

第620次学术讨论会·强磁场与生命健康: 新条件、新问题、新机遇

地磁场与动物感磁

田兰香^{1*}, 潘永信^{1,2*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

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

2018-07-01 收稿, 2018-10-31 修回, 2018-10-31 接受, 2018-12-26 网络版发表

国家自然科学基金(41674071, 41621004, 41330104)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010501)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC024)资助

摘要 地球上生物的起源和演化都在地球磁场的重要保护中进行。在长期的演化过程中, 动物具有了感磁能力以适应地磁场环境, 从而帮助动物能够更好地完成其生理活动。揭示地磁场变化与生物圈演化之间的联系, 理解现在、过去和未来地磁场变化的生物学效应是生物地磁学研究的主要目标。已有研究发现, 许多动物可利用地磁场信息进行定向和导航; 地磁场是维持地球生物正常的生理活动和生长发育必不可少的环境因子。本文围绕地磁场与动物地磁导航以及地磁场减弱对动物的可能影响两个方面进行评述。主要阐述动物地磁导航研究在行为学、神经生理学、生物磁学等方面的进展和有关动物感磁机理的3种假说: 电磁感应假说、基于磁铁矿感磁假说和基于自由基感磁假说。讨论地磁场变化(磁场强度降低)引起动物生理活动和生长发育异常等多方面的生物学效应, 并提出磁场变化引起生物学效应的3种可能途径: 磁性金属途径、自由基途径和骨架蛋白途径。细胞内的磁性物质、自由基产物或骨架蛋白可能是动物响应磁场的中介物, 它们引起生物体不同水平上的效应。随着现代多学科交叉融合和新实验技术的应用, 可以预见在不久的将来人们可以更加准确地在分子水平上解析出动物响应地磁场变化的作用机理。

关键词 地磁场, 环境因子, 动物地磁导航, 亚磁场, 生理活动, 生长发育

地球具有全球分布的偶极子磁场, 它起源于地球内部液态外核的导电流体对流运动(发电机原理), 向外延伸至太空与太阳风作用形成巨大的磁层。地磁场有效地阻挡了高能带电粒子对地球上生命的有害辐射, 也保护着大气和水分, 避免其被太阳风剥蚀、逃逸。因此, 地磁场为地球上生物的起源和演化提供着温和的环境^[1-4]。

地磁场是一个轴向地心偶极子场, 在地磁两极处强度最大, 现今约64 μT , 磁赤道处最小, 现今约24 μT ^[5]。在地球任一地点, 地磁场可以通过磁倾角、磁偏角及磁场强度3个参量来表征。受地球内部过程

控制, 地磁场在变化。自1840年有地磁实测以来, 地磁场强度已降低了10%; 估计如果以这样的速度持续衰减, 地磁场将在数千年后消失^[6,7], 或可发生地磁极性倒转。古地磁研究表明, 在极性倒转期间(持续时间数千年至上万年)磁场强度减弱至倒转前强度的10%~20%, 甚至更低^[8-10]。模拟实验结果显示, 地磁场强度减弱会使得磁层向阳面在太阳风压缩下退缩, 或可导致臭氧层成分和结构的改变, 从而造成到达地表的有害辐射增强, 或引起部分高层大气氧离子和水分逃逸加剧等, 这些变化会对地球上的生命产生一系列直接或间接的影响^[11-15]。人类活动和许

引用格式: 田兰香, 潘永信. 地磁场与动物感磁. 科学通报, 2019, 64: 761-772

Tian L X, Pan Y X. The geomagnetic field effects on animals: A review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 761-772, doi: 10.1360/N972018-00650

多动物可通过地磁场参量来定向和导航. 因此, 认识和评估地磁场对生物的影响是地球科学的前沿研究课题之一. 本文主要评述近年来在动物地磁导航和地磁环境变化对动物生理活动、生长发育影响两个方面的主要研究进展.

1 动物地磁导航

地球上很多生物在进化的过程中很早就获得了类似“磁罗盘”的感磁能力, 它们利用地磁场信息来定向和导航^[16,17]. 动物地磁导航的证据目前主要来自于行为学和神经生理学研究. 常见的行为学研究方法有两类: 一是在自然界自由活动的动物身体周围, 利用永磁块或小型线圈产生干扰磁场, 放飞动物后追踪动物归巢或迁徙路线的变化; 二是利用人工模拟线圈或磁屏蔽设备, 在实验装置内观察动物的定向行为. 神经生理学研究则主要利用电生理记录神经细胞的电信号变化, 或神经细胞活跃性依赖基因的表达差异, 来研究动物对周围磁场环境变化响应的神经元、神经通路或特定脑区.

动物地磁导航研究最早开始于迁徙性鸟类——知更鸟. 知更鸟在其迁徙季节里, 具有强烈地自发地向迁徙方向运动的行为. 前人通过行为学研究已发现, 鸟的体内具有“磁倾角罗盘”, 能够指导鸟类向赤道方向或背离赤道方向(即向两极方向)飞行^[18,19]. 随着研究的深入, 目前已发现几乎所有的动物门类都具有感磁能力的动物, 包括脊椎动物门的鱼类(大麻哈鱼、珊瑚鱼)、两栖类(蝾螈)、爬行类(海龟)、鸟类(信鸽)、哺乳类(鼯鼠、蝙蝠)以及无脊椎动物门的甲壳类(龙虾)、昆虫类(蜜蜂、白蚁)和软体类(蜗牛)等, 并且不断地在发现新的感磁物种^[16,20-22]. 在这些感磁动物中, 研究人员发现两类感磁罗盘: 一类是以鸟类为代表的“磁倾角罗盘”, 能够感知地磁场的倾角变化来获得定向. 昆虫类、两栖类、爬行类动物等多使用磁倾角罗盘^[23]. 另一类是“磁极性罗盘”, 例如蝙蝠、硬骨鱼和甲壳类动物, 它们体内的罗盘能够识别地磁场的方向信息, 类似于人类使用的指南针. 研究还发现, 具有感磁能力的动物并不仅仅局限于迁徙性或洄游性物种, 很多非迁徙性动物也有感磁能力, 例如: 软体动物、昆虫类以及一些偶蹄目动物^[24-27]. 这些动物虽然不进行长距离运动, 但在周围短距离活动区域也需要运动定向和觅食定向.

