

环境磁学

张卫国

当我们去旅游时,江西是红色之旅的重要省份。江西被称为红土地,一方面它是我国著名的革命老区,另外一方面该省地表大面积分布着外观为红色的土壤(称为红壤),红色的由来与红壤中含有的赤铁矿有关。近几年媒体报道的有人在黄河郑州段泥沙中非法淘铁,利用磁铁吸取的黑砂,则含有大量的磁铁矿。在我们的周围,上述与铁有关的物质不胜枚举,之所以如此,是因为铁是地壳中丰度第四的元素,它在环境中广泛存在。以磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿、磁黄铁矿、胶黄铁矿等为代表的含铁的氧化物、硫化物,从磁学的观点,属于磁性较强的亚铁磁性物质以及具有高矫顽力的反铁磁性物质,可以较为容易地被磁学方法加以检测,因此地球科学工作者就把采集到的湖泊、海洋、河流沉积物以及土壤、岩石、大气悬浮颗粒物等物质,在野外或实验室内人为施加以磁场,观察这些物质表现出的宏观磁学性质,获得这些物质中所含的磁性矿物的类型、含量和颗粒大小等信息。样品的磁学特征一定程度上反映了物质来源、搬运过程、岩石风化成土过程、成岩作用、人类活动等综合信息,因而具有环境指示意义。环境磁学即是一门以磁性测量为核心手段、磁性矿物为载体,通过分析物质的磁性矿物组合和特征,以揭示不同时空尺度的环境作用、环境过程和环境问题的边缘学科。

早在 20 世纪 20 年代,瑞典科学家古斯塔夫·伊辛(Gustav Ising)就将磁学方法运用到瑞典冰川环境中湖泊纹层沉积物的表征。他发现春季堆积的沉积物磁性要强于冬季的沉积物,他将其归因于冰川河流水量的季节性差异,春季由于冰川融水,河流水量大增,因而能够携带更多的磁铁矿进入湖泊,以后的研究表明,磁性强弱的变化原因并非如此简单。但环境磁学作为一门学科的形成,与英国科学家的工作更为密切。20 世纪 60 年代,约翰·麦克斯勒(John Mackereth)测量了英国温德米尔(Windermere)湖沉积物磁性特征,他发现该湖沉积物的天然剩磁能够记录地球磁场长期变化,因而可用于沉积物的古地磁定年,对于全新世沉积物的¹⁴C 测年方法是有益的补充。20 世纪 70 年代早期,

后来成为爱丁堡大学教授的地球物理学家罗伊·汤普森(Roy Thompson)继续了这一湖泊沉积物的古地磁定年工作。在这一时期,以孢粉和植被演化历史为学术生涯开端,后来成为利物浦大学 John Rankin 地理学教授的弗兰克·奥德菲尔德(Frank Oldfield)教授正利用湖泊及其流域为单元开展生态学研究,其中之一是探讨北爱尔兰内伊(Neagh)湖泊富营养化成因的人类作用因素。为解决该湖沉积物的年代,他与罗伊·汤普森开展了合作,这一合作真正开启了环境磁学研究的大门。他们发现,内伊湖泊中不同样芯磁化率的垂向变化具有相似性,可用于样芯的层位对比。对于磁化率波动的原因,通过与反映流域植被破坏和土壤侵蚀的指标对比,他们认为来自流域侵蚀的钛磁铁矿是控制湖泊沉积物磁化率高低变化的原因,当流域土壤侵蚀强时,更多的陆源磁性矿物被带入湖泊中,导致磁化率的升高。两位创始人在磁学方法及其地球科学应用方面的相互补充和合作,有力地推动了该学科的发展。1980 年罗伊·汤普森等发表于 *Science* 杂志的《Environmental applications of magnetic measurements》一文,列举了磁性测量方法在湖沼学、水文学、地貌学、地球物理学等领域有关环境问题研究中的应用,可谓对环境磁学的一种注释。1986 年第一本环境磁学专著 *Environmental Magnetism* 出版,对环境磁学的仪器、原理和应用作了较为系统的介绍。尽管其历史不长,它的发展却异常迅速。迄今为止,环境磁学的研究对象涵盖了地球岩石圈、土壤圈、水圈和大气圈中的岩石、土壤、沉积物、悬浮泥沙、飘尘、降尘等物质,在样芯对比、物质来源鉴别、泥沙运移示踪、流域生态环境演替、古气候和古环境研究、土壤发生学、环境污染、油气勘探、考古等领域得到了广泛应用。某些参数,如磁化率,已被视为全球变化研究的重要指标。由于含铁物质是环境物质的常见组分,意味着环境中几乎所有的物质都可以从磁性的角度加以研究。磁性矿物虽然普遍存在,但通常含量极低(ppm/ppb 级),用常规矿物分析手段(如 XRD)难以鉴别,但一些先进的磁学仪器却能够较为容易

