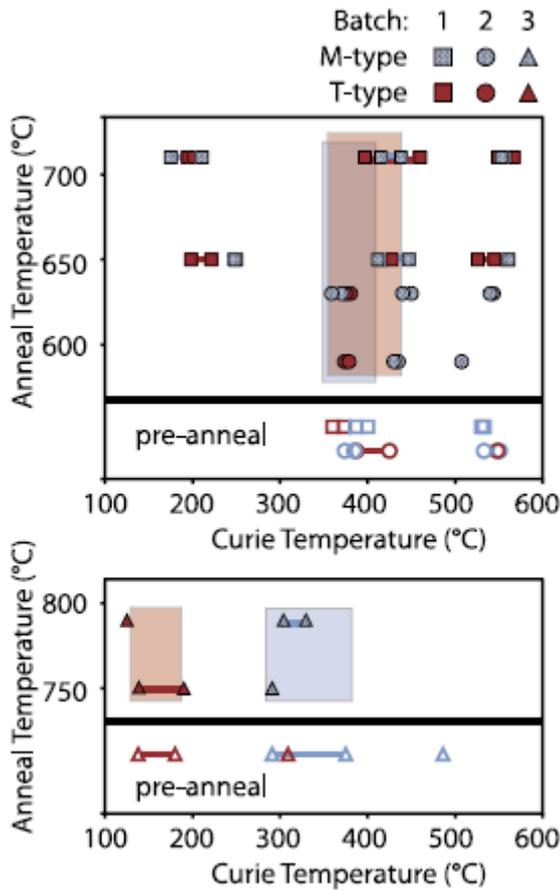


图 2 Batches 1 和 Batches 2 的居里温度数据 (上图), Batches 3 的居里温度数据 (下图)。有明显出溶作用的样品的居里温度点和退火前相比有明显出入。

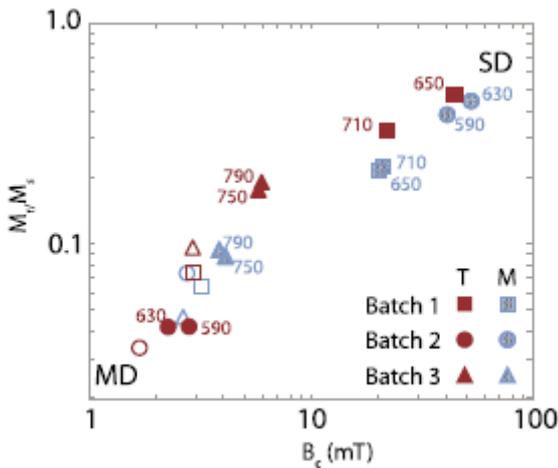


图 3 退火处理后样品的磁学参数图 (空心符号为退火前样品, 实心符号为退火后样品)。

Bowles, J. A., L. Tatsumi-Petrochilos, J. E. Hammer, and S. A. Brachfeld (2012), Multicomponent cubic oxide exsolution in synthetic basalts: Temperature dependence and implications for magnetic properties, *J. Geophys. Res.*, 117, B03202, doi:10.1029/2011JB008867.

里海盆地南部上新世-中新世海侵的磁性地层时代框架

李倩

中新世晚期伴随着海平面的显著降低和巨厚的低期三角洲沉积形成, 里海盆地开始与外海分离。Productive Series 是里海南部主要的石油储藏单元。它被 Akchagylian 和 Apsheronian 阶段形成的海洋粘土覆盖。在上新世-更新世期间, 里海曾几次与其他海洋盆地间歇性连通在一起。本文致力于在这些区域性海侵的关键地带, 如里海盆地南部 Azerbaijan 地区, 建立完整、高分辨率生物-磁性地层年代框架。作者采集 Palaeo-Volga 三角洲地区的 Lokbatan 和 Kura 河流域的 Xocashen 剖面, 并根据不同种类介形虫特征的变化重建该区的古环境演化历史。

Lokbatan 剖面长 850m, 共采集 285 个层位。Xocashen 剖面长 900m, 共采集 97 个层位。室内以热退磁和交变退磁结合的方法甄别出原生剩磁。岩石磁学以及热退磁结果表明在 Lokbatan 剖面的 Productive Series 阶段以及 Xocashen 剖面中, 载磁矿物主要是磁铁矿。在 Lokbatan 剖面 Akchagylian 和 Apsheronian 阶段海洋沉积物样品载磁矿物为胶黄铁矿。

