

# 生物地球物理学的产生与研究进展

潘永信\*, 朱日祥\*

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 100029

\* 联系人, E-mail: yxpan@mail.iggcas.ac.cn; rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

2011-03-17 收稿, 2011-05-09 接受

国家自然科学基金创新研究群体项目(40821091)和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划(KZCX2-YW-T10)资助

**摘要** 地球庞大的生物群落广泛地参与了岩石圈浅层、水圈和大气圈的物理和化学性质的改造过程. 认识生物圈及其与其他各圈层相互作用, 具有重要的地球系统科学意义. 近年来, 随着生物地球科学的发展, 地球物理学方法和技术开始被应用于地质微生物改造作用、地球物理场对生物的影响等研究, 从而产生了生物地球物理学这一新的交叉学科. 本文评述了生物地球物理学的产生和一些最新研究进展, 旨在促进生物地球科学的发展与深化.

## 关键词

生物地球物理学  
生物地磁学  
地质微生物改造作用

地球是目前太阳系乃至整个宇宙唯一发现有生命的行星. 大约在 35~38 亿年前地球诞生了生命. 现今的地球生物圈涵盖了从岩石圈顶部、水圈至大气圈底部的广阔空间. 在地球演化长河中, 火山活动、海平面升降、气候变化、岩石圈板块运动等地球环境变化强烈地影响着生物的起源、进化与多样性演替<sup>[1,2]</sup>. 各种生物也广泛地参与了岩石圈、水圈和大气圈的物理和化学性质改造过程. 例如, 地质微生物在矿物形成和风化, 元素迁移和富集, 以及全球碳、氮、磷、硫等元素循环中起了重要作用, 参与了前寒武纪的条带状铁建造(BIF)沉积、古海洋化学性质改造、大气氧生成等一系列重要地质事件<sup>[3~7]</sup>. 因此, 研究生物圈对地球的改造作用是地球系统科学研究的重要内容<sup>[8~10]</sup>. 20 世纪末期, 地球科学与生物学交叉诞生了生物地球科学(Biogeoscience), 已先后形成了生物地球化学(Biogeochemistry)和生物地质学(Biogeology)学科<sup>[4,11~13]</sup>. 生物地球化学主要研究生物参与岩石圈、水圈和大气圈中的碳、氮、硫、磷等元素循环和改造作用. 生物地质学侧重研究地球生物圈与岩石圈相互作用涉及的地质过程、生物成矿等. 近年来, 随着生物地球科学发展, 地球物理学与生物学交叉的生物地球物理学(Biogeophysics)正在形成<sup>[14]</sup>.

本文主要评述生物地球物理学的形成, 重点介绍生物地球物理学在地质微生物改造和生物地磁学两方面的研究新进展. 本文旨在抛砖引玉, 进一步推动生物地球物理学研究的发展.

## 1 生物地球物理学的形成及研究内容

由于地质微生物学、生物地球化学和生物地质学等研究的范围多局限于地表和有限的钻孔资料, 难以全面认识地下微生物的改造作用. 在过去几年中, 研究人员开始将探测范围更大的地球物理学方法和技术应用于地下微生物改造作用研究<sup>[14]</sup>. 地磁场对生物的影响, 如动物地磁导航、地磁极性倒转对生物进化影响等取得了许多新进展<sup>[15]</sup>. 自 2005 年开始美国地球物理联合会(AGU)会议专门设立了生物地球物理学专题. 2008 年 10 月, AGU、美国国家自然科学基金会和能源部共同资助召开了首届生物地球物理学国际会议, 来自美国、法国、丹麦、中国、德国等国家的 60 多位地球物理学家、地球化学家、地质和环境微生物学家, 共同讨论了生物地球物理学研究进展. 这些在一定程度上标志着生物地球物理学的诞生.

生物地球物理学的研究方向包括: 通过定量的地球物理信号/异常研究微生物活动对地球浅层介质

的各种改造作用、探测极端环境中的生命,认识地球物理场对生物的影响,以及研究全球气候变化引起的生态响应等.具体来讲:①地质微生物改造作用:利用电学和磁学等地球物理信号/异常,揭示地下的地质微生物活动、微生物-矿物相互作用、生物气形成、微生物参与的金属矿物沉淀、元素循环等(见本文第2节);②地球物理场对生物的影响:生物的繁衍生息都是在地球物理场如地磁场、重力场、温度场和大地电场中进行,并从中受益.有关地磁场对生物的影响方面的研究进展见本文第3节;③全球气候变化:通过研究与气候相关的地表反照率、蒸发量和地表光滑度等地球物理变量,结合生物地球化学变量,研究全球变化的驱动力及效应(见本文第4节).此外,生物地球物理学技术还可应用于监测工业场地污染物的微生物修复、探测深部生物圈资源和寻找地外生命等多个方面.

生物地球物理学研究的基本科学问题有:地质微生物本体、它们新陈代谢活动及其产物的地球物理信号/异常特征是什么?哪些地球物理学方法和技术适合研究地质微生物分布、活动及其改造作用?哪些地球物理变量具有生物敏感性?地球物理场如地磁场变化对生物产生怎样影响?哪些地球物理方法和技术可用于探测深海、冰盖之下等极端环境中的微生物资源?哪些地球物理技术可用于地外生命探测等等.

## 2 地质微生物改造作用研究

地质微生物(包括细菌、古菌等原核生物)的细胞、生物膜生长、新陈代谢及其产物,都可对寄主岩石和矿物的物理性质产生不同程度的改造作用,如促进矿物的溶解/沉淀、元素循环、氧化还原性质改变等.这些物理化学性质的变化往往能够通过某些生物地球物理方法进行监测和研究,这正是生物地球物理研究地下微生物改造作用的基础和前提.生物地球物理学研究的突出优势是其非侵入性、快速、大尺度、高分辨率和实时监测.

近年来,作为研究地质微生物及其改造作用的新途径,生物地球物理学开始展现其研究特点和前景.

