

超顺磁磁铁矿磁接收器磁学模型

钱霞

(聊城大学物理科学与信息工程学院山东省光通信科学与技术重点实验室, 聊城 252059)

摘要: 生物磁铁矿磁接收器理论模型包括单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型. 蜜蜂体内存在典型的超顺磁磁铁矿颗粒. 本文以蜜蜂为例, 从磁学理论角度出发, 定性的探讨了超顺磁磁铁矿磁接收器的磁学模型和工作机制. 在外磁场作用下, 每个超顺磁颗粒会受到力的作用, 同时伴随着尺寸沿着一定方向的收缩和扩张. 超顺磁颗粒把力以及扩张收缩作用传递给外面的生物膜及生物骨架(埋藏在神经系统中)从而产生相应的神经信号, 而多个超顺磁颗粒磁接收系统的存在会放大和加强信号的产生.

关键词: 生物磁铁矿; 磁接收器; 超顺磁磁铁矿磁接收器; 磁学模型

中图分类号: Q64 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)06-1295-06

The magnetic model of the superparamagnetic magnetite magnetoreception

QIAN Xia

(School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology of Shandong Province, Liaocheng 252059, China)

Abstract: The model of biomagnetite magnetoreceptions include the model of single-domain magnetite magnetoreception and the model of superparamagnetic magnetite magnetoreception. In honeybees, there are many typical superparamagnetic magnetites. So in this paper, the magnetic model and working mechanism of the superparamagnetic magnetite magnetoreception are discussed qualitatively from the point of view of theory of magnetism taking the example of honeybees. In the outer magnetic field, each superparamagnetic magnetite can be act on with the size extend or contract along different directions. Superparamagnetic magnetites transmit the force and change of size to the outer biomembrane and eukaryotic cytoskeleton which embedding in the nervous system, so a nerve signal can be produced. The signals can be magnified because many superparamagnetic magnetites exist.

Keywords: Biomagnetite; Magnetoreception; Superparamagnetic magnetite magnetoreception; Magnetic model

1 引言

自然界中很多生物, 可以长途跋涉不迷路, 如鸟类迁徙等. 科学家们认为, 生物具有被称为“第六感”的磁觉, 即利用地磁场准确寻找正确方向. 许多动物物种都有感知地球磁场的的能力, 能感知磁场的

方向、强度或者倾斜度, 把此类信息作为导航线索^[1-2]. 这种现象背后潜在的生物学机制引起科学家的广泛关注, 但迄今为止, 关于生物磁感觉机制存在多种假设理论, 并不完全清楚. 目前最新的理论来自北京大学谢灿教授及其研究团队. 他们在多个动物物种中发现了一种磁感应蛋白(MagR)与

光敏隐花色素蛋白组成的含铁元素的复合体(MagR/Cry),可以在磁场中定位方向,相关论文在线发表在《自然·材料》上,这一发现将开启科学界以生物指南针结构为基础的“磁遗传学”的研究浪潮^[3].更早前存在着多个生物化学模型,最广泛的是“自由基理论”模型:磁受体很有可能来自一种名为 Cryptochrome(Cry)的蓝光受体蛋白,过程涉及电子在磁场下的量子化学反应,且需要视觉系统的参与^[4].

在早期,同时还存在着另一个被接受的磁感觉机制,即磁铁矿磁接收器机制.在从原生生物到哺乳动物的广泛分布的生物体中存在着纳米磁铁矿粒子,这些生物磁铁矿粒子在严格的生物控制下形成,具有独特的、规则的晶体结构、外形和分布形态,且与神经组织有着密切联系^[5-6].有研究者认为生物磁铁矿与周围组织(包括神经组织)构成磁接收器,它在与外界磁场的相互作用中,将外界磁场信息转化成神经信息促使生物作出相应的反应.