Lokbatan 剖面的 Productive Series 阶段存在三个极性带, 两个负极性带, 一个正极性带。Lokbatan 剖面的 Akchagylian 阶段为负极性带。Lokbatan 剖面 Apsheronian 阶段自 710m 到 715m 处为反极性带, 其上为正极性带。该剖面自 40m 到顶部为反极性带。Xocashen 剖面中共存在五个极性带 (两个为负极性带, 三个为正极性带)。

在 Lokbatan 剖面中 Productive Series 阶段上部 520-550 m 之间的褐色粘土和粉砂中存在一层火山灰层, 厚约 5-15cm。用裂变径迹方法测得火山灰年龄为 3.34 ± 0.35 Ma。将剖面磁性地层结果与极性年表对比, Akchagylian 阶段海侵时间最可能在 3.2 Ma, Apsheronian 阶段最主要的海侵的年代为 2 Ma, Bakunian 阶段的海侵发生在 0.85-0.89 Ma。

Productive Series 阶段介形虫主要是淡水生种类。Akchagylian 阶段介形虫主要为咸水生种类。这反映了当时海平面有一次突然的升高导致里海水域盐度变化。Akchagylian 与其上地层为角度不整合, 此阶段可能发生过一次区域性的构造运动。与 Akchagylian 阶段类似, Lokbatan 剖面 Apsheronian 阶段的介形虫为咸水生种类。Xocashen 剖面的 Apsheronian 阶段中可见淡水生介形虫。两者间的差异可能是两地的古环境不同所致。Bakunian 阶段介

形虫为咸水生种类。

从淡水湖泊环境到海洋咸水环境,介形虫组合的变化指示海侵期间里海盐度的增加。这种环境的变化暗示了当时里海和周围盐度更高的海洋之间已经相连了,和黑海之间相连的可能性最大。

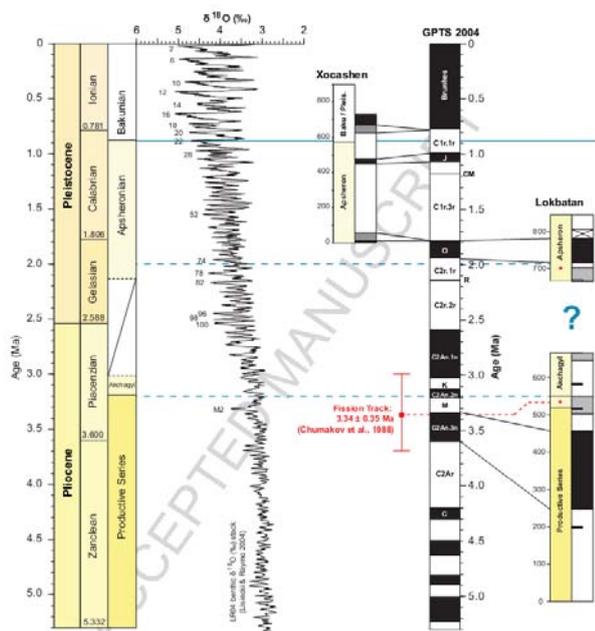


图 1 磁性地层结果与标准地磁极性年表对比。从左至右分别为:全球标准地层,里海盆地南部区域标准地层,深海 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线以及该研究区域磁性地层结果与标准极性年表对比。

Van Baak, C.G.C., Vasiliev, I., Stoica, M., Kuiper, K.F., Forte, A.M., Aliyeva, E., Krijgsman, W., A magnetostratigraphic time frame for Plio-Pleistocene transgressions in the South Caspian Basin, Azerbaijan, Global and Planetary Change(2012), doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.05.004.