尽管已发现大量的动物种类具有感磁能力, 但

是目前动物体内的感磁受体及感磁信号传导过程并不十分清楚^[16]. 感磁不同于嗅觉、视觉、听觉和味觉等感知, 这些感知受体都与外界环境相接触. 然而, 地磁场可以穿透生物体, 因此其感磁受体可能位于动物身体的任何部位, 从而造成感磁受体定位研究困难. 除海洋鱼类, 例如鲨鱼和电鳐等, 其体内可能具有电磁感应受体, 可感知由于鱼身体在磁场内运动所产生的感应电流, 其他动物体内的感磁受体被认为主要有基于磁铁矿颗粒感磁和基于感光受体产生的自由基感磁两类(图1). 动物体内磁铁矿受体假说的提出是受到趋磁细菌趋磁运动的启发. 趋磁细菌是一类能够沿着磁场方向运动的革兰氏阴性菌, 其体内磁铁矿颗粒呈链状排列以帮助趋磁细菌沿地磁场磁力线方向运动^[29]. 前人研究给出了多种基于磁铁矿感磁的工作模型^[30-33]. 一般认为磁铁矿位于一个特定的细胞或器官内, 磁性颗粒与机械敏感的结构相偶联, 可以将磁扭矩的信号转化为生物可识别的电信号传递给神经系统^[29-31,34,35]. 目前虽然已经有很多动物体内都发现有磁铁矿颗粒的存在, 但是多数动物研究是通过生物磁检测手段提供的间接证据, 即通过测量动物组织的剩磁强度或感应磁化强度来判断其体内是否含有磁性颗粒, 但磁颗粒在动物体内的具体位置、结构和功能并不清楚^[36,37]. 例如, 通过生物磁测量对比不同种类蝙蝠多个组织部位的感磁和剩磁强度, 发现在蝙蝠的头部含有磁性矿物^[38]. 强磁脉冲场实验可以将动物体内磁性矿物的磁化方向进行反转, 从而改变动物的定向行为^[39]. 研究发现灰胸绣眼鸟、信鸽、鼯鼠和大棕蝠的定向行为都受到强磁脉冲场的影响, 间接地证实这些动物体内可能存在着磁铁矿感磁受体^[37,40-42]. 目前通过荧光免疫组化技术已定位到虹鳟鱼和信鸽头部磁铁矿颗粒的具体位置和结构. 在虹鳟鱼体内鼻腔嗅上皮细胞内发现类似单畴磁铁矿颗粒, 这些磁颗粒所在细胞的周围有可响应磁刺激的三叉神经浅眼支(ros V), 推测胞内的磁铁矿颗粒与细胞膜紧密偶联, 通过磁偶矩作用在细胞膜上产生机械压力从而将感磁信号进一步传导^[43-45]. 在信鸽的上喙皮肤和鼻腔内也发现有磁性矿物的存在, 这些颗粒所在的部位也有三叉神经传导分支的分布, 具有磁信号传导的神经基础^[46-49]. 但是有学者对信鸽上喙组织细胞进行免疫组化和铁染色分析, 并结合磁共振成像和计算机断层扫描技术研究发现, 信鸽上喙组织内含有磁

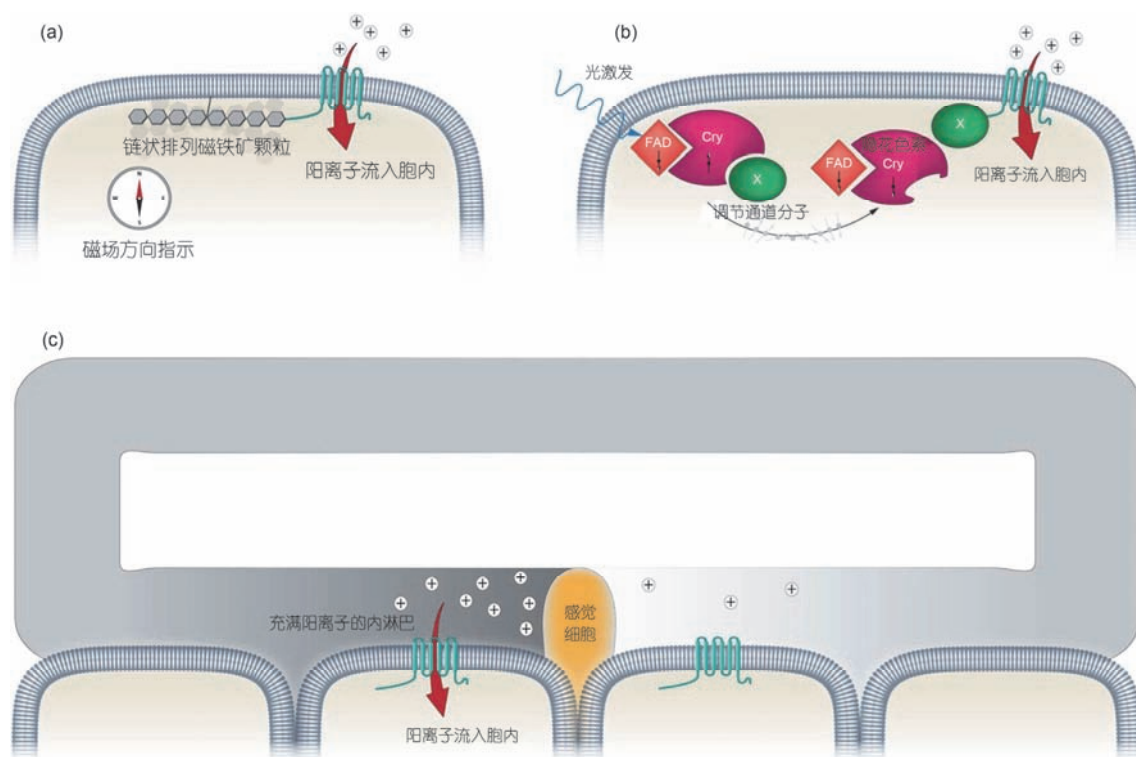


图 1 (网络版彩色) 3 种动物感磁受体假说示意图(改自参考文献[28])。 (a) 一种机械敏感的磁铁矿感磁原理示意图。磁铁矿晶体感知地磁场产生磁矩, 通过与之偶联的骨架蛋白控制离子通道开关, 导致阳离子流入胞内, 造成细胞膜的去极化, 从而将感知的地磁场信号进一步转化为细胞的电信号。 (b) 光敏化学感磁受体感磁原理示意图。蓝光诱导隐花色素(Cry)和共同因子黄素腺嘌呤二核苷酸(FAD)之间形成长寿命的自由基对。该对自由基的未配对电子自旋状态(平行或反平行)受地磁场影响, 进一步影响Cry分子的生化或结构特性, 从而激活下游某信号分子(X), 导致阳离子流入胞内, 从而将感知的地磁场信号进一步转化为细胞的电信号。 (c) 基于电磁感应的感磁原理示意图。图示脊椎动物的半规管(含阳离子内淋巴和感觉细胞)可能作为电磁感应受体, 可将磁刺激转化为电信号, 进一步通过高灵敏度的电压门控离子通道诱导阳离子流入

Figure 1 (Color online) Three mechanisms proposed to underlie the magnetic sense (modified from ref.[28]). (a) Diagram showing a mechanically sensitive magnetite-based magnetoreceptor. Magnetite crystals respond to the Earth's geomagnetic field (like a compass needle), and thereby exerts a torque force on a mechanosensitive channel. (b) Diagram showing a light-sensitive chemical-based magnetoreceptor. Blue light induces the formation of long-lived radical pairs between Cry and the cofactor FAD. The spin state of these electrons interconverts between an antiparallel or parallel state, depending on the local magnetic environment. It influences the biochemical or structural properties of Cry, resulting in the activation of an unknown signaling molecule (X) that modulates ion channel permeability. (c) Magnetoreception based on electromagnetic induction. This hypothesis relies on an accessory structure in semicircular canal of a vertebrate that transforms magnetic stimuli into an electrical information. This induces cation influx through highly sensitive voltage-gated ion channels (shown in teal). Cry, cryptochrome; FAD, flavin adenine dinucleotide