地加以检测。此外，磁性测量方法快速、简便、经济，样品一般无须预处理，室温及低温磁性测量对样品不具破坏性，不影响后继分析，这一特点对快速获取大范围、高分辨率的环境信息尤其吸引力。

环境磁学的发展，既是学科交叉的产物，也是科学和技术有机结合、相互促进的范例。磁化率是环境磁学的基础参数之一。随着环境磁学的发展，为了满足野外和室内分析所需要的灵敏磁学仪器要求，杰弗·巴廷顿（Geoff Bartington）于1978年开始研制MS2磁化率仪。据弗兰克·奥德菲尔德教授回忆，当时他和杰弗·巴廷顿讨论了新的磁化率仪所要具备的功能，但困难是杰弗·巴廷顿的上司不支持这一制造新仪器的想法，此外，杰弗·巴廷顿也缺少资金去购买基本器件和材料。弗兰克·奥德菲尔德教授把他一个不足400美金的项目经费的大部分钱给了杰弗·巴廷顿，以支持他的仪器研制。经过多次的试制，最终诞生了具有测量两个不同频率磁化率的MS2磁化率仪（图1），并于1985年成立了巴廷顿仪器公司。这一仪器配备了不同的探头，轻巧灵便，可在野外和室内进行测量，目前在世界范围内得以广泛使用。其双频磁化率测量功能，可以检测单畴和超顺磁界限附近的细粘滞性磁性颗粒，这些磁性颗粒在土壤中一般是成土作用的产物，这为利用中国黄土-古土壤系列的磁学研究进行古气候、古环境重建发挥了重要作用。20世纪80年代，弗里德里希·黑勒（Friedrich Heller）和刘东生院士发现我国黄土高原深厚的黄土-古土壤序列的磁化率总体上表现为古土壤高，黄土低的特征，其波动可与赤道太平洋深海沉积物氧同位素曲线进行很好的对比，由此表明，黄土-古土壤磁化率与古气候波动有着显著关联，可作为指示古气候变化的一个指标。但是对于古土壤磁化率增强的机制，存在不同的看法。弗里德里希·黑勒等提出了碳酸盐淋失和压实作用的解释，乔治·库克拉（George Kukla）等提出了稀释假说，认为黄土高原由大气沉降到黄土中的磁性颗粒通量是恒定的，但冰期时由于黄土粉尘堆积加快，稀释了冰期黄土沉积中磁性颗粒的含量，从而导致黄土沉积物具有较低的磁化率。由于双频磁化率仪的诞生，检测出黄土-古土壤中存在成土作用产生的超顺磁磁性颗粒（约20 nm左右的磁铁矿/磁赤铁矿），因而认为我国黄土高原黄土和古土壤磁化率的差异主要是冰期-间冰期成土作