野外明火实验揭示的不同磁化机制

一对考古磁学研究的启示

刘成英

1. 引言

考古磁学研究的一个重要方面是选择合适样品以获得可靠的古方向或古强度结果。窑、砖、瓦、灶等材料都可能因经历高温冷却过程而携带热剩磁,是考古磁学重要研究对象。由于加热条件(如加热温度、加热时间、燃料的种类和数量及周围环境等)或后期埋藏条件不同,考古材料可能具有复杂的磁性矿物组成,其剩磁也可能有多种来源。

火是土壤和沉积物中最重要的磁性增强机

制。一般认为,经过火加热过的考古材料的磁异常(如磁化率增强)是由于磁性较弱矿物转变为磁性较强的矿物引起,如生成磁铁矿或磁赤铁矿等。然而,一些实验研究显示,在长时间加热过程中生成的一些弱磁性矿物(如从磁赤铁矿转变为赤铁矿)会导致磁信号减弱。

本文研究者在野外粘土质底土上燃烧木材,试图模拟史前燃烧获得剩磁过程。通过控制温度、燃料、热渗透率和初始磁性矿物组成等因素,试图探讨以下几个问题:(1)由于加热引起的粘土质底土的矿物变化(2)确定磁学性质变化的区域和深度(3)探索相关磁化机制特征(4)评估获取可靠古方向和古强度区域(5)探讨考古磁学和考古学意义。

2. 实验材料和方法

野外明火 在西班牙的一个村子中选择一块地面,去除表层 15 厘米,清出 250×150 厘米的长方形平地。在表面和不同深度(1、3 和 6 厘米)共放置 7 个 K 型热电偶,每 5-10 分钟读一次温度记录。在矩形中心处堆放木材,每天燃烧 2.5 小时,持续 4 天。为避免干扰,尽量扫除木材灰烬。

采样 采集燃烧前后的散样和定向样品。在最后一次燃烧完成后,或其余地面冷却时,利用磁罗盘定向原位采集表土块样。燃烧后样品的选择依温度记录和样品位置而定。

古地磁学和岩石磁学实验 对燃烧前后样品开展了详细古地磁学和岩石磁学实验。测量了燃烧前后样品的天然剩磁(NRM)、低场磁化率;对样品 NRM 进行了交变退磁(16 步,最高到 100 mT)和热退磁(16 步,最高到 686°C);开展了等温剩磁(IRM)三轴热退磁实验;测量了磁化率随温度变化曲线、磁化强度随温度变化曲线(热磁曲线),一阶反转曲线(FORC),等温剩磁获得和反向场退磁曲线。

3. 实验结果

温度分布 中部底土表土的最高温度记录可达到 490-690°C,3-4 厘米以下土层温度不超过 245°C,5-6 厘米以下小于 170°C。边部底土的温度始终小于 80°C。木材燃烧后的灰烬有时会造成温度记录异常,处理时只选取可靠记录。

磁化率 加热后底土的低场磁化率明显增强,其中中部表土磁化率增幅最大。低场磁化率与温度直接相关。由于低场磁化率的空间分辨率(10 厘米网格)大于温度记录,所以利用等磁化率曲线近似等温曲线。

燃烧前底土的磁学性质 磁滞回线和三轴热退磁实验揭示燃烧前底土样品中高矫顽力成分(赤铁矿)占主导。对 IRM 获得曲线的分析显示, 燃烧前底土中含有少量低矫顽力成分(磁铁矿/磁赤铁矿)。燃烧前样品的细腰状磁滞回线特征可能由赤铁矿和磁(赤)铁矿混合引起。

燃烧后底土磁学性质随深度和表面位置的变化

IRM 获得曲线和热磁曲线 燃烧后表层(0-1 厘米)底土的 IRM 在小于 200 mT 获得饱和, 指示低矫顽力磁性矿物占主导。高矫顽力成分对饱和等温剩磁(SIRM)的贡献随深度增加而增大。热磁曲线显示, 燃烧后的表层底土(0-1 厘米)的磁化强度最大, 比 1 厘米以下底土的磁化强度高一个数量级; 赤铁矿随深度增加而增多。

S-ratio, HIRM 和 SIRM 定义 $S\text{-ratio} = \text{IRM}_{0.2T} / \text{SIRM}_{1T}$, 指示磁铁矿/赤铁矿随深度增加而减少。 $\text{SIRM}_{1T} - \text{IRM}_{0.2T}$ 值随深度变化不明显; 但显示在表层(5 毫米)明显下降, 指示赤铁矿含量减少。SIRM 随深度的变化曲线显示, 底土表层 S-ratio 变化仅由磁铁矿生成引起, 磁铁矿的生成在表层(1 厘米)明显。