### 2.1 地质微生物对岩石物理性质的改造作用

地质微生物分布十分广泛.从高山、表土到地壳数公里之下,从大洋底部极热的热液口和洋中脊黑烟囱到极冷的极地冰盖下,从淡水到极咸水环境都

有分布.极端环境微生物还具有极强的耐盐、耐酸碱、耐压和耐辐射能力.据估算,现今地球上原核生物的数量和含碳量分别高达到 $(4\sim6)\times 10^{30}$ 细胞和 $(350\sim550)\times 10^{15}$ g;碳储量约占到了地球生物总碳量的1/2,还含有 $(85\sim130)\times 10^{15}$ g的元素氮和 $(9\sim14)\times 10^{15}$ g的元素磷,原核生物的生长和繁殖能力更是高达 $1.7\times 10^{30}$ 细胞/a<sup>[16]</sup>.因此,地质微生物群落不仅是人类可利用的重要生物质资源<sup>[17]</sup>,而且是认识地球碳、氮、磷等元素循环的重要研究对象.

在地下浅层中地质微生物几乎“无处不在”、“无孔不入”.它们通常附着在矿物表面.由于微生物细胞的比表面积大,对物质的吸收和转化快,它们对寄主矿物的改造作用十分显著<sup>[18-20]</sup>.寄主矿物提供地质微生物所需要的各种营养成分、新陈代谢能量.地质微生物新陈代谢活动产生的有机酸、生物气和生物表面活性剂又促使寄主矿物发生元素迁移和同位素分馏、改变岩石孔隙流体的氧化还原电位(Eh)和酸碱度(pH)、导致寄主矿物溶解和新矿物的生成等.微生物主要通过氧化还原反应获得维系生命所需的能量.通常情况下,微生物在其新陈代谢中利用氧气、硝酸盐、四价锰氧化物、三价铁氢氧化物、硫酸盐或二氧化碳作为电子受体(指接受电子的物质),将这些物质还原;相反,另一些物质如甲烷、二价铁离子、硫化物等作为电子供体(指提供电子的物质)被氧化.研究发现,许多金属和非金属矿物是在地质微生物作用下形成的,包括一些常见的铁质矿物,如磁铁矿、菱铁矿、针铁矿、胶黄铁矿、水铁矿等.根据前寒武纪BIF和伴生的黑色页岩的C-S-Fe体系存在显著的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{33}\text{S}$ 同位素异常,研究人员推测异养的铁还原细菌和硫酸盐还原细菌可能参与了当时海洋中元素化学循环和BIF形成<sup>[7]</sup>.

### 2.2 生物地球物理学研究地质微生物改造作用

利用地球物理学方法研究地质微生物改造作用的基本思路如图1所示.

微生物细胞的生长、繁殖,生物膜形成,以及新陈代谢活动的产物可造成寄主岩石孔隙堵塞、孔隙形态和孔径改变,导致孔隙率、渗透率和导水性的降低.由于微生物细胞表面常带有负电荷,生物膜可导致矿物颗粒导电变化或溶液出现非均匀性,从而产生自然极化.微生物新陈代谢活动生成的生物气(如 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$ 等)、有机酸和生物表面活性剂,可导

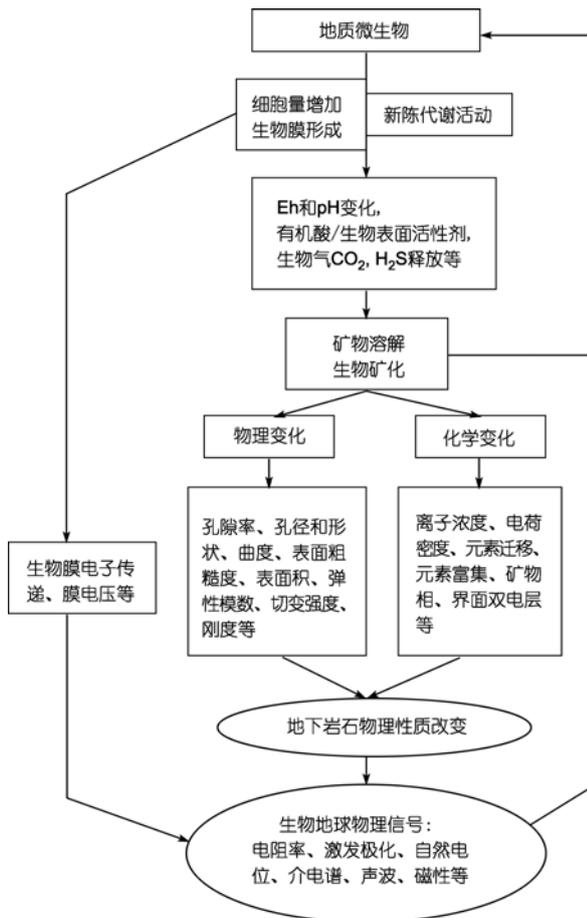


图1 地质微生物的改造作用及与其相关的生物地球物理信号  
根据文献[14]修改

致部分矿物溶解、加快岩石风化速率和引起地质流体物理化学性质的显著变化。这些改造作用会导致岩石的电阻率、激发极化、自然电位、复电导率和声波等地球物理信号出现异常<sup>[21-28]</sup>。例如，硫酸盐还原细菌 *D. vulgaris* 诱导的硫铁矿(FeS)沉淀过程，会造成复电导率的明显变化<sup>[29-31]</sup>。细菌还可以通过细胞外的纳米线传递电子<sup>[32]</sup>。地质微生物的改造作用可以降低洋壳玄武岩的载磁能力，或增强沉积岩的磁性<sup>[33,34]</sup>。

目前应用于地质微生物改造研究的生物地球物理方法包括<sup>[14]</sup>：(1) 电阻率法：测量直流电导率( $\sigma_{DC}$ )等，研究地质微生物生物降解或生物膜；(2) 探地雷达(GPR)：获得 1 MHz~1 GHz 电磁能的幅值和到时，测量介电常数( $\epsilon_r$ )和 $\sigma_{DC}$ ，分析生物气、生物降解；(3) 激发极化法/频谱激电/介电谱：测量电流脉冲关断后电势衰减和复阻抗(nHz-kHz)的频率依赖特性，测量参数包括面极化引起的时间延迟和强度，分析生物

矿化作用、细胞性质(膜电势)和生物膜；(4) 磁学方法：测量磁化率和岩石剩磁性质，分析细菌矿化及其铁氧化物或铁硫化物产物对沉积剩磁和环境磁学记录的贡献；(5) 地震波方法：测量介质的弹性波速( $V_p, V_s$ )和衰减，研究生物矿化作用、生物工程改造土壤性质、生物气；(6) 自然电位法：测量电化学电位差、氧化还原电位差、流动电位等，分析生物-地电池和生物降解等。