用的差异所致，这一认识目前已被广泛接受。芭芭拉·马埃尔（Barbara Maher）等进一步认为，古土壤磁化率的增强主要是受降水影响，因而认为通过黄土磁化率的测量，可以定量恢复地质历史时期的降水情况。尽管黄土磁性特征与气候的关系远非简单的线性现象，但我国黄土磁学的深入研究，对世界其他地区的黄土研究起了积极推动作用。除了利用黄土磁性特征进行古气候、古环境重建外，湖泊和海洋沉积物也是重要古环境研究的良好载体。



图1 巴廷顿公司生产的MS2磁化率仪，体积小，配以野外探头，可在野外使用

在环境磁学发展的早期，湖泊沉积物中的磁性矿物被认为是来自流域的陆源碎屑矿物，随着研究的深入，湖泊沉积物的早期成岩过程和自生作用，会改造和破坏陆源碎屑磁性矿物，并形成次生的磁性矿物，说明磁性矿物的成因更为复杂。一方面它使得利用湖泊沉积物磁性特征解释流域土壤侵蚀变得复杂起来，但另外一方面，沉积物磁性矿物的变化还可以用来说明水体生产力以及水体溶解氧状况的变化，拓宽了环境磁学的环境指示意义。20世纪70年代初，当时还是马萨诸塞州立大学研究生的理查德·布莱克莫尔（Richard Blakemore）在显微镜下观察到了沉积物中能沿地球磁场方向游动的趋磁细菌，这一成果于1975年在*Science*杂志报道后，磁性矿物的生物矿化引起了极大的关注。趋磁细菌一般在水体或沉积物的氧化-还原界面附近分布，体内合成的磁性颗粒（包括磁铁矿 Fe_3O_4 和胶黄铁矿 Fe_3S_4 ）通常呈链状排列（图2），相当于在细菌体内产生一个小磁针，它能感应地球磁场，使得细菌沿着地球磁场方向排列，并向适合趋磁细菌生长的最佳的氧浓度区域移动，目前趋磁细菌及其合成的磁性颗粒在海洋、河口、湖泊等不同环境中得到了广

泛证实。火星上有没有生命？对采自南极洲的火星陨石 ALH84001 矿物学研究，有人认为其中的磁铁矿类似于地球上细菌合成的磁铁矿，并将之视为火星上存在生命的重要证据。尽管这一论点引起了激烈的争议，但有关磁性矿物的生物矿化研究正愈益深入。

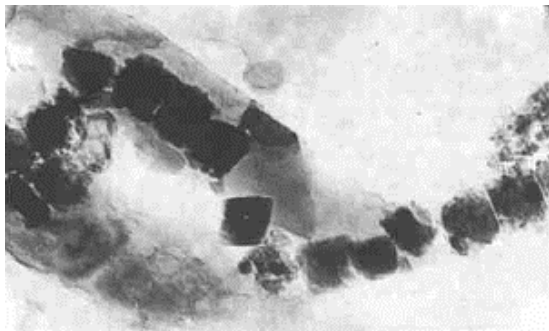


图2 赤道东太平洋表层沉积物中保留的细菌成因的、链状排列的纳米粒级磁铁矿
(部分颗粒受次生作用影响破碎化，单个颗粒约 60 nm 长)

磁性颗粒除了自然界的有机或无机合成外，人类活动释放出的污染物质也是其重要来源之一。在环境磁学发展的早期阶段，环境污染监测就是其应用的重点领域之一。如化石燃料高温燃烧过程中可以生成球形的磁性颗粒(图3)，一旦释放到环境中，会造成大气飘尘、降尘和土壤中磁性明显增强。弗兰克·奥德菲尔德等首先利用高位泥炭沼泽的磁性特征，来揭示排放到大气中的工业活动释放磁性颗粒的变化，并进而反映工业化进程对大气环境影响。不少研究揭示出发电厂附近土壤、钢铁厂污水排放口附近的沉积物中磁性矿物含量明显升高。在城市地区，受燃煤、汽车尾气、轮轨摩擦等影响，街道降尘、大气悬浮颗粒物等往往含有人类活动的磁性颗粒，因而显示出较强的磁性特征来。由于行道树的广泛分布，树叶就成为天然的灰尘收集器，因而通过采集树叶，进行磁性测量，就可以获得一个城市大气颗粒物污染的空间分布特征。不少研究注意到，磁性参数与重金属、有机污染物等往往存在密切的相关性，显示了磁性参数作为污染物替代指标的潜在价值，并成为当前环境磁学发展的重要方向之一。