性纳米颗粒的细胞是吞噬细胞, 可能并不是磁敏神经细胞^[50]。对磁分选出来的具有强磁矩的细胞, 使用单细胞光电联合显微镜和透射电子显微镜对其亚细胞结构详细解析, 发现这些细胞的强磁性主要来自细胞外含铁、钛和铬结构的贡献, 而非细胞内生物矿化的磁性纳米颗粒的作用^[51], 可见信鸽上喙组织内的磁铁矿颗粒是否具有感磁功能尚在争论中。随后人们在雀形目迁徙性鸟类和家鸡体内都发现有类似的磁性矿物结构, 同样这些磁性颗粒是否行使感磁功能还需要进一步证实^[50,52]。此外, 在蜜蜂和蚂蚁这类社会性昆虫的腹部和触角部位都发现磁铁矿颗粒, 颗粒尺寸从超顺磁性、单畴, 甚至多畴都有, 其

中神经丰富的蚂蚁触角内的磁铁矿颗粒被认为是最有可能的感磁受体^[53~57]。

自由基感磁受体假说最早由Schulten等人^[58]提出。该假说认为, 鸟类的磁罗盘是依赖于眼睛内的感光蛋白产生的自由基化学变化来感知地磁场的方向, 即地磁场变化影响自由基对的两种自旋态产物(单重态、三重态)的产率, 从而将磁信号转化为生物可识别的信号。目前研究认为, 感光蛋白可能是视网膜上的隐花色素(Cry), 即一种可吸收蓝光的黄素蛋白。它与黄素腺嘌呤二核苷酸(FAD)形成自由基对^[59,60], 已有一些体外实验证据支持基于感光受体的自由基感磁假说。这类感光蛋白具有一定的激发波长范围,

鸟类(鸣禽、信鸽、家鸡等)研究发现其感磁罗盘需要波长小于565 nm的蓝绿光激发,但是大于590 nm范围的红黄波长光却会干扰其定向^[61]。蝶螈、昆虫的感磁罗盘也是光依赖性的,说明这些动物的感磁可能是基于光化学反应的自由基机制^[61~63]。研究发现,频率在兆赫兹(MHz)以上的射频磁场(1~100 MHz)可以改变自由基不同能级产物的产率,从而干扰动物的自由基磁受体定向行为,因此成为判断某动物是否使用自由基感磁受体的重要方法^[64~66]。例如,鸟类定向实验研究发现,在射频场强度不到地磁场强度的1%(<500 nT),频率为7.0或1.315 MHz的施加磁场条件下,欧洲知更鸟的感磁罗盘受到了干扰^[67,68]。斑胸草雀、家鸡等的定向行为也受到射频磁场的影响^[69,70]。

鸟类的感磁罗盘可能存在一定的“功能窗口”,即表现为当周围磁场强度增加或减少25%~30%时,鸟类的感磁罗盘会受影响,干扰其定向。然而,在一定磁场强度范围内,鸟类自身经过一定阶段的适应,可调整感磁罗盘对超出“功能窗口”强度磁场的正确感应,从而进行正确定向。这说明某些动物感磁罗盘具有可调整性,具备适应自然界地磁场变化的能力^[71~73]。目前大量的感光受体体外实验模拟都是在远高于地磁场强度的强磁场内进行,强度一般为1~100 mT。在这样的强磁场中,隐花色素大分子被证实是可以感知磁场信息的,使得基于感光分子的自由基感磁假说占据重要的地位,但是实验使用的多数磁场强度都远高于地磁场量级^[74~76]。研究人员最近也发现了一种新的磁感应蛋白Isca1,属于铁硫簇蛋白,命名为“MagR”。体外研究发现, MagR与感光蛋白CRY以及MagR蛋白复合体里的铁原子共同执行感磁功能^[77]。但是,磁感应蛋白MagR在HEK293T细胞、海马体神经元细胞和背根神经节细胞(DRGN)中分别表达后并不能对磁场刺激产生反应,也没有钙离子信号的变化^[78]。也有学者对MagR蛋白能够感磁提出了异议^[79]。MagR的感磁功能还需要进一步的实验验证。

虽然目前动物感磁的具体机理并不十分清楚,但是大量的行为学研究结果已经证实很多动物的确能够感知地磁场信息并利用其定向或导航。从生物演化的过程来看,从细菌到高等动物感磁物种的广泛分布,暗示着生物感磁能力的起源时间可能是在动物大辐射之前,可能具有共同的起源^[80]。最近有

研究认为,起源于太古代的趋磁细菌利用体内矿化的磁铁矿颗粒进行感磁定向,可以帮助趋磁细菌更好地适应当时高辐射的环境。地球早期的极端环境可能是生物趋磁性起源的驱动力之一,细菌的趋磁性可以有效帮助其逃避高辐射环境或寻找更适宜的生境位^[81,82]。因此,推测相比于鸟类基于感光蛋白的自由基感磁,可能基于磁铁矿的感磁能力出现的更早。

不排除一些动物可能同时具有这两类感磁系统。动物的这两类感磁受体系统并不是彼此排斥的,它们获取地磁场的信息不同:基于自由基感磁的倾角罗盘感知磁场的倾角和磁场强度等信息,基于磁铁矿感磁的极性罗盘感知磁场方向和强度等信息,二者可为动物提供感磁罗盘和感磁地图的不同信息^[16,20,22]。实际上,动物物种根据周围活动生境的不同可能使用不同的感磁系统,但目前并不清楚动物是否同时具有这两类感磁罗盘以及对两类磁罗盘的使用偏好。揭示动物感磁机理仍是动物导航和生物地磁学研究的重要课题。

2 地磁场减弱对动物生理和生长发育的影响

除动物利用地磁场进行定向和导航外,地磁场本身对动物多种生命活动具有重要的维持作用,地磁场变化也会影响动物正常的生理活动和生长发育。随着人类深空探测的发展,弱磁场的影响受到越来越多的关注。开展弱磁场生物效应研究的目标之一就是认识地磁场减弱(或消失)对人类,如宇航员身体健康的影响。

磁场强度 $B \leq 5 \mu\text{T}$ 区间内的静态弱磁场被称为亚磁场^[83]。在行星际和失去发电机的星体上磁场更弱,如星际磁场强度通常低于15 nT,月球表面岩石的剩磁强度为几十至数百nT^[84],而距离火星表面200 km上空的感应磁场强度<700 nT^[85],这些则可称作极端弱磁场,或近零磁场。在深空探测计划实施和发展的大背景下,国内外研究主要集中在亚磁环境生物学效应方面。

20世纪60年代,苏联科学家在该方面做了大量开创性的研究工作^[86]。过去受限于磁场模拟条件的落后,我国直到20世纪90年代才逐渐开展该方面研究。早期研究主要集中在亚磁场对动物的基本生理参数(血压、心率、光周期等)、胚胎发育以及神经中枢学习记忆、认知能力的影响等方面。针对几例志愿者的亚磁场实验发现,45 min的弱磁场暴露会导致志