### 2.3 工业污染场地微生物修复的监测

微生物修复是利用微生物对工业污染物的改造作用而降解污染物。它具有费用低、易操作、无二次污染等优点，因而在烃类、核废料等工业场地污染治理中得到较多应用<sup>[35]</sup>。生物地球物理学可揭示地下微生物活动，为污染治理方案的制订和调整、修复效果评价等提供依据。

由于受烃类污染的含水层中有大量的碳源，为微生物修复提供了有利条件。微生物的繁殖能够利用烃类有机碳作为新陈代谢的电子供体，从而降解烃类污染物。微生物活动还导致含水层岩石的孔隙度、颗粒粗糙度、孔隙流体化学性质、氧化还原梯度等发生变化。这些微生物降解烃类污染物的过程能通过地表地球物理技术(电导率、电化学势、地质雷达观测)进行研究<sup>[35]</sup>。在缺乏有机质碳源情况下，地下环境修复还可以通过向地下注入微生物需要的营养物质，促进目标区微生物繁殖而进行修复。图 2 给出美国能源部科罗拉多州的 Rifle 地点醋酸刺激微生物修复地下水中铁和硫酸盐污染<sup>[28]</sup>。醋酸注射前后极化相位的反演结果表明微生物改造区域存在明显的相位异常。这些变化与细菌还原铁和硫酸盐，以及硫化物沉淀作用有关。在相位异常区，微生物代谢过程产生 Fe(II)离子富集和细胞表面 FeS 纳米颗粒沉淀，降低了流体-矿物界面电阻，造成激发极化信号的显著增强。

已有研究表明，生物地球物理学开辟了地质微生物改造作用研究的新途径。综合地质微生物学、生物地球化学和生物地质学，开展野外多参数观测和实验模拟的生物地球物理学研究，将极大地增强认知地下地质微生物改造作用的能力。

## 3 生物地磁学研究

在地球物理场对生物的影响研究中，地磁场对

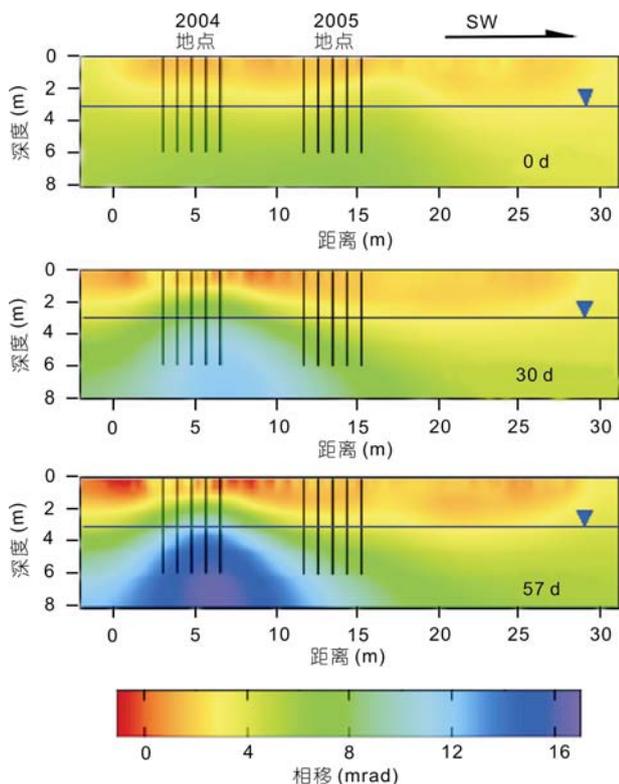


图2 美国能源部科罗拉多州 Rifle 地点的醋酸刺激微生物修复的激发极化(IP)观测结果

资料引自文献[28]. 在2条30 m长、相互垂直剖面上, 采用偶极-偶极装置, 1 m 间距布设铜/硫酸铜电极, 4 m 测量间距采集数据. 图中给出0, 30 和 57 d 时 IP 数据(0.125 Hz)的相位(j)反演结果, 表明在醋酸注入后微生物刺激区出现明显正相移. 图中“2004”和“2005”地点分别针对铁和硫酸盐还原细菌实验, 横线指示潜水面

生物的影响备受人们关注<sup>[36-39]</sup>. 地球上生命起源可能与地磁场的存在有关. 地磁场保护着地球生物圈免遭有害的太阳风和其他宇宙射线袭击, 也对地球生物赖以生存的大气圈起着重要的约束作用<sup>[36]</sup>. 从现今地球磁层结构图清楚可见, 地球磁层在向太阳一侧因受到太阳风的作用而呈似半椭球的顶面(像一把“巨伞”), 磁层顶距地心的距离在太阳平静期约为  $10 R_E$ (地球半径), 而在太阳剧烈扰动期则被压缩至  $6\sim 7 R_E$ <sup>[37]</sup>(图3).

生物地磁学(Biogeomagnetism)是地磁学与生物学的交叉, 其研究目标是认识地磁场对生物的影响. 根据学科发展的趋势, 中国科学院地质与地球物理研究所创建了生物地磁学实验室, 并于2008年联合中国科学院海洋研究所等4家科研单位和法国科研中心等5家研究机构, 组建了“中-法生物矿化与纳米结构联合实验室”, 率先开展了生物地磁学和生物矿化研究.

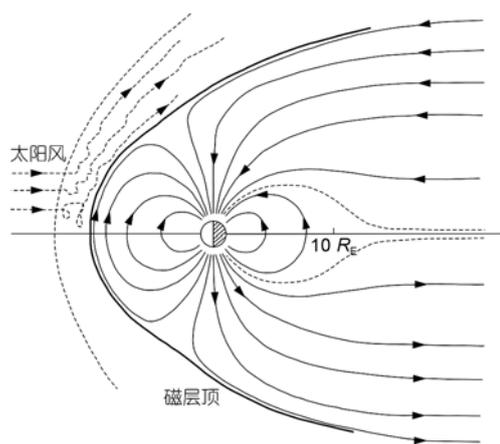


图3 地球磁层结构示意图  
 $R_E$  表示地球半径

### 3.1 动物地磁导航

地磁场是许多生物定向和导航的重要物理参考场. 动物地磁导航是人们最早注意到的生物地磁学现象. 例如, 信鸽归巢、候鸟在栖息地间的远距离迁徙、海龟洄游等已为人们所熟知. 研究发现, 海洋中大马哈鱼和带刺龙虾、爬行类的蜥蜴、昆虫类的蚂蚁和蜜蜂、哺乳类的蝙蝠和鼯鼠都依赖地磁场定向和导航<sup>[40-48]</sup>. 除动物外, 研究人员还发现趋磁细菌和原核多细胞微生物也依赖地磁场定向游弋. 对地球生物来讲, 地磁场就是一个覆盖全球的天然“全球定位系统”. 生物利用体内的“磁罗盘”感知地磁偏角、倾角或强度, 实现定向和导航.