对于以磁铁矿为基础的磁接收器机制的提出,既有理论上的考虑,又有实验结果的支持,可以从感觉神经元中被探测到.比如:外加磁场可以引起蜜蜂体内的超顺磁磁铁矿粒子尺寸的变化;在鸟和鱼中,含有磁铁矿粒子的解剖点都是被三叉神经的视神经所支配;在虹鳟鱼中,外加磁场可以引起它的鼻子上的三叉神经的分支——视神经(ros V 神经)(神经细胞中存在单畴磁铁矿粒子)的反应;鸟类中,三叉神经中心处的细胞在磁场改变时表现出活动电压增加的现象,视神经对小到地磁场强度0.5%的垂直场强度变化有反应;食米鸟中,当阻止三叉神经中的视神经工作时,外界磁场的作用会消失;把相当于一个趋磁细菌量的磁铁矿连接在一个高级动物的感觉神经元上,可以提供给这个动物(比如蚂蚁、蜜蜂、鲑鱼甚至鲸)格外好的磁罗盘感觉;短而强的磁脉冲实验生物物理分析表明成千万的包含磁铁矿的细胞排列能够对超过0.1%的磁场强度变化发生反应^[7-8].谢灿教授在他的文章中也未完全否决磁铁矿磁接收器,蛋白质在磁铁矿的形成过程中起重要作用,且有些磁铁矿粒子位于视觉神经上,他也认为在生物体中或许几种磁接收器机制共同配合完成对磁场信息的转换,所以,有必要从理论和实验上对生物磁铁矿磁接收器做深入研究.在本文中,我们就从磁学理论角度出发定性探讨了超顺磁磁铁矿磁接收器模型.

2 超顺磁磁铁矿磁接收器的假设模型

生物合成磁铁矿具有非常相似的特征,晶体独立,结构完美,具有规则的形状和大小,在严格生物控制下形成,大多数是超顺磁颗粒或单畴颗粒,在分布上与神经组织有密切的联系.研究者认为,外界磁场的各个参量(强度、方向、倾角等)对家鸽、蜜蜂、趋磁细菌等生物的定向飞行、迁移等行为起作用,磁场方向矢量可以提供方向信息,磁场强度和(或)磁场倾角被用作辨别方位,在这过程中,生物磁铁矿及周围组织(包括神经组织)起着关键作用.

生物磁铁矿磁接收器模型首先被美国科学家 Kirschvink 提出,然后迅速得到其他研究者的认同,并被不断进一步细化.Kirschvink 等认为,生物磁铁矿磁接收器模型包括单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型.对于超顺磁磁铁矿磁接收器模型,他认为,超顺磁颗粒在外界磁场不存在的情况下不具有永久磁矩.如果存在外界磁矩,超顺磁颗粒并不会旋转,将会诱导产生一个磁矩,而外界磁场的方向不同,磁性粒子束中的各颗粒之间会互相吸引或互相排斥,使膜变形,并可能打开或关闭一个通道,进而引起跨膜电荷的移动,产生相应的细胞膜电位变化.神经系统通过检测这种因磁性晶体颗粒簇阵列膨胀或收缩产生的细胞膜电位变化,从而分辨出外部磁场的方向和强度等信息^[9].其他类似的模型比如:存在于家鸽上喙的磁铁矿粒子束连接在机械感觉离子通道上,而离子通道位于三叉神经末梢质膜上(通过细纤维连接着磁铁矿粒子束和质膜),外界磁刺激可以引起磁铁矿颗粒的形变,形变又可以由机械感觉器官的膜接收通道转变成初步的接收势,感觉神经元把这个刺激的化学或物理能量转化成电信号,而这个电信号可以被大脑发射或处理.

生物磁铁矿磁接收器机制自从被提出后,在理论上,迅速被其他研究者接受并被进一步细化.但很多细节未涉及到,未建立起严格的理论分析模型,很多论点处于假设阶段,未得到实验的认证.尤其是作为一种自然界中非常重要的亚铁磁材料,有关生物体磁铁矿的磁学特性的实验和理论研究并不被多涉及,从物理学的角度展开对生物磁铁矿及磁接收器的物理特性研究的工作不多.在这里,我们尝试从磁学角度解释外磁场对蜜蜂中超顺磁磁铁矿颗粒的作用,探讨超顺磁磁铁矿磁接收器磁学

模型.

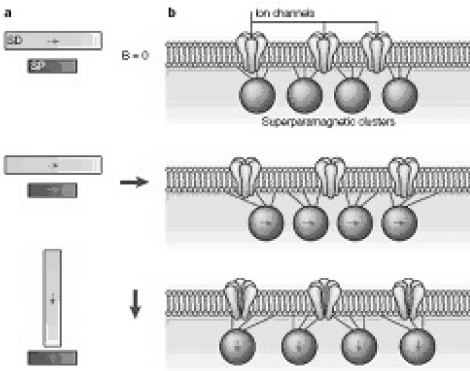


图 1 一种假设的单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型^[7]

Fig. 1 One hypothetical model of single-domain magnetite magnetoreception and superparamagnetic magnetite magnetoreception^[7]

3 蜜蜂中的超顺磁磁铁矿颗粒

蜜蜂腹部侧面环绕腹部外皮的下面的滋养细胞的细胞质中存在直径大约为 $0.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 的超顺磁磁铁矿粒子, 每个超顺磁颗粒外面包围着一层膜, 沉积在小囊泡中, 细胞骨架连接铁沉积小囊泡分布在末梢神经系统中^[10].