愿者执行认知任务产生的错误数量和任务执行时间平均增加2.4%^[87,88]；也会影响人体正常的生理功能代谢，表现为毛细血管血流降低、心率降低、舒张压降低、收缩压增加等^[89]。许多研究工作是以人源细胞系或模式动物(大鼠、小鼠、小鸡等)为研究对象开展的，主要研究亚磁场对细胞的生长速率、增殖、DNA损伤/复制、活性氧自由基ROS/过氧化氢水平、细胞血红蛋白含量、细胞钙离子浓度、生殖细胞运动活力等的影响。模式动物的研究主要是行为学、血液指标、激素含量(去甲肾上腺素)、胚胎发育、痛觉参数以及记忆等方面^[83,90,91]。研究发现长时间暴露在50~500 nT的弱磁场环境会引起小鸡、果蝇等动物的味觉相关记忆力衰退，视觉相关的学习记忆能力下降以及大脑节律的失同步化等效应^[92,93]。亚磁场暴露还会影响麻雀和成年小鼠的光周期节律，从而进一步影响动物体内与光周期相关的多种生理活动^[94,95]。目前弱磁场生物效应研究缺乏对中枢神经细胞的生长发育、大脑学习认知等深入系统的研究。神经细胞是高等动物神经系统的结构和功能单位，相比其他组织细胞，神经细胞相对脆弱，更易受到外界环境因子的影响。

相比较于强辐射的影响^[91]，地磁场变化对动物体生理生化指标和神经发育的影响相对温和。其生物效应与磁场作用的阈值和暴露时间之间具有相关性。短时间的弱磁场暴露可能不会产生明显的生物效应，通常需要一定长时间的暴露后才会引起检测指标的显著性差异；然而经返回正常地磁场环境后，部分异常性生理指标是可以恢复的。我们开展针对3周龄SD雄性大鼠的亚磁场环境暴露实验研究。实验中使用的亚磁场是由赫姆霍兹线圈产生的，其强度值为 $0.48 \pm 0.08 \mu\text{T}$ 。正常地磁场环境下的大鼠为对照组。本研究中亚磁场组大鼠最大暴露时长为6周。同时在亚磁场暴露的第3周结束后进行2周的返正常地磁场实验。实验期间每周进行亚磁场组和地磁场组的大鼠血液取样，每组大鼠个体数为6只。统计分析采用 t -检验进行组间比较。结果发现，从亚磁场暴露的第2周开始，大鼠血液内的激素水平均呈现显著性降低。经返场1周后其激素水平开始回升，返场第2周后基本恢复到正常地磁场的水平(图2)。亚磁场暴露1周没有显著性差异，这说明弱磁场效应需要一定的作用时间。返场实验后激素水平的回升说明，3周亚磁场暴露所引起的激素水平下降是可逆的，可通过

返回正常地磁场得到恢复。前人研究也发现经亚磁场暴露的果蝇，其繁殖后代的学习记忆指数表现出逐代下降的趋势，其第10代果蝇的学习记忆能力和在正常的地磁场下发育成熟的对照组果蝇之间有显著性差异。但是将亚磁场中的果蝇重新转移到正常的地磁环境中进行传代，它们第6代的学习记忆能力又可恢复到正常而稳定的水平，与对照组果蝇之间没有显著性差异^[93]。

弱磁场对生物的影响作用可能有下列3种途径(图3)：(1) 磁性金属途径：磁场变化可能影响细胞内金属离子磁性状态(磁矩)变化或磁铁矿颗粒的磁矩变化，从而产生与之相关的弱磁场生物效应。研究发现经亚磁场(500 nT)处理的成骨细胞分化期间，细胞内铁的含量要高于地磁场及其他高强度磁场的处理，并发现其转铁蛋白受体表达也相应增高^[96]。在生物体中发现有磁性元素包括铁、钴、镍、钒、铬等。这些元素的离子在体内可能以多种状态存在。例如，血红蛋白中的铁离子根据其功能具有低自旋态和高自旋态。正常的状态下，血红蛋白分子中的磁性离子通常占据中心位置，往往被一组反磁性离子包围。但是，随着外部磁场的变化，它们的状态可能发生显著的变化。有研究追踪大鼠毛发内金属元素的含量发现：长期亚磁场暴露会引起铁、锰、铜和铬的浓度显著性降低^[97]。这些金属离子的变化可能会产生与动物地磁导航中的磁铁矿感磁模型类似的作用，即：金属离子磁矩的变化可调控胞内与其偶联的磁敏离子通道开关，从而进一步引起胞内、外离子浓度的变化^[31,33]。(2) 自由基途径：动物地磁导航的感光受体自由基感磁模型认为外界磁场的变化会调控细胞内的自由基电子自旋状态，影响不同能级自由基产物的数量，例如隐花色素Cry感磁过程^[59,98]，而体外研究发现细胞经亚磁场处理后，通常会引起胞内活性氧自由基(ROS)的变化。不同的细胞类型反应不同，肿瘤细胞系表现胞内ROS水平的下降^[99,100]，而原代培养的小鼠肌肉细胞内ROS水平上升^[101]，ROS的变化破坏了细胞正常的氧化还原平衡，从而可能引起与其相关的一些反应。例如ROS过多可能引起线粒体细胞膜的损伤，细胞凋亡等^[102]。(3) 骨架蛋白途径：亚磁场可能影响细胞骨架蛋白的高级结构和组装，从而引起胚胎发育、运动性异常等效应。例如非洲爪蟾胚胎经短暂的2 h亚磁场暴露，通过 α -微管蛋白免疫荧光染色显示四细胞期囊胚的纺锤体方向发

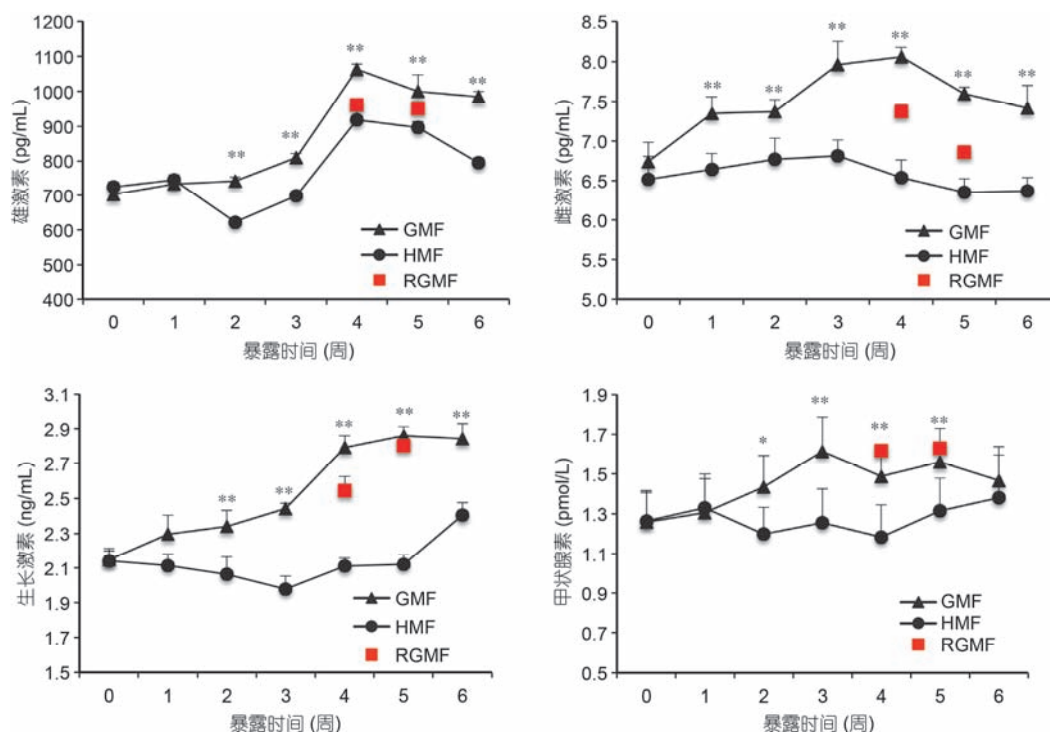


图2 (网络版彩色)对比地磁场(GMF)、亚磁场(HMF)和返地磁场(RGMF)3种磁场条件下,不同暴露时长(0~6周)大鼠血清中雄激素(androgen)、雌激素(estrogen)、游离甲状腺素(FT4)和生长激素(GH)的含量变化。数据以平均值±标准差表示,其中 $n=6$ 。0周代表地磁场适应周。地磁场和亚磁场两组 t 检验结果用星号(*)表示,统计显著性水平 $P<0.05$ (*),极其显著性水平 $P<0.01$ (**)