当前针对鸟类的地磁导航机制的研究较为深入, 主要存在两种假说: 基于磁铁矿的磁受体模型和基于自由基对的磁受体模型. 前者认为, 细胞骨架微丝将生物体内磁性颗粒与细胞膜上的离子通道相连, 磁性颗粒在地磁场的作用下控制着离子通道的开放与闭合, 从而调节细胞膜内外的离子浓度, 再由离子浓度的变化将地磁信号传递到神经指挥系统<sup>[46]</sup>. 最近研究发现, 在信鸽上喙皮肤组织内的三叉神经末梢端含有纳米磁铁矿颗粒(图4)<sup>[49-51]</sup>; 迁徙型蝙蝠的脑组织较非迁徙型蝙蝠的脑组织含有更多的纳米磁铁矿颗粒<sup>[52]</sup>. 这些发现为进一步完善基于磁铁矿的磁受体模型提供了证据. 后一种假说则认为, 地磁场影响通过感光受体细胞内的自由基反应(电子对)把信息传递到神经系统, 从而被生物所感知<sup>[53-55]</sup>.

但是, 人们尚难以直接确定不同的生物究竟是使用哪种磁受体工作模型导航. 动物地磁导航机制

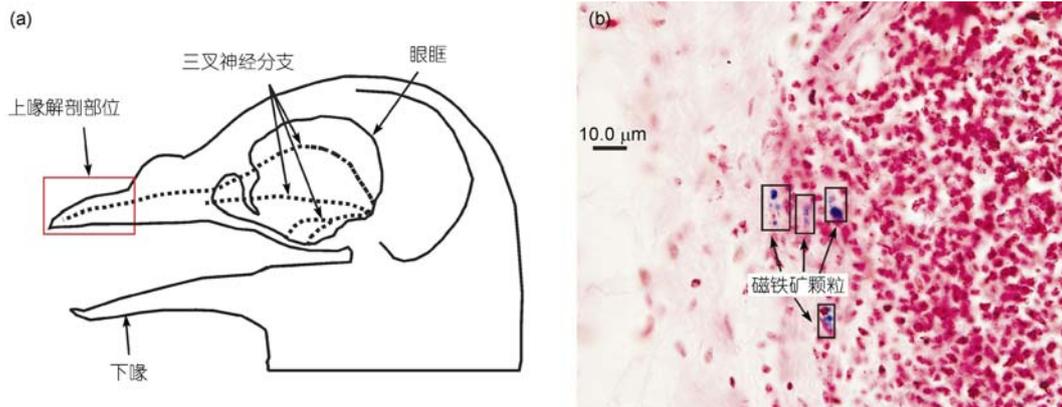


图4 信鸽上喙皮肤组织结构和生物切片光学显微镜照片<sup>[50]</sup>

(a) 信鸽头部结构示意图, 红框标注实验解剖部位(上喙皮肤组织); (b) 上喙皮肤石蜡切片经普鲁士蓝染色后的光学显微镜照片, 图中方框内的蓝色颗粒为细胞内的纳米磁铁矿簇

还涉及磁性纳米颗粒的形成、超顺磁颗粒簇模型、生物磁信号传导等基本问题, 仍有待于从神经生理学、生物信息学和生物地磁学等方面进行深入解析。

### 3.2 地磁场与微生物: 以趋磁细菌为例

趋磁细菌是一类能沿地磁场磁力线游泳细菌的总称。近年来, 趋磁细菌已成为研究地磁场影响微生物、生物控制矿化和生物感知磁场的模式微生物。趋磁细菌的重要特征是在基因的严格控制下在细胞内合成几十至数百个晶形完好、纯度高、粒度均匀(35~120 nm)的单畴磁铁矿或胶黄铁矿颗粒(称为磁小体), 绝大多数颗粒呈单链或多链排列(称为磁小体链)<sup>[56,57]</sup>。趋磁细菌在海洋至陆地环境中普遍存在<sup>[34,58,59]</sup>。它们能通过细胞内的磁小体链感知地磁场, 并在鞭毛的驱动下沿磁力线方向快速定位到它们最适宜的生态位。趋磁细菌通常在沉积物-水界面附近的氧化-还原过渡带附近富集, 那里趋磁细菌的数量可高达 $10^6$  cell/mL<sup>[57,60,61]</sup>。趋磁细菌细胞内铁的含量可占到细胞干重的3%~5%, 远远高于其他原核微生物, 因而还可能在Fe的地球化学循环中起重要作用。

利用高效双向趋磁细菌富集装置(专利号: ZL200820123577.1)和针对淡水 $\alpha$ -变形菌纲趋磁球菌的聚合酶链式反应(PCR)特异性引物<sup>[62,63]</sup>, 研究人员已在我

国湖泊和海洋沉积物中发现了多种趋磁细菌新类群, 包括单细胞内可合成数百个“子弹头形状”磁铁矿磁小体的大杆菌, 以及各种弧菌、单链或多链的球菌, 主要分布在 $\alpha$ -变形菌纲和硝化螺旋菌门(图5)<sup>[60,63-69]</sup>。研究发现, 自然界趋磁细菌的多样性远高于原先的估计。趋磁细菌的群落结构与环境因子(如硝酸盐的