此外，对河流、海洋和湖泊悬浮泥沙和沉积物进行磁性测量，可以进行泥沙来源判别。除了直接对样品进行测量外，通过人工灼伤泥沙进行磁性增

强，再施放到河流中以追踪泥沙运动，在小的河流系统中得到了应用。基于发育完整的土壤剖面的磁性特征的认识，一旦土壤侵蚀，所残留的土壤剖面的磁性特征将发生变化，因而可以用于土壤侵蚀研究。在油田区域，烃类物质通过裂隙向地表运移过程中产生的地球化学反应，可使得受烃类渗漏影响显著区域的磁性特征不同于周边区域，因而可以用于油气勘探。同样道理，考古遗址地区往往由于火烧等人类活动，土壤磁性矿物会产生变化，因而可以指示考古遗址的存在。类似的，深海沉积物中的大陆冰筏碎屑以及火山灰信息提取，大气中的悬浮颗粒物来源判别等，环境磁学也是有效手段之一。

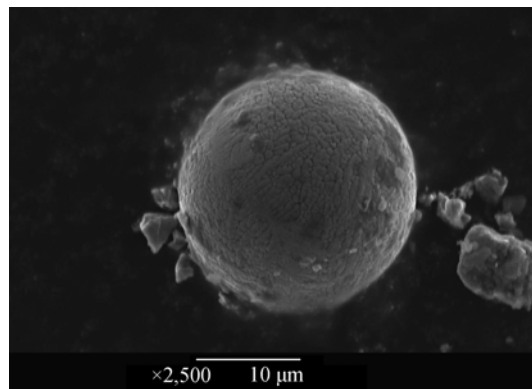


图3 上海街道灰尘中来自燃煤释放的磁性颗粒

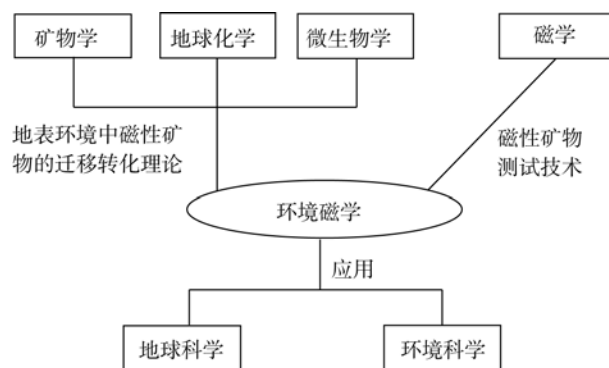


图4 环境磁学与相邻学科的关系

上述环境磁学的应用，都是基于样品中所含有的磁性矿物，进而挖掘磁性矿物生成、转化背后所蕴含的环境信息。本质上，环境磁学是从矿物磁性的角度认识地表环境中铁的生物地球化学过程及其在地球科学和环境科学中的应用(图4)，它的发展历程，显示了学科交叉的生命力。人们注意到，磁学方法在地球科学中的应用，早于环境磁学的是古地磁学和岩石磁学，并对 20 世纪 60 年代的板块构(下转 19 页)