Figure 2 (Color online) Comparison of levels of androgen, estrogen, free thyroxine (FT4) and growth hormone of serum samples experienced control geomagnetic field, HMF and returning to the geomagnetic field (RGMF). Data expressed as mean±SD. * $P<0.05$, ** $P<0.01$. HMF, hypomagnetic field

生改变,从而干扰非洲爪蟾卵裂期的正常发育。有丝分裂纺锤体可能是亚磁场效应的初期感受器^[103]。而神经母细胞瘤SH-SY5Y暴露于亚磁场2 d后,细胞的黏附性和运动性均明显下降,主要表现为细胞内的F-肌动蛋白的数量和密度显著性降低。推测亚磁场干扰细胞骨架肌动蛋白的正常组装因此造成上述现象,而F-肌动蛋白可能是地磁场感知的中介^[104]。因此,弱磁场作用的中介物可能并不是单一的,细胞内很多成分可能会与磁场作用,从而引起不同的生物效应。

由于目前实验室内的弱磁场模拟设备多受限于周围环境磁场(背景磁场)强度和方向不规律性分布的干扰,很难在较大的中心工作区内获得稳定的极低强度均匀磁场。造成该问题的主要原因是由于现代楼房内钢筋结构以及其他含铁性物质存在的影响,即使采用主动补偿磁场系统也不能消除非均匀背景磁场的干扰。要想从根本上解决上述干扰,就必须选择背景磁场变化波动小的区域作为实验场地,同时采用稳流源和波动磁场实时补偿等方法来提高人工

弱磁场模拟设备的高性能,从而获得更低强度(<10 nT)、更好均匀性的磁场。由于月球表面岩石最大剩余磁化强度在300 nT左右,而行星际磁场平均为6.6 nT^[105,106],因此非常需要提高模拟磁场的硬件设备以能够进一步开展极弱磁场生物效应研究,并且要强调从行为、功能到多种组学的系统性研究方法,以揭示生物感应地磁场的分子机理。在实际的深空探测飞行中,宇航员面临的是强辐射、弱磁场和变化重力的组合复杂环境因子的影响,并且地磁场的减弱和强辐射增强的组合效应也是地磁场倒转期间地球上生物所面临的环境压力。所以针对不同深空探测环境因素的组合效应研究应也是今后的重点研究课题。

3 结论与展望

动物感磁现象在自然界是普遍存在的。这可能是由于生命的起源和演化都是在地磁场环境中进行的,在长期的演化过程中,动物演化出感磁能力来适应地磁场环境,从而帮助动物更好地完成某些生理

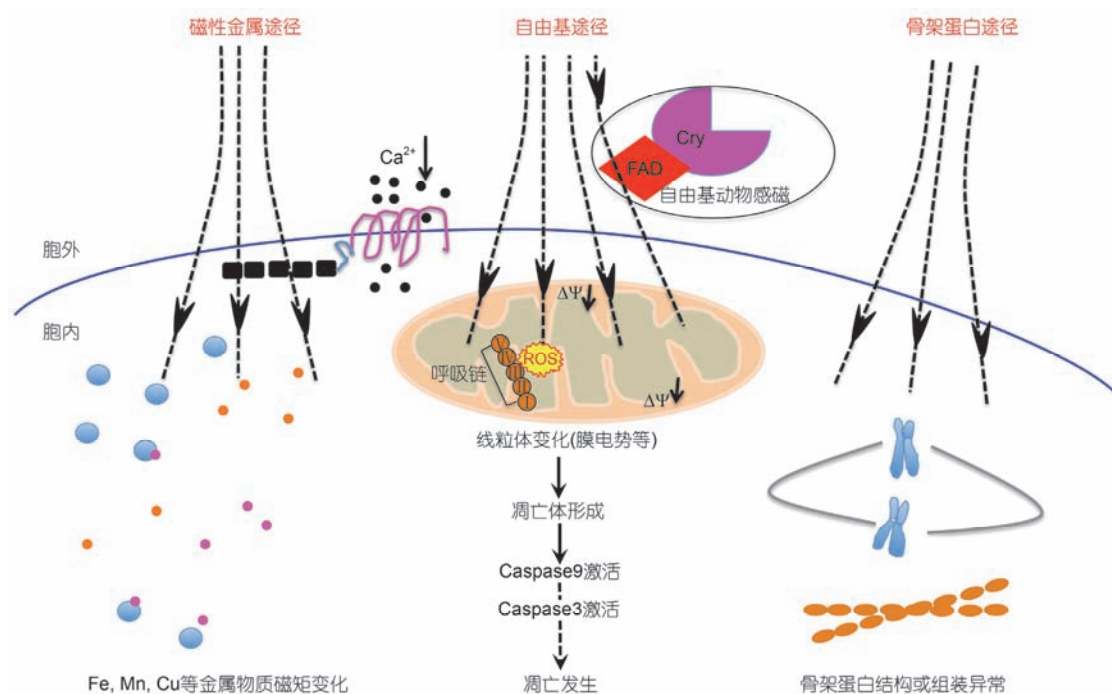


图3 (网络版彩色)弱磁引起生物效应的 3 种可能途径示意图. 磁性金属途径指弱磁场可能通过影响细胞内金属离子浓度或磁铁矿颗粒的磁矩, 进一步控制与磁性金属相关联的离子通道等, 引起弱磁场生物效应; 自由基途径指弱磁场可能调控细胞内不同能级自由基产率, 类似动物体内隐花色素(Cry)感磁过程, 进一步弱磁场引起的胞内活性氧自由基(ROS)等变化可能引起线粒体细胞膜的损伤, 细胞凋亡等, 从而产生弱磁场生物效应; 骨架蛋白途径指弱磁场可能通过干扰骨架蛋白的正常结构和组装, 例如肌动蛋白, 进一步引起与之相关的细胞分裂、胚胎发育以及细胞运动性异常等弱磁场生物效应. FAD: 黄素腺嘌呤二核苷酸

Figure 3 (Color online) Three possible pathways to the biological effects of the weak magnetic field. The metal ions or magnetite in cells as a mediator of magnetic field sensation induces the change of concentration of metal ions or the magnetic moment of magnetite particles. This transiently activates the channel leading to cation influx and membrane depolarization; the free radical pairs pathway hypothesizes the spin state of free electrons in radical pairs depends on the change of the local magnetic field. For example, the changes of reactive oxygen species (ROS) in cells by hypomagnetic field exposure may induce the damage of mitochondrial membrane and apoptosis. The cytoskeleton pathway indicates the actin cytoskeleton probably as a mediator responds to the change of the local magnetic field. The disorder of cytoskeleton may result in the abnormal cell division or cell cycle. Cry, cryptochrome; FAD, flavin adenine dinucleotide