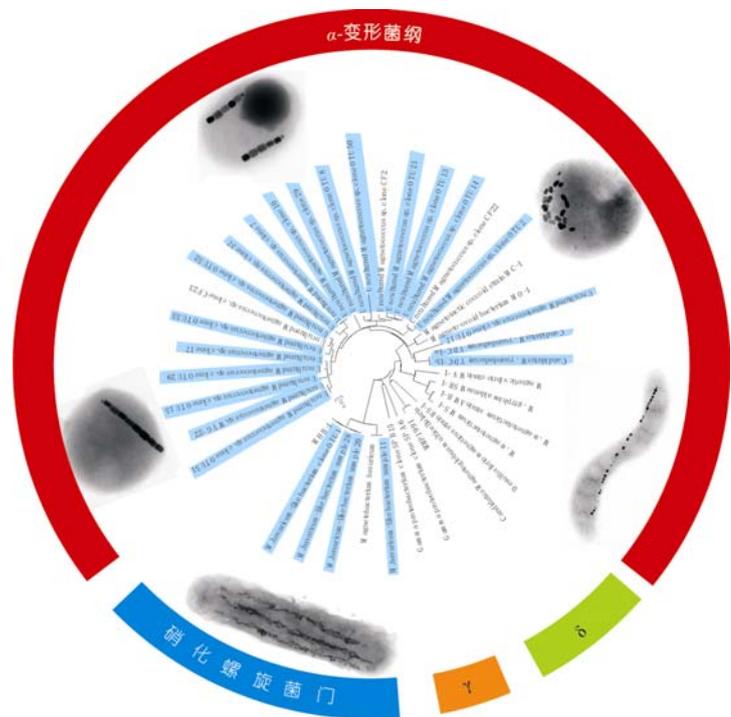


图5 我国部分趋磁细菌的系统发育树

包括 $\alpha$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -变形菌纲和硝化螺旋菌门。中心的蓝色序列为北京地区发现的趋磁细菌<sup>[68]</sup>; 外围图中照片为典型趋磁细菌的透射电子显微镜照片, 照片中呈链状排列的黑色颗粒为磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 单个颗粒大小约数十纳米

含量、盐度等)密切相关,初步显示出了趋磁细菌类群作为环境研究替代性指标的潜力<sup>[68]</sup>.

实验观测发现,趋磁球菌在外加磁场中呈螺旋式前进.这些球菌在地磁场中的趋磁游动速度可高达230  $\mu\text{m/s}$ .当外加磁场强度超过地磁场的强度时,趋磁细菌游泳速度随外场强度的增加而降低(图6).这暗示趋磁细菌能感知地磁场强度的大小<sup>[70]</sup>,而且高于地磁场强度的外场可能会抑制它们的游动速度.游泳速度也受磁小体链与细菌鞭毛运动轴之间夹角大小的影响<sup>[70]</sup>.趋磁细菌鞭毛的质子泵工作模型可能是将来研究趋磁细菌趋磁性行为和磁信号传导的关键.趋磁性行为涉及到的磁流体运动学基本问题也有待于进一步研究.

在趋磁细菌死亡后,化石磁小体可能被保存下来成为沉积剩磁和古环境信号的重要载体<sup>[34,61,71-74]</sup>.磁小体化石还可被用来作为寻找地球早期生命和地外生命的证据.如火星陨石ALH84001中发现的链状排列的纳米磁铁矿颗粒曾被认为是火星生命的证据<sup>[75-77]</sup>.然而,如何识别地质样品中的化石磁小体依赖于岩石磁学、电子显微学,以及分子生物学的综合研究.只有建立快速有效识别方法和标准,才能全面解译地质样品中化石磁小体的古地磁学和古环境信息.

#### 4 全球气候变化研究初探

全球气候变化是当前人类社会面临的最重要的问题之一.气候变化的驱动力和应对策略是研究的热点.近年来,生物地球物理学也被应用于全球气候

变化研究中.众所周知,地表植被是生物圈-大气圈相互作用的重要纽带.气候控制着陆地植被的分布,陆地植被又可以改变大气水和能量的收支而影响气候.据估计,目前地球上森林占陆地面积的近1/3,储存着大约45%陆地的碳量,且仍在继续封存大量人类活动碳排放<sup>[78]</sup>.较冰雪覆盖地区而言,森林具有低的地表反照率,可以有效地提高地表吸热率,导致升温.森林也会增加蒸发量,形成云雨,又导致降温.近年来,生物地球物理变量(地表反照率和蒸发量等)被用来研究植被覆盖对气候的影响.根据MPI-ESM地球系统模型分析发现,如果赤道地区(19°S~15°N)无森林覆盖时,可造成CO<sub>2</sub>浓度升高和蒸发量降低,导致全球温度升高0.4°C;如果北半球中高纬度地区(45°~90°N)无森林覆盖时,在100年后地球会降温0.25°C,而被森林覆盖时会导致相同幅度的变暖<sup>[79]</sup>.研究表明,生物地球物理变量及其反馈在不同空间尺度上激发植被-气候系统的行为可能差别较大<sup>[80]</sup>.

对过去一千年的土地利用面积变化研究发现,土地利用面积变化产生的生物地球物理效应(如反照率、粗糙度和蒸发作用),可导致全球平均温度小幅降低(在20世纪约-0.03°C),而相应的生物化学效应(生物释放大气CO<sub>2</sub>浓度升高)则可产生较强的升温(0.16~0.18°C)<sup>[81]</sup>.因此,全面认识全球气候变化必须同时考虑生物地球化学与生物地球物理学两种效应.

#### 5 研究展望

生物地球物理学方法和技术已将地质微生物改

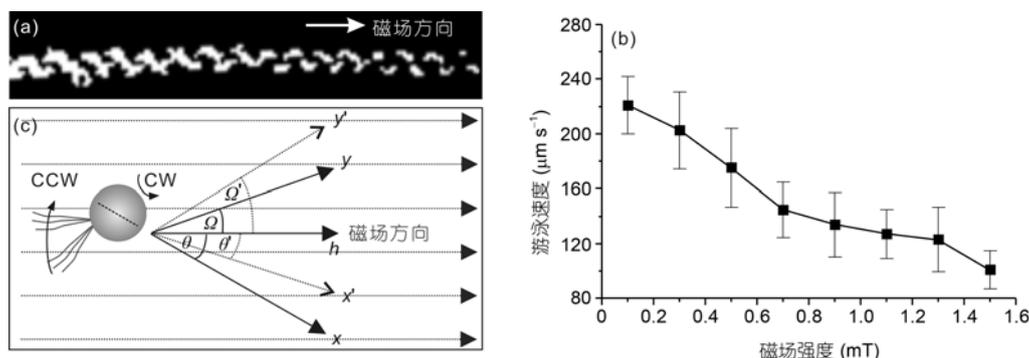


图6 趋磁球菌MYC-1的趋磁游泳速度与外磁场强度的关系<sup>[70]</sup>

- (a) 密云水库中趋磁球菌MYC-1的螺旋式运动轨迹;(b) 该趋磁球菌的总游泳速度与外磁场强度的关系,游泳速度随磁场强度的增加而减小;(c) 趋磁细菌的螺旋式运动模式图解, $x$ 轴与 $y$ 轴分别表示磁小体链的方向和鞭毛推动力的方向.增加磁场强度,磁小体链和鞭毛推动力的方向分别变为 $x'$ 轴与 $y'$ 轴方向