IRM 三轴热退磁 IRM 三轴热退磁特征显示燃烧后边部底土以低矫顽力成分(磁铁矿)主导。加热到 200°C 时, 边部燃烧后底土的磁化率增加, 可能由生成了强磁性矿物引起。中部燃烧后底土(3.4-5.1 厘米)的软磁性矿物含量最少, 磁化率随温度变化曲线显示没有磁铁矿生成, 说明自生磁铁矿只出现在底土表层(0-2 厘米)。

FORC 图 燃烧后样品的 FORC 图显示出赤铁矿信息。磁滞回线显示边部和表面燃烧后底土以磁铁矿为主; FORC 图揭示边部底土中磁铁矿的相互作用强于中部。中部燃烧后底土表土的自生磁铁矿以单畴为主, 可能适合古强度研究。

热磁曲线的可逆性和逐步热磁曲线 燃烧后中部表层底土的热磁曲线可重复性高于边部。燃烧后底土的热磁曲线可逆性与温度记录一致。逐步热磁曲线进一步证实边部燃烧后底土在野外实验的受热温度为 260-300°C。

NRM 的稳定性 NRM 退磁结果显示, 燃烧前底土的高温和高矫顽力分量方向一致, 在 80-100 mT 时 NRM 剩余超过 50%, 在 686°C 时能完全退磁。燃烧后底土 NRM 在 80-100 mT 和 580°C 时被完全清洗, 说明主要载磁矿物为磁铁矿。燃烧后底土记录的磁场方向与现代地磁场在当地的方向一致。

4. 讨论和结论

本次野外实验利用木材在平整后的粘土质底土上燃烧, 实验中控制了底土温度、加热次数、加热前磁性矿物组成等因素。通过比较燃烧前后不同区域、不同深度底土的磁学特征, 说明木材燃烧使富含粘土的底土产生了明显的磁学性质增强过程, 如燃烧后底土表土的磁化率是燃烧前的 50 倍。如果史前燃烧底土的埋藏剥蚀作用不强, 则可能利用磁化率仪快速圈定考古磁学研究区域。燃烧后底土表层和中部 1 厘米深度以内区域的磁性明显增强。详细岩石磁学和古地磁学研究显示, 底土磁性增强主要由顺磁性矿物转变为磁铁矿引起, 但不能完全排除赤铁矿减少影响。

木材燃烧使底土表层不同区域(如中部和边部)和不同深度受热温度不同。底土记录了两种不同的磁化机制。中部底土表土的受热温度超过 600°C, 获得了热剩磁(TRM)。边部底土受热温度小于 300°C, 同时获得热剩磁(小于 300°C)和化学剩磁(300—580°C), 称为热—化学剩磁(TCRM)。

受热后底土表层样品能较好记录地磁场方向。但是, 受热后的仅中部浅层(2 厘米以内)底土的磁性矿物以单畴磁铁矿为主, 可能是开展古强度研究的最好区域。

译者浅见: 这篇文章的作者针对考古磁学的实际问题, 合理设计并实施了野外明火实验, 是一大亮点。通过对燃烧前后的样品详尽的岩石磁学和古地磁学研究来揭示磁化特征和考古磁学意义。

Á. Carrancho and J.J. Villalaín, Different mechanisms of magnetisation recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications, *Earth and Planetary Science Letters*, 312 (2011), 176 - 187

化学风化对构造作用的反应: 以加利福尼亚 San Gabriel 山土壤剖面为例

刘志峰

构造作用控制地表倾角及搬运和溶解沉积物的物理化学过程, 从而影响地表演化的速率和形态。因而土壤的化学风化作用受构造作用控制, 模型和实验结果表明构造作用及其带来的侵蚀速率的增加可能促进或者阻碍土壤化学风化。这两个截然相反的结果受地表是否有新的矿物加入以及其保持时间控制。