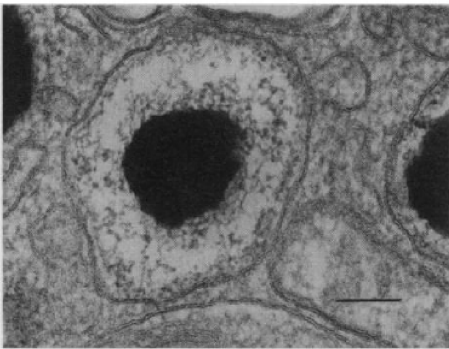


图 2 蜜蜂脂肪层中发现的磁铁矿粒子, 标尺 $0.1 \mu\text{m}$ ^[10]

Fig. 2 Magnetite granules found in honeybee fat body, Bar, $0.1 \mu\text{m}$ ^[10]

粒子具有剩磁, 大概是 $2.5 \times 10^{-5} \text{ emu}$, 饱和磁性大概是 $2.83 \times 10^{-4} \text{ emu}$, 固有矫顽力大约是 100–150 高斯, 属于软磁材料, 易磁化方向位于晶体表面上, 具有单畴结构, 处于超顺磁状态. 刚刚纯化出的超顺磁颗粒并没有聚集在一起, 而是松散的堆积在一起, 粒子之间保持着一定的短距离, 大约是 $50 \pm 10 \text{ nm}$, 这可能是由于它们之间具有弱磁力.

研究发现, 在外加磁场的作用下, 在低磁化状态下, 无论是在活的或死的滋养细胞中, 磁铁矿粒子看上去是小的黑色的粒子, 在较高的磁化状态下, 磁铁矿粒子变成大一点黑色的粒子. 施加 1 高斯的外部磁场 2 min 后, 在活着的滋养细胞中的磁铁矿粒子沿着磁场的方向收缩了 $12 \pm 1.7\%$, 在垂直方向上扩张了 $1.2 \pm 0.5\%$. 在死亡了的滋养细胞中的磁铁矿粒子则沿着磁场的方向收缩了 $13 \pm 1.4\%$, 在垂直方向上扩张了 $4.4 \pm 0.9\%$; 可能是由于铁沉积囊泡膜的相互抗拒作用, 活的滋养细胞中的磁铁矿粒子尺寸的变化情况要小于死亡滋养细胞中的磁铁矿粒子的尺寸变化. 外加磁场还可以引起钙离子 Ca^{2+} 从滋养细胞中被释放^[11-13].

4 超顺磁磁铁矿磁接收器磁学模型

对于每一个超顺磁磁铁矿粒子, 仍然属于亚铁磁物质, 里面包含了若干个小的单畴粒子. 由于粒子内磁性原子或离子之间的强交换作用, 单畴粒子具有磁矩, 磁矩取向在由磁晶各向异性所决定的易磁化方向上. 但由于超顺磁效应, 受到热扰动动能的影响, 单畴粒子的磁矩方向就可能随着时间的推移, 整体保持平行地在一个易磁化方向和另一个易磁化方向之间反复变化. 从单畴颗粒集体角度看, 不同颗粒的磁矩取向每时每刻都在变换方向, 不同颗粒的磁矩取向不同, 颗粒集体总体上不表示出磁性. 在外磁场作用下, 超顺磁颗粒会被磁化, 超顺磁颗粒内单畴粒子就像偶极子, 可以在磁场中自由旋转, 磁矩倾向于沿外磁场方向排列, 从而使超顺磁颗粒的势能最小, 磁矩最大 (磁化性质类似于顺磁性物质, 见图 4). 但热扰动始终存在, 会打乱这种定向排列, 在有限外加磁场情况下, 超顺磁颗粒的磁矩介于最大和零之间.