造作用研究范围拓展至地下三维空间。地质微生物的改造作用及污染环境修复研究仍是生物地球物理学中最活跃的方向。生物地球物理学亦可能在二氧化碳地下封存、生物成矿等研究中发挥重要作用<sup>[78]</sup>。但需要指出,像其他地球物理技术一样,生物地球物理学观测结果具有多解性,考虑到微生物-矿物改造作用的复杂性,把任何地表观测到的地球物理信号/异常直接解释为地质微生物过程仍须谨慎。开展已知条件下的实验室模拟研究非常重要,将有助于建立具体微生物活动与特定生物地球物理信号之间的联系。我国的相关研究刚刚起步,开展生物地球物理学方法和技术的研究,将拓展新的研究方向和应用。

认识地磁场变化与生命演化的协同关系,探讨地质历史时期极性倒转对生物进化的影响,仍是生物地磁学的核心问题。动物地磁导航机制研究是生物地磁学研究的难点,新技术手段的应用将逐步揭示某些生物中磁受体的工作机制。

值得一提的是,生物源磁性纳米颗粒研究为研发高质量、低成本的医用磁性纳米材料提供了新思路。趋磁细菌作为特殊的微生物资源将得到重视,趋磁细菌合成的稳定单畴磁小体可用于磁分离、磁热疗、磁靶向治疗、生物传感器等<sup>[82-87]</sup>。磁小体的矿化功能基因研究有望开拓仿生磁性材料合成的新途径。最近利用人源铁蛋白“纳米反应器”,已成功制备出无磁相互作用的磁性铁蛋白(2~7 nm)<sup>[88]</sup>,它不仅是超顺磁颗粒磁学研究的宝贵材料,而且在医学磁共振

成像、靶向给药和治疗等方面具有重要应用前景。

深部生物圈不仅是研究地球生物起源的重要对象,而且是挖掘新生物资源的宝库。生物地球物理学将在对深海、大陆地下和冰川下等深部微生物圈的研究发挥重要作用。地外生命探测也将进一步推动生物地球物理学的快速发展。

## 6 小结

生物地球物理学是地球物理学与生物学的前沿交叉。就整体研究水平而言,生物地球物理研究目前还处于观测和数据积累的阶段,理论、方法、技术和机制研究仍很缺乏。建议围绕重要科学问题,在研究思路上要强调生物地球物理学与生物地球化学、生物地质学和生物学的多学科联合。加强实验室模拟、野外观测和数值模拟的综合研究。在技术层面上要充分利先进的自动化和多道野外地球物理技术、基因组学和蛋白质组学等分析手段,研发新技术、新方法和新装备,大力提高生物地球物理学研究的能力和水平,使之在地球系统科学研究中发挥更重要的作用。

发展生物地球物理学,需要大力加强学科交叉型青年人才的培养。

可以肯定,包括生物地球物理学在内的生物地球科学的发展,将进一步提升认知地球浅表环境中各种复杂地质过程的能力,丰富地球系统科学的理论,并为人类健康、环境改善以及生物资源的开发利用作出重要贡献。

**致谢** 感谢田兰香、吴文芳、林巍和纪新林等在撰文中的帮助,郑天愉、王辉、吴福元、邓成龙和底青云对初稿提出了很好的建议,感谢三位审稿人和牛耀龄副主编给予的建设性修改意见。

## 参考文献

- 1 戎嘉余. 生物的起源与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社, 2006. 1-962
- 2 Courtillot V, Olson P. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 260: 495-504
- 3 叶连俊. 生物有机质成矿作用. 北京: 海洋出版社, 1996. 1-283
- 4 Schlesinger W H. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. 2nd ed. San Diego, Calif: Academic Press, 1997
- 5 Konhauser K. *Introduction to Geomicrobiology*. Maldon: Blackwell Publishing, 2007. 1-579
- 6 Wacey D. *Early Life on Earth: A Practical Guide*. Berlin: Springer, 2009. 1-274
- 7 Johnson C M, Beard B L, Roden E E. The iron isotope fingerprints of redox and biogeochemical cycling in modern and ancient Earth. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2008, 36: 457-493
- 8 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 地球科学: 世纪之交的回顾与展望. *中国科学院院刊*, 2001, 2: 101-105
- 9 汪品先. 走向地球系统科学的必由之路. *地球科学进展*, 2008, 18: 795-796