的。这种裁决首先来自日本的超级神冈探测器。1998年，超级神冈探测器通过检测宇宙线在地球大气层中产生的 μ 子中微子与电子中微子的相对数目，首次直接证实了中微子振荡的存在。在太阳中微子研究中，神冈系列探测器可谓居功至伟，占据了不止一项第一。除首次直接证实中微子振荡外，我们在上节中提到的它能测定中微子入射方向这一特点（它对中微子振荡的证实也有赖于这一特点），还使它成为了第一个直接证实太阳中微子来自太阳方向的探测器（此前的其他探测器都只能从数量上间接推断中微子来自太阳，因为其他来源都不可能如此巨大）。

不过超级神冈探测器在证实中微子振荡时所观测的并不是太阳中微子，而是能量远高于太阳中微子的由宇宙线产生的中微子。因此对于解决太阳中微子问题来说还不够一锤定音。那么，对太阳中微子问题一锤定音的裁决来自哪里呢？来自加拿大的萨德伯里中微子观测台。这座位于等效水深6000米处的观测台有一个与以往任何探测器都不相同的特点，那就是可以探测所有类型的中微子，从而既验证标准太阳模型的预言，又检验中微子振荡。

2001年，萨德伯里中微子观测台发布了观测结果，非常漂亮地显示出中微子的总流量在实验精度范围内与标准太阳模型相符，而电子中微子所占的比例，则与中微子振荡所预期的一致。

这样，太阳中微子之谜就被解开了，谜底就是中微子振荡。在标准太阳模型与粒子物理标准模型的对决中，居然是标准太阳模型取得了胜利，这让很多人跌破了眼镜。此后，人们又通过大量其他实验（包括使用来自加速器及核反应堆的中微子）进

一步证实了中微子振荡。经过如此曲折的努力，我们终于完成了为恒星核聚变理论收集进一步证据的工作，使这一理论得到了牢不可破的确立。

2002年，那位半个世纪前被审稿人揶揄过的“站在山顶上，用自己的手去碰月亮”的太阳中微子探测先驱戴维斯以88岁的高龄，与超级神冈探测器的“头领”，日本物理学家小柴昌俊一同荣获了诺贝尔物理学奖。

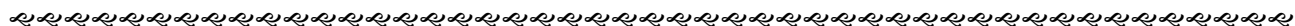
2004年，戴维斯当年的合作者、太阳模型专家巴克尔撰写了一篇评述太阳中微子问题的文章。在文章的末尾，他这样写道：

当我回顾过去40年在太阳中微子研究领域所取得的成就时，我感到了惊讶。由数以千计的物理学家、化学家、天文学家和工程师组成的国际团队用他们的合作，展示了通过统计地下矿井里一个盛满纯净液体的游泳池里的放射性原子的数目，就能告诉我们有关太阳核心的重要事实，以及被称为中微子的奇异基本粒子的性质。若非亲身经历了太阳中微子的传奇，这对我来说将会是难以置信的。

一段传奇虽已落幕，但有关中微子还有许多值得人们探索的地方，比如中微子的质量从何而来？中微子的质量与电子等粒子的质量是否是同一类型？等等。一个小小粒子尚且有如此多的奥秘，更何况太阳呢？因此大家不要离开，我们的太阳故事还将继续。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页：<http://www.changhai.org>



（上接 22 页）造学说的提出作出了巨大贡献。为何环境磁学的发展直至弗兰克·奥德菲尔德教授的介入才得以诞生呢？也许是古地磁学在地球科学中所取得的巨大成功，使人们专注于古地磁学的研究，而忽略了磁性矿物作为地球磁场载体之外的其他用途。弗兰克·奥德菲尔德教授从自身的学科背景和研究兴趣出发，洞见了磁性矿物的更为广泛的应用价值。可以预见，地球

化学、矿物学和磁学、微生物学的结合，以及我们面临的地球科学和环境科学问题，将是未来环境磁学不断向前发展的动力。随着大家对古环境演变、物质来源追踪、环境污染、生物矿化等问题的关注，环境磁学在上述领域中将会发挥积极的作用。

（上海华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 200062）