在外磁场作用下, 超顺磁颗粒的磁化遵循居里-万斯定律. 假设超顺磁颗粒每单位体积中含有 n 个单畴粒子, 每个单畴粒子的磁矩为 μ , 假定每个磁矩的矢量都经过一个单位球的球心, Z 正向沿着外磁场方向, 单畴颗粒磁矩与外磁场方向夹角为 θ , 无外磁场时, 经过球表面上单位面积的磁矩矢量在球面各处都相同. 在外磁场作用下, 各粒子磁矩向外磁场方向转动, 但热扰动会破坏这种转动, 定义磁矩位于在 θ 和 $\theta + d\theta$ 之间的粒子数量为 dn , 则平衡时有^[14]:

$$dn = 2\pi K e^{\frac{\mu H \cos\theta}{kT}} \sin\theta d\theta \quad (1)$$

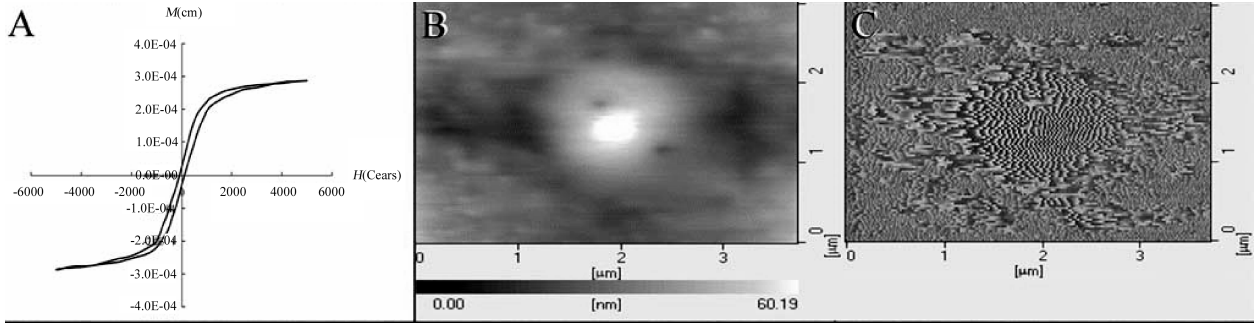


图 3 蜜蜂腹部铁粒子的磁学特性. (A)利用 SQUID 得到的磁化曲线(B)一个铁粒子的 AFM 图像. (c)铁粒子(与 B 同样位置)的磁畴结构 MFM 图像^[11]

Fig. 3 The magnetic properties of iron granules in the abdomen of honeybees determined by magnetic-determining techniques. (A) An averaged magnetization curve of SQUID from the purified IGs. (B) An image of AFM from one of the purified IGs. (C) An image of MFM from one of the purified IGs(at the same site in B)^[11]

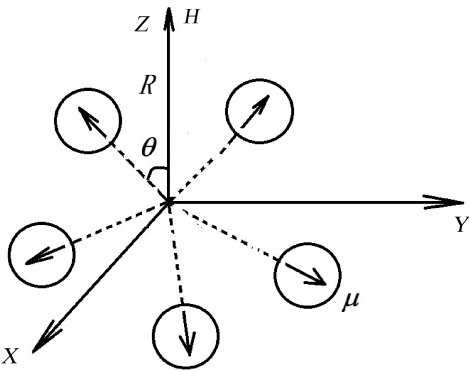


图 4 超顺磁颗粒与外磁场

Fig. 4 Super paramagnetic particles and outer magnetic field

其中, k 是玻耳兹曼常数, T 是温度. K 为比例因子, 它决定于 $\int_0^n dn = n$, 则有

$$2\pi K \int_0^\pi e^{\frac{\mu H \cos\theta}{kT}} \sin\theta d\theta = n \tag{2}$$

则每单位体积磁性颗粒在外磁场方向中的总磁矩, 即磁化强度 M 为:

$$M = \int_0^n \mu \cos\theta dn \tag{3}$$

把(1)(2)代入(3)得:

$$M = \frac{2\pi K \mu \int_0^\pi e^{\frac{\mu H \cos\theta}{kT}} \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^\pi e^{\frac{\mu H \cos\theta}{kT}} \sin\theta d\theta} = -\mu n H \frac{1 + e^{\frac{2\mu H}{kT}}}{1 - e^{\frac{2\mu H}{kT}}} - nkT \tag{4}$$

考虑到在蜜蜂中实际存在的超顺磁颗粒之间存在很小的相互作用, 则超顺磁颗粒的势能为:

$$E = -\vec{H} \cdot \vec{M} \tag{5}$$

若用 $\vec{H}(R, \theta, \varphi)$ 表示外磁场, R 反映了磁场的大小, (θ, φ) 反映了磁场的方位, 则 E 可以表示为:

$$E = \mu n R^2 \frac{1 + e^{\frac{2\mu R}{kT}}}{1 - e^{\frac{2\mu R}{kT}}} + nkTR \tag{6}$$