- 10 孙枢. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考. 地球科学进展, 2005, 20: 6-9
- 11 殷鸿福, 杨逢清, 谢树成, 等. 生物地质学. 武汉: 湖北省科学技术出版社, 2004. 1-264
- 12 殷鸿福, 谢树成, 秦建中, 等. 对地球生物学、生物地质学和地球生物相的一些探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 1473-1480
- 13 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等. 从古生物学到地球生物学的跨越. 科学通报, 2006, 51: 2327-2336
- 14 Atekwana E A, Slater L D. Biogeophysics: A new frontier in Earth science research. Rev Geophys, 2009, 47: RG4004, doi:10.1029/2009RG000285
- 15 Pan Y X, Lin W, Li J H, et al. Magnetic properties of magnetic minerals produced by magnetotactic bacteria and their contribution to sedimentary magnetism. In: AGU Chapman Conference on Biogeophysics, 2008. 29-30
- 16 Whitman W B, Coleman D C, Wiebe W J. Prokaryotes: The unseen majority. Proc Natl Acad Sci USA, 1998, 95: 6578-6583
- 17 高培基, 许平. 资源环境微生物技术. 北京: 化学工业出版社, 2004. 1-363
- 18 Neelson K H, Stahl D A. Microorganisms and biogeochemical cycles: What can we learn from layered microbial communities. Rev Mineral Geochem, 1997, 35: 5-34
- 19 董海良, 于炳松, 吕国. 地质微生物学中几项最新研究进展. 地质论评, 2009, 55: 731-758
- 20 Banfield J F, Neelson K H. Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals. Mineral Soc Am Rev Mineral, 1997, 35: 448
- 21 Bouwer E J, Rijnaarts H H M, Cunningham A B, et al. Biofilms in porous media. In: Bryers J D, ed. Biofilms II: Process Analysis and Applications, 2000. 123-158
- 22 Naudet V, Revil A, Rizzo E, et al. Groundwater redox conditions and conductivity in a contaminant plume from geoelectrical investigations. Hydrol Earth Syst Sci, 2004, 8: 8-22
- 23 Prodan C, Mayo F, Claycomb J R, et al. Low-frequency, low-field dielectric spectroscopy of living cell suspensions. J Appl Phys, 2004, 95: 3754-3756
- 24 Davis C A, Pyrak-Nolte L J, Atekwana E A, et al. Investigating the effects of microbial growth and biofilm formation on seismic wave propagation in sediment. In: AGU Chapman Conference on Biogeophysics, 2008
- 25 Brovelli A, Malaguerra F, Barry D A. Bioclogging in porous media: Model development and sensitivity to initial conditions. Environ Modell Softw, 2009, 24: 611-626
- 26 Revil A, Glover P W J. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays. Geophys Res Lett, 1998, 25: 691-694
- 27 Williams K H, Ntarlagiannis D, Slater L, et al. Geophysical imaging of stimulated microbial biomineralization. Environ Sci Technol, 2005, 39: 7592-7600
- 28 Williams K H, Kemna A, Wilkins M J, et al. Geophysical monitoring of coupled microbial and geochemical processes during stimulated subsurface bioremediation. Environ Sci Technol, 2009, 43: 6717-6723
- 29 Ntarlagiannis D, Williams K H, Slater L, et al. The low frequency electrical response to microbially induced sulfide precipitation. J Geophys Res, 2005, 110: G02009, doi:10.1029/2005JG000024
- 30 Slater L, Ntarlagiannis D, Personna Y R, et al. Pore-scale spectral induced polarization signatures associated with FeS biomineral transformations. Geophys Res Lett, 2007, 34: L21404, doi:10.1029/2007GL031840
- 31 Personna Y R, Ntarlagiannis D, Slater L, et al. Spectral induced polarization and electroodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. J Geophys Res, 2008, 113: G02020, doi: 10.1029/2007JG000614
- 32 Reguera G, McCarthy K D, Mehta T, et al. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. Nature, 2005, 435: 1098-1101
- 33 Carlut J, Horen H, Janots D. Impact of micro-organisms activity on the natural remanent magnetization of the young oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 2007, 253: 497-506
- 34 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性性质研究进展. 科学通报, 2004, 49: 2505-2510
- 35 Estella A A, Eliot A A. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. Surv Geophys, 2010, 31: 247-283
- 36 Tarduno J A, Cottrell R D, Watkeys M K, et al. Geodynamo, solar wind and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago. Science, 2010, 327: 1238-1240
- 37 徐文耀. 地球电磁现象物理学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. 1-558
- 38 Dubrov A P. The Geomagnetic Field and Life: Geomagnetobiology. New York: Plenum Press, 1978. 1-318
- 39 朱日祥, 潘永信, 邓成龙. 地磁场与生物的磁效应. 科技导报, 2006, 24: 5-7
- 40 Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetic Orientation in Animals. Berlin: Springer, 1995. 1-297
- 41 Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. J Comp Physiol A, 2005, 191: 675-693