活动. 动物地磁导航感磁受体类型可能具有物种差异性. 将来在获得足够多的感磁物种后, 结合系统发育分析可能会得到感磁能力与物种演化之间的联系. 不同的动物可能利用不同的感磁受体或者二者兼具, 只是针对不同的生理活动和所处环境条件来选择使用. 目前感磁受体大致定位多位于动物的头部^[38,44,47], 包括地磁场可能作用于鸟类内耳瓶状囊, 然后将感知的地磁场信息传递到脑干某些特定神经

元细胞被感知^[107,108]. 越来越多的证据表明, 地磁场是地球上生物维持正常的生理活动、生长发育或必不可少的环境因子. 虽然地磁场变化影响动物的靶细胞或靶分子目前并不清楚, 但是已有的证据指示细胞内的磁性物质、自由基产物或骨架蛋白可能是响应磁场的中介物. 下一步可结合多学科的交叉实验技术对这些可能的磁场中介物进行深入研究^[28], 以期准确地解析地磁场变化影响动物的分子机理.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所林巍研究员对文章提出的建设性意见和中国科学院地质与地球物理研究所研究生张兵芳在大鼠亚磁场效应实验中的帮助. 感谢审稿人提出宝贵的建设性修改意见.

参考文献

- 1 Uffen R J. Influence of the Earth's Core on the origin and evolution of life. *Nature*, 1963, 198: 143–144
- 2 Pan Y X, Zhu R X. A review of biogeophysics: The establishment of a new discipline and recent progress (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 1335–1344 [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: 1335–1344]
- 3 Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region. *J Geophys Res*, 2012, 117: A03208
- 4 Tarduno J A, Blackman E G, Mamajek E E. Detecting the oldest geodynamo and attendant shielding from the solar wind: Implications for habitability. *Phys Earth Planet Int*, 2014, 233: 68–87
- 5 Thébault E, Finlay C C, Beggan T D, et al. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth Planets Space*, 2015, 67: 79
- 6 Glassmeier K H, Soffel H, Negendank J W. *Geomagnetic Variations*. Berlin: Springer, 2009. 25–63
- 7 Zhong J, Wan W X, Wei Y, et al. Increasing exposure of geosynchronous orbit to solar wind due to decay of Earth's dipole field. *J Geophys Res Space Phys*, 2014, 119: 9816–9822
- 8 Merrill R T, McFadden P L. Geomagnetic polarity transitions. *Rev Geophys*, 1999, 37: 201–226
- 9 Zhu R X, Ding Z L, Wu H N, et al. Details of magnetic polarity transition recorded in Chinese Loess. *J Geomagn Geoelectr*, 1993, 45: 289–299
- 10 Fabian K, Leonhardt R. Records of paleomagnetic field variations. In: Glassmeier K H, Soffel H, Negendank J W, eds. *Geomagnetic Variations*. Berlin: Springer, 2009. 65–106
- 11 Hays J D. Faunal extinctions and reversals of the Earth's magnetic field. *Geol Soc Am Bull*, 1971, 82: 2433–2447
- 12 Raup D M. Magnetic reversals and mass extinctions. *Nature*, 1985, 314: 341–343
- 13 Wei Y, Pu Z Y, Zong Q G, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 394: 94–98
- 14 Huey R B, Ward P D. Hypoxia, global warming, and terrestrial late Permian extinctions. *Science*, 2005, 308: 398–401
- 15 Meert J G, Levashova N M, Bazhenov M L, et al. Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: Linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation. *Gondwana Res*, 2016, 34: 149–157
- 16 Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *J Comp Physiol A*, 2005, 191: 675–693
- 17 Cain S D, Boles L C, Wang J H, et al. Magnetic orientation and navigation in marine turtles, lobsters, and molluscs: Concepts and conundrums. *Integr Comp Biol*, 2005, 45: 539–546
- 18 Wiltschko W. Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Z Tierpsychol*, 1968, 25: 537–558
- 19 Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetic compass of European robins. *Science*, 1972, 176: 62–64
- 20 Wiltschko W, Wiltschko R. Migratory orientation of European robins is affected by the wavelength of light as well as by a magnetic pulse. *J Comp Physiol A*, 1995, 177: 363–369
- 21 Bottesch M, Gerlach G, Halbach M, et al. A magnetic compass that might help coral reef fish larvae return to their natal reef. *Curr Biol*, 2016, 26: R1266–R1267
- 22 Boles L C, Lohmann K J. True navigation and magnetic map in spiny lobsters. *Nature*, 2003, 421: 60–63
- 23 Mouritsen H. Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature*, 2018, 558: 50–59
- 24 Lohmann K J, Willows A O D. Lunar-modulated geomagnetic orientation by a marine mollusk. *Science*, 1987, 235: 331–334
- 25 Jacklyn P M, Munro U. Evidence for the use of magnetic cues in mound construction by the termite *Amitermes meridionalis* (Isoptera, Termitinae). *Aust J Zool*, 2002, 50: 357–368
- 26 Begall S, Cervený J, Neef J, et al. Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13451–13455
- 27 Begall S, Burda H, Malkemper E P. Magnetoreception in Mammals. *Adv Stud Behav*, 2014, 46: 45–88
- 28 Nordmann G C, Hochstoeger T, Keays D A. Magnetoreception—A sense without a receptor. *PLoS Biol*, 2017, 15: 2003234
- 29 Kirschvink J L, Gould J L. Biogenic magnetite as a basis for magnetic detection in animals. *Biosystems*, 1981, 13: 181–201
- 30 Shcherbakov V P, Winklhofer M. The osmotic magnetometer: A new model for magnetite-based magnetoreceptors in animals. *Eur Biophys J*, 1999, 28: 380–392
- 31 Davila A F, Fleissner G, Winklhofer M, et al. A new model for a magnetoreceptor in homing pigeons based on interacting clusters of superparamagnetic magnetite. *Phys Chem Earth*, 2003, 28: 647–652