则超顺磁颗粒在外磁场中受到的力为:

$$\vec{F} = -\nabla E = -\nabla \left(\mu n R^2 \frac{1 + e^{\frac{2\mu R}{kT}}}{1 - e^{\frac{2\mu R}{kT}}} + nkTR \right) \tag{7}$$

当外磁场为地磁场时, 它的势能标量的球谐函数表达式为:

$$U(r, \theta', \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n U_n^m(r, \theta', \lambda, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] P_n^m(\cos\theta') \tag{8}$$

在这里, a 是地球平均半径, r, λ, θ' 分别是地心球坐标系的地心距、经度和余纬; g_n^m, h_n^m 分别是磁场位的高斯系数; $P_n^m(\cos\theta')$ 是 n 阶 m 次 Schmidt 准归一化缔合勒让德函数, N 是球谐级数的截断水平. 所以有地磁场强度:

$$\vec{H} = -\nabla U(r, \theta', \lambda, t) \tag{9}$$

则作用在超顺磁粒子上的力可以表示为:

$$\vec{F} = -\nabla E = \nabla \vec{H} \cdot \vec{M} \tag{10}$$

结合公式(7)和(10)可以看出超顺磁颗粒在地磁场中受到的力与地磁场的关系, 而这个力的作用不仅与外磁场的大小有关, 还与外磁场的方位(倾角)有关系. 关于地磁场的计算是庞大的工作, 在这里, 我们就不再做进一步的推导, 仅做定性的解释.

把超顺磁颗粒内部的小单畴粒子看成是磁偶极

子,相互之间存在作用(见图 5),从而导致超顺磁颗粒沿着外磁场方向收缩,而沿着垂直外磁场方向扩张.由于每一个超顺磁颗粒的外面包围着生物膜,由于生物膜对超顺磁颗粒的约束作用,导致在外磁场中,活的滋养细胞中的磁铁矿粒子尺寸的变化情况要小于死亡滋养细胞中的磁铁矿粒子的尺寸变化.

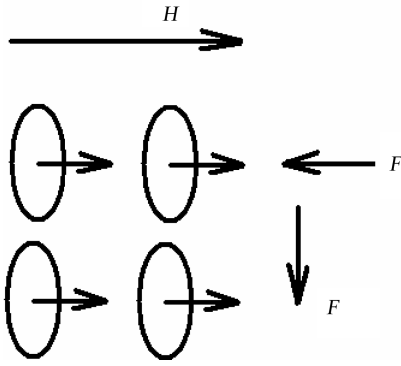


图 5 外磁场作用下磁偶极子之间相互作用,沿着外磁场方向偶极子相互吸引,垂直外磁场方向偶极子相互排斥

Fig. 5 The impact among dipoles in the outer magnetic field, while the dipoles attract each other along the direction of outer magnetic field, and reject each other along the direction perpendicular to the outer magnetic field

5 结 论

在外磁场作用下,超顺磁颗粒会受到外磁场的力作用,这种力作用与外磁场的强度、方位等参量有关系,且超顺磁颗粒内部存在排斥及吸引力,导致超顺磁颗粒尺寸会沿着一定方向收缩扩张.而每一个超顺磁颗粒的外面包围着生物膜(外面有细胞骨架),超顺磁颗粒会把力的作用以及扩张收缩作用传递给生物膜及生物骨架,而这些细胞就包埋在神经元树突中,磁铁矿粒子尺寸的变化、受力状态的变化、与铁沉积囊泡膜的相互抗拒作用、与细胞骨架的相互作用可以组成一个完整的系统来感觉磁场的变化并诱发一个信号的传递.也可以说,外界的磁场会引起超顺磁磁铁矿粒子受到力的作用,且有沿着一定取向的扩张或收缩伴;铁沉积囊泡膜可能有机械性的相互抗拒作用,它给感觉系统提供高敏感性;而细胞骨架连接在铁沉积囊泡的膜上,细胞骨架会释放出磁信号引起神经反应.即:在蜜蜂中,磁铁矿粒子、铁沉积处囊泡以及细胞骨架就组合成一个磁接收器来接收外界磁场,细胞骨架在细胞内信号传递过程起作用;多个超顺磁颗粒磁接收系统的存在会放大和加强信号的产生.