- 42 Lohmann K J, Cain S D, Dodge S A, et al. Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science*, 2001, 294: 364–366
- 43 Wang Y N, Pan Y X, Parsons S, et al. Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 2007, 274: 2901–2905
- 44 Diebel C E, Proksch R, Green C R, et al. Magnetite defines a vertebrate magnetoreceptor. *Nature*, 2000, 406: 299–302
- 45 Holland R A, Thorup K, Vonhof M J, et al. Navigation: Bat orientation using Earth's magnetic field. *Nature*, 2006, 444: 702
- 46 Kirschvink J L, Walker M M, Diebel C E. Magnetite-based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol*, 2001, 11: 462–467
- 47 Lohmann K J, Lohmann C M F, Putman N F. Magnetic maps in animals: Nature's GPS. *J Exp Biol*, 2007, 210: 3697–3705
- 48 田兰香. 动物地磁导航磁受体的磁学探测及其矿化机理研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008
- 49 Hanzlik M, Heunemann C, Holtkamp-Rötzler E, et al. Superparamagnetic magnetite in the upper beak tissue of homing pigeons. *Bio-metals*, 2000, 13: 325–331
- 50 Tian L X, Xiao B, Lin W, et al. Testing for the presence of magnetite in the upper-beak skin of homing pigeons. *Bio-metals*, 2007, 20: 197–203
- 51 Fleissner G, Stahl B. A novel concept of Fe-mineral-based magnetoreception: Histological and physicochemical data from the upper beak of homing pigeons. *Naturwissenschaften*, 2007, 94: 631–642
- 52 Tian L X, Lin W, Zhang S Y, et al. Bat head contains soft magnetic particles: evidence from magnetism. *Bioelectromagnetics*, 2010, 31: 499–503
- 53 Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J*, 2000, 78: 707–718
- 54 Mora C V, Davison M, Wild J M, et al. Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon. *Nature*, 2004, 432: 508–511
- 55 Gegear R J, Foley L E, Casselman A, et al. Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism. *Nature*, 2010, 463: 804–808
- 56 Blakemore R. Magnetotactic bacteria. *Science*, 1975, 190: 377–379
- 57 Bazyliński D A, Frankel R B. Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Rev Microbiol*, 2004, 2: 217–230
- 58 Schüler D. Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 1–319
- 59 贾蓉芬, 高梅影, 彭先芝, 等. 微生物矿化. 北京: 科学出版社, 2009. 1–335
- 60 Lin W, Li J H, Schüler D. Diversity analysis of magnetotactic bacteria in Lake Miyun, northern China, by restriction fragment length polymorphism. *Syst Appl Microbiol*, 2009, 32: 342–350
- 61 Pan Y X, Petersen N, Davila A F, et al. The detection of bacterial magnetite in recent lake sediments of Lake Chiemsee (southern Germany). *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 232: 109–123
- 62 Lin W, Tian L X, Li J H, et al. Does capillary racetrack-based enrichment reflect the diversity of uncultivated magnetotactic cocci in environmental samples? *FEMS Microbiol Lett*, 2008, 279: 202–206
- 63 Lin W, Pan Y X. Specific primers for detection of freshwater Alphaproteobacterial magnetotactic cocci. *Int Microbiol*, 2009, 12: 237–242
- 64 Lin W, Pan Y X. Uncultivated magnetotactic cocci from Yuandadu Park in Beijing, China. *Appl Environ Microbiol*, 2009, 75: 4046–4052
- 65 Pan Y X, Lin W, Tian L X, et al. Combined approaches for characterization of an uncultivated magnetotactic coccus from the Lake Miyun near Beijing. *Geomicrobiol J*, 2009, 26: 313–320
- 66 李金华. 趋磁细菌 AMB-1 的生物矿化和磁学研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2010
- 67 Li J H, Pan Y X, Liu Q S, et al. Biomineralization, crystallography and magnetic properties of bullet-shaped magnetite magnetosomes in giant rod magnetotactic bacteria. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 293: 368–376
- 68 Lin W, Pan Y X. Temporal variation of magnetotactic bacteria communities in two freshwater sediment microcosms. *FEMS Microbiol Lett*, 2010, 302: 85–92
- 69 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: 450–458
- 70 Pan Y X, Lin W, Li J H, et al. Efficiency of magnetotaxis in magnetotactic coccoid bacteria. *Biophys J*, 2009, 97: 986–991
- 71 Kopp R E, Kirschvink J L. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria. *Earth Sci Rev*, 2008, 86: 42–61
- 72 Pan Y X, Petersen N, Winklhofer M, et al. Rock magnetic properties of uncultured magnetotactic bacteria. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 311–325
- 73 Mandernack K W, Bazyliński D A, Shanks W C, et al. Oxygen and iron isotope studies of magnetite produced by magnetotactic bacteria. *Science*, 1999, 285: 1892–1896
- 74 李金华, 潘永信, 刘青松, 等. 趋磁细菌 *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 全细胞和纯化磁小体的磁学比较研究. *科学通报*, 2009, 54: 3345–3351
- 75 McKay D S, Gibson E K, Thomas-Keptra K L, et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 1996, 273: 924–930
- 76 Thomas-Keptra K L, Clemett S J, Bazyliński D A, et al. Magnetofossils from ancient Mars: A robust biosignature in the Martian meteorite ALH84001. *Appl Environ Microbiol*, 2002, 68: 3663–3672

- 77 Thomas-Keprta K L, Clemett S J, McKay D S, et al. Origins of magnetite nanocrystals in Martian meteorite ALH84001. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 6631–6677
- 78 Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
- 79 Bathiany S, Claussen M, Brovkin V, et al. Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. *Biogeosciences*, 2010, 7: 1383–1399
- 80 Dekker S C, De Boer H J, Brovkin V, et al. Biogeophysical feedbacks trigger shifts in the modelled vegetation-atmosphere system at multiple scales. *Biogeosciences*, 2010, 7: 1237–1245
- 81 Claussen M, Brovkin V, Ganopolski A. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1011–1014
- 82 Jogler C, Schuler D. Genomics, genetics, and cell biology of magnetosome formation. *Annu Rev Microbiol*, 2009, 63: 501–521
- 83 姜伟, 付刚, 李颖. 细菌内磁纳米粒研究——细菌内磁纳米粒的特性及应用. *中国医学工程杂志*, 2003, 11: 59–62
- 84 林巍, 田兰香, 潘永信. 趋磁细菌磁小体研究进展. *微生物学通报*, 2006, 33: 133–137
- 85 Ding Y, Li J H, Liu J N, et al. Deletion of the *ftsZ*-like gene results in the production of superparamagnetic magnetite magnetosomes in *Magnetospirillum gryphiswaldense*. *J Bacteriol*, 2010, 192: 1097–1105
- 86 Sun J B, Duan J H, Dai S L, et al. *In vitro* and *in vivo* antitumor effects of doxorubicin loaded with bacterial magnetosomes (DBMs) on H22 cells: The magnetic bio-nanoparticles as drug carriers. *Cancer Lett*, 2007, 258: 109–117
- 87 Faivre D, Schuler D. Magnetotactic bacteria and magnetosomes. *Chem Rev*, 2008, 108: 4875–4898
- 88 Cao C Q, Tian L X, Liu Q S, et al. Magnetic characterization of non-interacting, randomly oriented, nanometer-scale ferrimagnetic particles. *J Geophys Res*, 2010, 115: B07103, doi: 10.1029/2009JB006855

## A review of biogeophysics: The establishment of a new discipline and recent progress

PAN YongXin & ZHU RiXiang

*Paleomagnetism and Geochronology Laboratory, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

The Earth is the only planet in our solar system that supports life. The biosphere of the Earth has extensive interactions with and plays a key role in shaping other geosystems. For example, microorganisms have been involved with numerous changes of the physical/chemical nature of the Earth's topmost lithosphere, hydrosphere and atmosphere since the early stages of the Earth's evolution. In the past decade, geophysical methods have been widely applied to probe subsurface microbial cells, microbial mediated alteration of petrophysical properties, etc. This progress has now developed into an interdisciplinary branch of biogeosciences, i.e., biogeophysics. In this paper we first briefly introduce the establishment of biogeophysics as a new discipline, and then review biogeophysical research progress in subsurface microbial alteration (e.g., microbe-mineral interactions). We then focus on recent progress in bio-geomagnetism, a cross-discipline study of geomagnetism and biology, including geomagnetic navigation and the study of magnetotactic bacteria and magnetosomes, mostly conducted by our group. We will then discuss the application of biogeophysics to global climate change. Finally, we summarize some problems, challenges and prospective lines of research for this new field. The growing discipline of biogeophysics not only opens new avenues of research for geophysics, but it also holds promise for deepening our understanding of surface processes on the Earth.

**biogeophysics, biogeomagnetism, geomicrobial alteration**

doi: 10.1360/972010-467