Dixon 等通过研究加利福尼亚 San Gabriel 山区六个地点的土壤剖面、残余土及母岩的风化速率

和程度(分别包含高地坡度较低和构造活动边缘坡度高的地点)。通过平均化学组分减少量(Average chemical depletion fraction)指示土壤中矿物相对母质的风化减少量,其随海拔的升高和温度的降低而降低,他们认为反应了气候和来自东部 Mojave 沙漠粉尘综合影响。在相同纬度不受粉尘影响的区域,海拔高度相同时,气候及岩石特征与侵蚀速率及坡度相关。当坡度小于 25 度时,风化速率随侵蚀速率的升高而升高,而坡度大于 25 度时,风化强度及速率随侵蚀速率的升高而降低。在剥蚀速率最高的地方,土壤直接由破碎的岩石组成。

本文研究的意义在于在构造活动强烈地区,地形的大幅抬升使得土壤侵蚀速率的增加从而抑制淋溶作用,继而抑制硅酸盐淋溶过程中释放的 CO_2 ,因而温室气体的增加可能还受到构造作用的影响。这种机制是否在降雨量高的区域或者全球范围内都存在还需要更多实验研究。

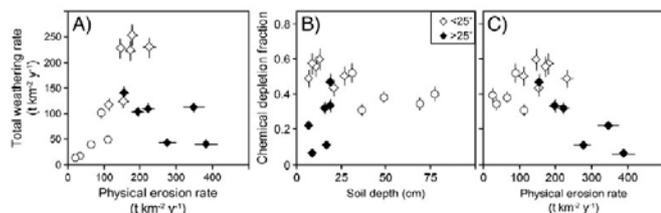


图 1 化学风化速率与侵蚀之间关系 (A), 风化淋失随土壤深度变浅 (B) 和物理侵蚀升高 (C) 而降低

Dixon, J. L., A. S. Hartshorn, A. M. Heimsath, R. A. DiBiase, and K. X. Whipple (2012), Chemical weathering response to tectonic forcing: A soils perspective from the San Gabriel Mountains, California, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 323–324(0), 40–49.

生物标志物又有新发现——伸长各向异性趋磁细菌磁小体新进展

王寅昭

趋磁细菌是一种能够在细胞内矿化合成由生物膜包裹的纳米级磁性颗粒的细菌总称。这些链状排列的磁性颗粒被称作磁小体。主要由 Fe_3O_4 和/或 Fe_3S_4 组成,并能使这类细菌沿着地磁场方向运动。目前已知的趋磁细菌主要可分为 α -、 γ -、 δ -变形菌纲、硝化螺旋菌门和暂定菌门 OP3, 这种分类方式是基于细菌基因组内 16S rRNA 序列的变异程度而界定。

研究发现,处于不同分类地位的趋磁细菌中具有不同的磁小体形态和成链方式。例如, α -、 γ -变形菌纲可以矿化合成立方八面体或六面体棱柱形磁

铁矿磁小体; δ -变形菌纲可以同时或单独合成不规则形胶黄铁矿磁小体和子弹头形磁铁矿磁小体;而硝化螺菌门趋磁细菌则主要矿化合成相对大量的子弹头形磁铁矿磁小体。由于天然合成或人工合成的磁铁矿颗粒都不具有生物矿化成因的子弹头形磁小体的伸长型特点。因此,子弹头形磁小体则成为了研究生物化石特征标志的切入点。此外,在火星陨石中发现的链状排列类似磁小体颗粒的化石更在科学界引起了一股研究趋磁细菌磁小体的热潮。本文作者主要针对当前发现的三种合成子弹头形磁小体的趋磁细菌,通过高分辨透射电镜进行了详细的研究,发现并揭示了不同子弹头形磁小体的晶体生长方式。希望能够为今后磁小体化石的鉴别提供一些参考的理论基础。

本文作者主要选用了一种 δ -变形菌纲 (AV-1) 和两种硝化螺菌门 (LO-1 和 HSMV-1) 的趋磁细菌进行研究。AV-1 分离于加利福尼亚死亡谷的一个常温碱性泉,其通常能合成两条平行排列的由子弹头形磁铁矿磁小体组成的链状结构(图 1 A); LO-1 采集于内华达州的米蒂湖,一般含有三条磁小体链(图 1 B); HSMV-1 则分离于内华达州的一个热泉,这种细菌在细胞内只合成一条单链(图 1 C)。