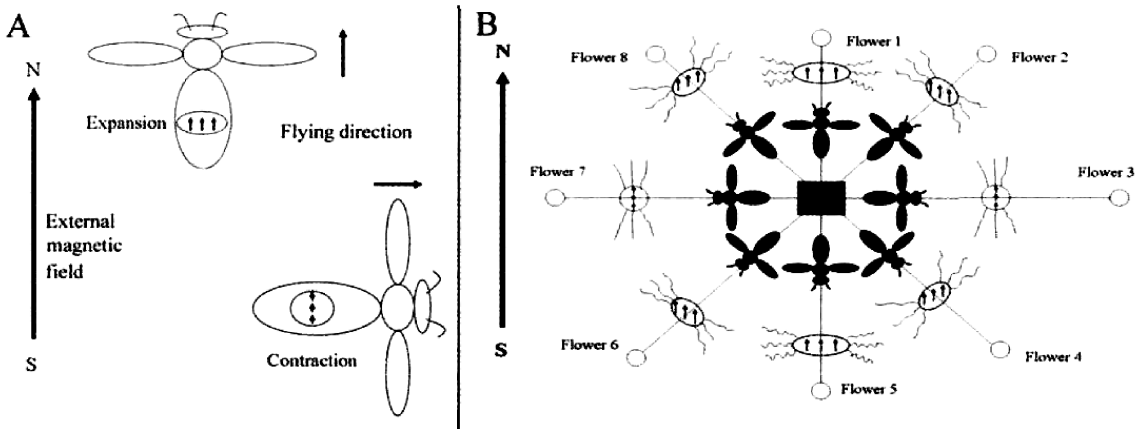


图 6 在蜜蜂觅食和回家定向中起作用的磁接收器产生磁地图的假定模型^[11]

Fig. 6 The magnetic map hypothesis of magnetoreception for orientation and positioning during foraging and homing^[11]

进一步或许还可以假设,一个粒子束或一系列粒子束的受力状态及扩张或收缩,引起结构膜上压力的改变,改变了对压力敏感的离子通道开或关的可能性,会影响离子的流入(正如前面提到的,外加磁场可以引起钙离子 Ca^{2+} 从滋养细胞中被释放),因此跨膜电势会发生改变.神经系统就可以探测到由于外磁场方向、强度引起的粒子束的吸引或排斥机

械力,从而探测到外磁场信息.

这个结论与其他研究者的关于蜜蜂进行定位和辨别方向的细胞内机制的磁接收器工作模型研究假设(图 6)一致.

当然,关于生物磁铁矿磁接收器机制存在若干争议,需要进行实验及理论上的研究.

参考文献:

- [1] Roswitha W, Ingo S, Patrick F, *et al.* The role of the magnetite-based receptors in the beak in pigeon homing [J]. *Curr Biol*, 2010, 20: 1534.
- [2] Wiltshko R, Ingo S, Wolfgang W. A strong magnetic anomaly affects pigeon navigation [J]. *J Exp Biol*, 2009, 212: 2983.
- [3] Qin S Y, Tin H, Yang C L, *et al.* A magnetic protein biocompass [J]. *Nature Mater*, 2015, 16: 1.
- [4] Solov'yov I A, Mouritsen H, Schulten K. Acuity of a cryptochrome and vision-based magnetoreception system in birds [J]. *Biophys J*, 2010, 99: 40.
- [5] Cordula V M, Michael D, Wild J M, *et al.* Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon [J]. *Nature*, 2004, 432: 508.
- [6] 钱霞. 蜜蜂体内的磁接收器 [J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2013, 50: 807.
- [7] Johnsen S K, Lohmann K J. The physics and neurobiology of magnetoreception [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2005, 6: 703.
- [8] Kirschvink J L. Homing in on vertebrates [J]. *Nature*, 1997, 390: 339.
- [9] Cadiou H, Peter A M. Avian magnetite-based magnetoreception: a physiologist's perspective [J]. *J R Soc Interface*, 2010, 7: S193.
- [10] Nichol H, Locke M. Honeybees and magnetoreception [J]. *Science*, 1995, 269: 1888.
- [11] Hsu C Y, Ko F Y, Li C W, *et al.* Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*) [J]. *PloS one*, 2007, 2: e395.
- [12] Hsu C Y, Li C W. The ultrastructure and formation of iron granules in the honeybee (*Apis mellifera*) [J]. *J Exp Biol*, 1993, 180: 1.
- [13] Hsu C Y, Li C W. Magnetoreception in honeybees [J]. *Science*, 1994, 265: 95.
- [14] 冯慈璋. 极化与磁化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.