- 32 Solov'yov I A, Greiner W. Theoretical analysis of an iron mineral-based magnetoreceptor model in birds. *Biophys J*, 2007, 93: 1493–1509
- 33 Winklhofer W, Kirschvink J L. A quantitative assessment of torque-transducer models for magnetoreception. *J R Soc Interface*, 2010, 7: S273–S289
- 34 Davila A F, Winklhofer M, Shcherbakov V P, et al. Magnetic pulse affects a putative magnetoreceptor mechanism. *Biophys J*, 2005, 89: 56–63
- 35 Walker M M. A model for encoding of magnetic field intensity by magnetite-based magnetoreceptor cells. *J Theor Biol*, 2008, 250: 85–91
- 36 Kirschvink J L, Jones D S, MacFadden B J. *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms*. New York: Plenum Press, 1985
- 37 Holland R A, Kirschvink J L, Doak T G, et al. Bats use magnetite to detect the Earth's magnetic field. *PLoS One* 2008, 3: e1676
- 38 Tian L X, Lin W, Zhang S Y, et al. Bat head contains soft magnetic particles: Evidence from magnetism. *Bioelectromagnetics*, 2010, 31: 499–503
- 39 Penninga I, Dewaard H, Moskowitz B M, et al. Remanence measurements on individual magnetotactic bacteria using a pulsed magnetic-field. *J Magn Magn Mater*, 1995, 149: 279–286
- 40 Marhold S, Burda H, Kreilos I, et al. Magnetic orientation in the common mole-rat from Zambia. In: *Orientation and Navigation-birds, Humans and other Animals*. Oxford: Royal Institute of Navigation, 1997.
- 41 Beason R C, Wiltschko R, Wiltschko W. Pigeon homing: Effects of magnetic pulse on initial orientation. *Auk*, 1997, 114: 405–415
- 42 Wiltschko W, Munro U, Ford H, et al. Avian orientation: The pulse effect is mediated by the magnetite receptors in the upper beak. *Proc R Soc B*, 2009, 276: 2227–2232
- 43 Semm P, Beason R C. Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink. *Brain Res Bull*, 1990, 25: 735–740
- 44 Walker M M, Diebel C E, Haugh C V, et al. Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature*, 1997, 390: 371–376
- 45 Eder S H K, Cadiou H, Muhamad A, et al. Magnetic characterization of isolated candidate vertebrate magnetoreceptor cells. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 12022–12027
- 46 Hanzlik M, Heunemann C, Holtkamp-Rötzler E, et al. Superparamagnetic magnetite in the upper beak tissue of homing pigeons. *Biometals*, 2000, 13: 325–331
- 47 Fleissner G, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M, et al. Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons. *J Comp Neurol*, 2003, 458: 350–360
- 48 Mora C V, Davison M, Wild J M, et al. Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon. *Nature*, 2004, 432: 508–511
- 49 Tian L X, Xiao B, Lin W, et al. Testing for the presence of magnetite in the upper-beak skin of homing pigeons. *Biometals*, 2007, 20: 197–203
- 50 Treiber C D, Salzer M C, Riegler J, et al. Clusters of iron-rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons. *Nature*, 2012, 484: 367–370
- 51 Edelman N B, Fritz T, Nimpf S, et al. No evidence for intracellular magnetite in putative vertebrate magnetoreceptors identified by magnetic screening. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 262–267
- 52 Falkenberg G, Fleissner G, Schuchardt K, et al. Avian magnetoreception: Elaborate iron mineral containing dendrites in the upper beak seem to be a common feature of birds. *PLoS One*, 2010, 5: e9231
- 53 Hsu C Y, Li C W. The ultrastructure and formation of iron granules in the honeybee (*Apis mellifera*). *J Exp Biol*, 1993, 180: 1–13
- 54 Hsu C Y, Li C W. Magnetoreception in honeybees. *Science*, 1994, 265: 95–97
- 55 Hsu C Y, Ko F Y, Li C W, et al. Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*). *PLoS One*, 2007, 2: e395–e406
- 56 Acosta-Avalos D, Wajnberg E, Oliveira P S, et al. Isolation of magnetic nanoparticles from *Pachycondyla marginata* ants. *J Exp Biol*, 1999, 202: 2687–2692
- 57 Oliveira J F, Wajnberg E, Esquivel D M S, et al. Ant antennae: Are they sites for magnetoreception? *J R Soc Interface*, 2010, 7: 143–152
- 58 Schulten K, Swenberg C E, Weller A. Biomagnetic sensory mechanism based on magnetic-field modulated coherent electron-spin motion. *Z Phys Chem Neue Fol*, 1978, 111: 1–5
- 59 Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photo-receptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J*, 2000, 78: 707–718
- 60 Hore P J, Mouritsen H. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annu Rev Biophys*, 2016, 45: 299–344
- 61 Wiltschko R, Stapput K, Thalau P. Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *J Roy Soc Interface*, 2010, 7: S163–S177
- 62 Phillips J B, Borland S C. Behavioral evidence for use of a light-dependent magnetoreception mechanism by a vertebrate. *Nature*, 1992, 359: 142–144
- 63 Phillips J B, Jorge P E, Muheim R. Light-dependent magnetic compass orientation in amphibians and insects: Candidate receptors and candidate molecule mechanisms. *J R Soc Interface*, 2010, 7: S241–S256

- 64 Timmel C R, Hore P J. Oscillating magnetic field effects on the yields of radical pair reactions. *Chem Phys Lett*, 1996, 257: 401–408
- 65 Ritz T. Disrupting magnetic compass orientation with radio frequency oscillating fields. In: *Orientation and Navigation—Birds, Humans and Other Animals*. Oxford: Royal Institute of Navigation, 2001
- 66 Henbest K B, Kukura K, Rodgers T C, et al. Radiofrequency magnetic field effects on a radical recombination reaction: A diagnostic test for the radical pair mechanism. *J Am Chem Soc*, 2004, 126: 8102–8103
- 67 Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, et al. Magnetoreception in birds: The effect of radio-frequency fields. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 1103
- 68 Thalau P, Ritz T, Stapput K, et al. Magnetic compass orientation of migratory birds in the presence of a 1.315 MHz oscillating field. *Naturwissenschaften*, 2005, 92: 86–90
- 69 Wiltschko W, Freire R, Munro U, et al. The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. *J Exp Biol*, 2007, 210: 2300–2310
- 70 Keary N, Ruploh T, Voss J, et al. Oscillating magnetic field disrupts magnetic orientation in zebra finches, *Taeniopygia guttata*. *Front Zool*, 2009, 6: 25
- 71 Wiltschko W. Further analysis of the magnetic compass of migratory birds. In: Schmidt-Koenig K, Keeton W T, eds. *Animal Migration, Navigation, and Homing*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978. 302–310
- 72 Wiltschko W, Stapput K, Thalau P, et al. Avian magnetic compass: Fast adjustment to intensities outside the normal functional window. *Naturwissenschaften*, 2006, 93: 300–304
- 73 Winklhofer M, Dylida E, Thalau P, et al. Avian magnetic compass can be tuned to anomalously low magnetic intensities. *Proc Biol Sci*, 2013, 280: 20130853
- 74 Rodgers C T. Magnetic field effects in chemical systems. *Pure Appl Chem*, 2009, 81: 19–43
- 75 Steiner U E, Ulrich T. Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena. *Chem Rev*, 1989, 89: 51–147
- 76 Woodward J R. Radical pairs in solution. *Prog React Kinet Mech*, 2002, 27: 165–207
- 77 Qin S, Yin H, Yang C, et al. A magnetic protein biocompass. *Nat Mater*, 2016, 15: 217–226
- 78 Pang K L, You H, Chen Y B, et al. MagR alone is insufficient to confer cellular calcium responses to magnetic stimulation. *Front Neural Circuits*, 2017, 11: 11
- 79 Meister M. Physical limits to magnetogenetics. *Elife*, 2016, 5: e17210
- 80 Kirschvink J L, Walker M M, Diebel C E. Magnetite-based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol*, 2001, 11: 462–467
- 81 Lin W, Paterson G A, Zhu Q, et al. Origin of microbial biomineralization and magnetotaxis during the Archean. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 2171–2176
- 82 Lin W, Pan Y X. Magnetotaxis and magnetosome biomineralization in microorganisms (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 115–126 [林巍, 潘永信. 微生物的趋磁性与磁小体的生物矿化. *地球科学*, 2018, 43: 115–126]
- 83 Mo W C, Liu Y, He R Q. A biological perspective of the hypomagnetic field: From definition to mechanism (in Chinese). *Prog Biochem Biophys*, 2012, 39: 835–842 [莫伟川, 刘纓, 赫荣乔. 亚磁及其生物响应机制. *生物化学与生物物理进展*, 2012, 39: 835–842]
- 84 Dyal P, Parkin C W, Daily W D. Magnetism and the interior of the Moon. *Rev Geophys Space Phys*, 1974, 12: 568–591
- 85 Watters T R, McGovern P J, Irwin R P. Hemispheres apart: The crustal dichotomy on Mars. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 621–652
- 86 Zhadin M N. Review of Russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 2001, 22: 27–45
- 87 Sarimov R M, Bingi V N, Miliaev V A. Influence of the compensation of the geomagnetic field on human cognitive processes. *Biofizika*, 2008, 53: 856–866
- 88 Binhi V N, Sarimov R M. Zero magnetic field effect observed in human cognitive processes. *Electromagn Biol Med*, 2009, 28: 310–315
- 89 Gurfinkel I, Vasin A L, Matveeva T A, et al. Evaluation of the hypomagnetic environment effects on capillary blood circulation, blood pressure and heart rate. *Aerospace Environ Med*, 2014, 48: 24–30
- 90 Jia B, Shang P. Research progress of biological effects of hypomagnetic fields (in Chinese). *Space Med Med Eng*, 2009, 22: 78–82 [贾斌, 商澎. 亚磁环境生物学效应的研究进展. *航天医学与医学工程*, 2009, 22: 78–82]
- 91 Binhi V N, Prato F S. Biological effects of the hypomagnetic field: An analytical review of experiments and theories. *PLoS One*, 2017, 12: e0179340
- 92 Wang X, Xu M, Li B, et al. Long-term memory was impaired in one-trial passive avoidance task of day-old chicks hatching from hypomagnetic field space. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 2454–2457
- 93 Zhang B, Lu H, Xi W, et al. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster*. *Neurosci Lett*, 2004, 371: 190–195
- 94 Bliss V L, Heppner F H. Circadian activity rhythm influenced by near zero magnetic field. *Nature*, 1976, 261: 411–412