天然或人工合成的磁铁矿晶体一般会沿着晶体的易磁化轴生长。然而,作者通过细致的研究发现这个规律并不适用于伸长各向异性的子弹头形磁小体。磁铁矿晶体的易磁化轴方向为 $\langle 111 \rangle$, 晶体生长方向若是沿着 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 则是比较困难的。对 AV-1 和 LO-1 的研究发现(图 2): 1) 其合成的子弹头形磁小体单个晶体没有发现缺陷和孪晶,一小部分晶体的生长具有弯曲并含有一些微晶; 2) 晶体包括一个伸长的锥形和一个较短的锥形组成,短锥面较规则,轻微伸长并以半立方八面体为基底。而长锥形则包括了大部分的高指数面; 3) 晶体沿 $[100]$ 方向生长。对 HSMV-1 的研究发现(图 3): 1) 依据晶体的类型分析可知,所有颗粒全部属于磁铁矿; 2) 所有磁小体都极度伸长,并且有一个弯曲的方向; 3) 基于高分辨电镜及其傅立叶变换的结果都显示晶体的方向沿 $[110]$ 方向生长。

上述磁小体的生长情况比成比例生长的晶体复杂很多。其生长过程可能会分为两个阶段:初期生长呈现出立方八面体形并沿着长宽轴等比例同时生长;等到达了一定的大小后,磁小体的生长开始沿着一个固定的轴向,而在垂直于轴面的部分则基本不再生长。这种缺乏反转中心的磁铁矿晶体在地质和实验室合成中均尚未发现。因此,这种缺乏反转对称成熟晶体的特征可以独立作为生物矿化的标

志。而目前所有资料表明，这种两步生长的机制仍然尚未揭示。在作者研究的磁小体中，偶尔会出现一些不沿轴向生长的弯曲磁小体。这些特征只在平底的子弹头形磁小体中发现，这也暗示了这两种磁小体可能具有不同的生长机制。

目前，国内外对不同伸长型子弹头形磁小体的研究虽然较少。但作者认为这些伸长各向异性的晶体可以作为有力的生物标志，这也为探索和讨论外星球是否存在生命提供了参考依据。

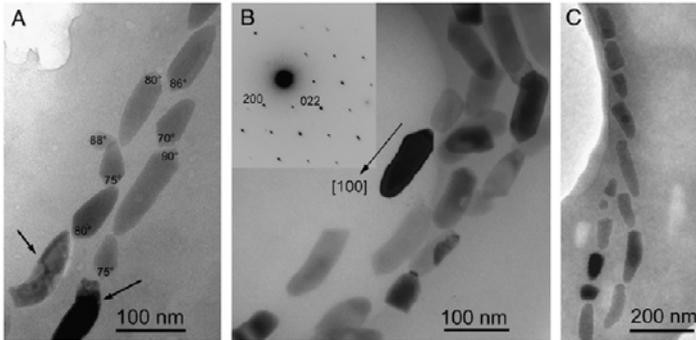


图 1 子弹头形磁小体电子显微镜照片：A) AV-1 菌株；B) LO-1 菌株；C) HSMV-1 趋磁细菌

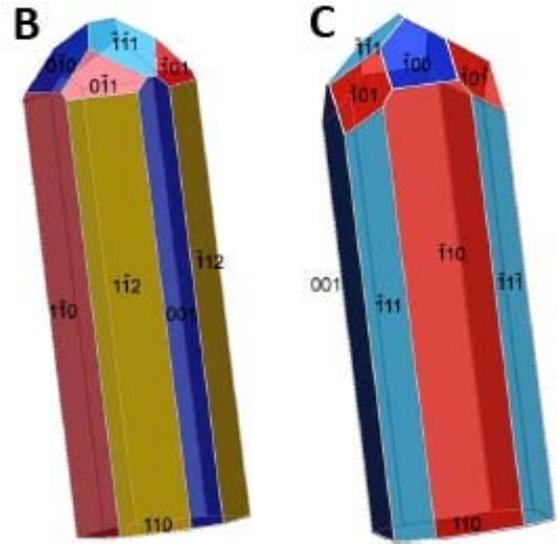
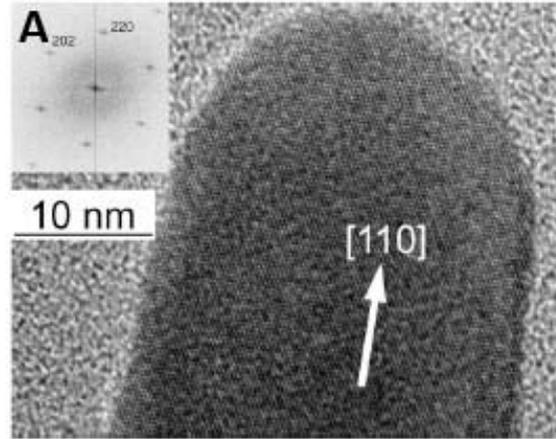