- 95 Mo W C, Fu J P, Ding H M, et al. Hypomagnetic field alters circadian rhythm and increases algesia in adult male mice. *Prog Biochem Biophys*, 2015, 42: 639–646
- 96 Yang J C, Zhang J, Ding C, et al. Regulation of osteoblast differentiation and iron content in MC3T3-E1 cells by static magnetic field with different intensities. *Biol Trace Elem Res*, 2018, 184: 214–225
- 97 Tombarkiewicz B. Effect of long-term geomagnetic field deprivation on the concentration of some elements in the hair of laboratory rats. *Environ Toxicol Phar*, 2008, 26: 75–79
- 98 Maeda K, Robinson A J, Henbest K B, et al. Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 4774–4779
- 99 Martino C F, Castello P R. Modulation of hydrogen peroxide production in cellular systems by low level magnetic fields. *PLoS One*, 2011, 6: e22753
- 100 Zhang H T, Zhang Z J, Mo W C, et al. Shielding of the geomagnetic field reduces hydrogen peroxide production in human neuroblastoma cell and inhibits the activity of CuZn superoxide dismutase. *Protein Cell*, 2017, 8: 527–537
- 101 Fu J P, Mo W C, Liu Y, et al. Decline of cell viability and mitochondrial activity in mouse skeletal muscle cell in a hypomagnetic field. *Bioelectromagnetics*, 2016, 37: 212–222
- 102 Ott M, Gogvadze V, Orrenius S, et al. Mitochondria, oxidative stress and cell death. *Apoptosis*, 2007, 12: 913–922
- 103 Mo W C, Liu Y, Cooper H M, et al. Altered development of *Xenopus embryos* in a hypogeomagnetic field. *Bioelectromagnetics*, 2012, 33: 238–246
- 104 Mo W C, Zhang Z J, Wang D L, et al. Shielding of the geomagnetic field alters actin assembly and inhibits cell motility in human neuroblastoma cells. *Sci Rep*, 2016, 6: 22624
- 105 Steinhilber F, Abreu J A, Beer J, et al. Interplanetary magnetic field during the past 9300 years inferred from cosmogenic radionuclides. *J Geophys Res*, 2010, 115: A01104
- 106 Berguig M S, Hamoudi M, Lemoueel J L. Validate global mapping of internal lunar magnetic field. *Arabian J Geosci*, 2011, 6: 1063–1072
- 107 Wu L Q, Dickman J D. Magnetoreception in an avian brain in part mediated by inner ear lagena. *Curr Biol*, 2011, 21: 418–423
- 108 Wu L Q, Dickman J D. Neural correlates of a magnetic sense. *Science*, 2012, 336: 1054–1057

Summary for “地磁场与动物感磁”

The geomagnetic field effects on animals: A review

Lanxiang Tian^{1*} & Yongxin Pan^{1,2*}¹ Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;² College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding authors, E-mail: tianlx@mail.iggcas.ac.cn; yxpan@mail.iggcas.ac.cn

The geomagnetic field (GMF) maintains the Earth's long-term habitability for living organisms by preventing the radiation of solar wind and the oxygen and water ions escape. Understanding the biological effects of present, past and future changes of geomagnetic field is the main goal of biogeomagnetic research. As a nature element of Earth habitability environment, the role of geomagnetic field for all living organisms on the earth has recently attracted the attention of geophysicists and biologists. The intensity, declination and inclination of the GMF have provided reliable navigational reference information for animal orientation or migration. Many animals are able to perceive the geomagnetic field for orientation and navigation. Meanwhile, the presence of geomagnetic field is an essential environmental condition for the growth and development of living organisms on Earth. An increasing body of evidence suggests that once the GMF is weakened or deprived, it can cause a variety of negative biological responses. For example, long-term geomagnetic field shielding may lead to the emergence of abnormal embryonic development in *Xenopus*. Here we review the recent progresses made on the animals' geomagnetic navigation and the biological effects of the geomagnetic field. Three major magnetoreception mechanisms and their corresponding evidences are discussed: (1) Electromagnetic induction, which hypothesizes the production of voltage across an electrical conductor moving through a static magnetic field, referring to elasmobranch fish (sharks, skates, and rays) in particular; (2) Magnetic-particle-based magnetoreception, which hypothesizes the intracellular biomineralized magnetic crystals act as compass needles; and (3) Radical-pair-based magnetoreception, which hypothesizes the quantum mechanics of electron spins could form the basis of a magnetic compass sense. Biological responses of animals in the weakened geomagnetic field and possible pathways to the biological effects are also discussed: Metal ions pathway, radical pair pathway and cytoskeleton pathway. The first two pathways are further extension of the animal magnetoreception mechanisms. The metal ions pathway hypothesizes a weak magnetic field causes the change of concentration/magnetic moment of metal ions in cells, which transiently activates the channel leading to cation influx and membrane depolarization. The radical pairs pathway hypothesizes the spin state of free electrons in radical pairs in cells depends on the change of the local magnetic field. For example, the changes of reactive oxygen species (ROS) in cells by hypomagnetic field exposure may induce the damage of mitochondrial membrane and apoptosis. The cytoskeleton pathway indicates the actin cytoskeleton probably as a mediator responds to the change of geomagnetic field. Although the cellular and molecular mechanisms of magnetic sense in animals still remain much unclear, the multidisciplinary collaborative approach involving geophysics, chemistry and biology will bring the exciting breakthrough times in this field.

geomagnetic field, environmental factors, animal geomagnetic navigation, hypomagnetic field, biological responses, growth and development

doi: 10.1360/N972018-00650