图 3 A) HSMV-1 趋磁细菌高分辨透射电镜照片；B) HSMV-1 趋磁细菌理想化磁小体形态 3D 模式图

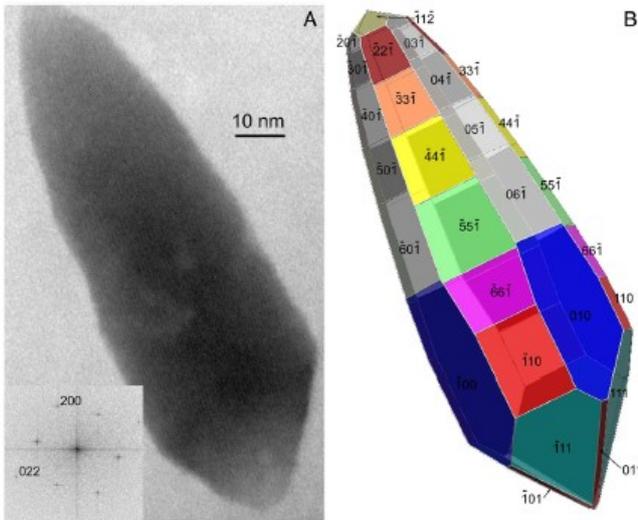


图 2 A) AV-1 菌株磁小体高分辨透射电镜照片及其傅立叶变换； B) AV-1 菌株理想化磁小体形态 3D 模式图

Lefèvre CT *et al.*, 2011. Morphological features of elongated-anisotropic magnetosome crystals in magnetotactic bacteria of the *Nitrospirae* phylum and the *Deltaproteobacteria* class. *Earth Planet. Sci. Lett.* **312**: (194-200)

文化动态

树木与土壤

李倩

《红楼梦》是我国古典小说中一部最优秀的现实主义文学巅峰之作。它出世以后，以其所具有的巨大的思想艺术力量，立刻惊动了当时与之后的社会。其中的人物更是个个形象鲜明，深入人心。林黛玉的多愁善感、心性高洁；贾宝玉的怜香惜玉、平易近人；薛宝钗的大方得体、温文尔雅；王熙凤的机智干练、快人快语；贾探春的气质脱俗、坚韧干练；秦可卿的风流多情、为人和善；史湘云的男儿作风、豪迈大方；贾政的八股做派，固执己见；袭人的忠心赤胆、为人和睦；香菱的敏而好学、温顺大方；……。

然而，人的性格、思想、能力等方方面面特点的形成绝不是一个偶然的过程。人的特性形成与生活环境和具体境遇有着深刻的关系。红楼梦中的各个人的特点都是其自身所处的社会特性和生活环境所决定的，所有人物都以其性格表现出他们各自的人生经历及成长环境。可以说人在很大程度上是一定历史环境下的人，是一定社会制度下的人，是一定社会环境下的人。人与社会环境的关系就像树木与土壤的关系，人的成长离不开社会环境的滋养和哺育。时势造英雄说的是人与环境的关系，“英雄无用武之地”说的也是人与环境的关系。可以说每一个人的成长都与社会环境息息相关。

虽然很多历史条件和社会环境的束缚让我们每个人都难以摆脱，但这并不意味着我们无所作为。相反，我们更应该珍惜身边有限的资源，充分利用这些资源来开发我们的智慧潜能，使自己的才能得到全面而自由的发展。只有合理利用环境，完善环境，才能做到人尽其才。

身在古地磁与年代学实验室的我们可以利用的最好的科研资源便是我们的实验室。实验室拥有国际先进水平的、测试手段齐全的设备和完全开放的运行与自主研究的模式，良好的科研环境和创新的实验方法都是我们最宝贵的财富。如何结合自身情况充分利用在实验室中学习的几年时间使自己发现问题以及通过实验解决问题的能力得到提高是我们每个实验室成员应该认真思考的问题。希望我们实验室的每个成员不仅在科研上，而且在思想道德素质、能力、个性、身心上都得到充分的发展。

然而，作为社会的一员，我们在发展自身的同时，更不要忘了，也不能忘了社会中还有千千万万的人生活在社会的边缘的地带，不要忘了他们生存的社会环境是多么的恶劣，多少人的正当利益被剥夺，多少人的权力难以得到保障。农民、农民工、底层知识分子等，一大批为社会做出巨大贡献的人的生存被社会所忽视。他们的生存和发展应该得到社会的重视，他们的权力应该从体制上得到保证。作为未来社会中的知识分子，我们是社会前进的一股力量，我们有义务为社会的进步做出贡献。让我们背起责任的担子，将自身的才能与力量用于促进社会的民主化的进程之中，让更多人在良好的社会环境中充分的发展自己。

实验室新闻

春初夏始，百花怒放，又是一年毕业季。黄晟、苏有亮及唐祥德分别顺利通过博士和硕士答辩。在此表示祝贺，另外值得祝贺的是：我研究小组刘青松研究员荣获 2012 年度中国科学院青年科学家奖。此外，欢迎张同伟加入生物地磁研究小组，同时欢迎易亮博士后进站，成为古地磁实验室的一员，合作导师为邓成龙研究员。热烈祝贺郑妍博士后顺利出站，前往古脊椎动物与古人类研究所工作。

2012. 5. 12 姜兆霞前往直利莫利塞大学，进行纳米赤铁矿的合成及富含水铁矿的天然剖面样品的采集等工作。同月 18 日，葛坤朋回到了北京，结束了三个月充满了学术交流和思想碰撞的英伦之行。5 月 19 日—5 月 25 日潘永信老师邀请香港大学李盛华老师来实验室进行交流。

6 月 7 至 8 日，刘青松老师应邀参加了第二届中法研发与创新合作机构交流会。6 月 25 日潘永信老师应张可可老师之邀前往英国 Exeter 大学，之后前往 Leeds 大学 (University of Leeds) 参加会议。

编后语

PGL-Letters 期刊为古地磁与年代学实验室季刊，为非正式发行，仅供同行业人员内部讨论交流。所刊内容，稿件作者负责。本刊面向同行业人员进行征稿，同时欢迎其它科研小组来信来稿。

《PGL-Letters》将包括以下栏目：

期刊首语

人物介绍（在地磁学方面做出贡献的专家以及实验室人员介绍）

专题介绍（每期设置一主题）

文献导读（地学领域最新文献简介）

研究进展（包括本实验室最新的研究进展，成果总结等）

Seminar 专栏（包括来访报告者及其报告内容简介等）

实验专栏（包括仪器使用，方法改进，实验心得等）

重点连载（包括教学专栏，文献综述的连载等）

疑难问答（主要是专业问题的交流探讨）

文化动态（该部分内容较为灵活，包括实验室组织的活动图片，生活感悟等抒发胸臆或看法等方面的小篇幅文字）

责任编辑：刘青松 邓成龙 张春霞

美工：张春霞

本期特约编辑：胡鹏翔 刘志峰

电话：010-82998365, 82998087, 82998010

Email:

qslu@mail.iggcas.ac.cn;

cldeng@mail.iggcas.ac.cn

cxzhang@mail.iggcas.ac.cn

实验室网页：

<http://www.paleomag.net>

PGL-Letters 电子版下载地址：

打开实验室网页 www.paleomag.net

然后点击左下角 进入中文版>>>, 在网页中下部的‘知识与资料’专栏中，点击‘PGL-Letters 期刊’

联系地址：

北京市北土城西路 19 号

中国科学院地质与地球物理研究所

古地磁与年代学实验室 北京

邮编：100029

