

# 家鸽头部的磁性物质

钱霞<sup>†</sup> 阮树仁 孙桂芳 盛淑芳

(聊城大学物理科学与信息工程学院 聊城 252059)

2013-03-13 收到

<sup>†</sup> email: qianxia@lcu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140505

## Magnetite in the head of the homing pigeon

QIAN Xia RUAN Shu-Ren SUN Gui-Fang SHENG Shu-Fang

(School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059 China)

**摘要** 磁铁矿可以在很多生物组织中被发现, 国外研究者同样在家鸽上喙皮肤组织发现了规则分布的超顺磁磁铁矿颗粒。他们应用透射电子显微镜确认了这些小磁铁矿晶体为尺寸在1—5 nm的聚集体, 集中存在于皮下组织中。这些超顺磁粒子聚集体又形成直径为1—3  $\mu\text{m}$ 的粒子束, 分布在大细胞之间的长形结构中, 并且与神经组织紧密相连。应用光学显微镜和电子显微镜, 国外研究者也对家鸽上喙传入三叉神经末梢的次细胞组织进行了研究。这些神经末梢组织直径大约5  $\mu\text{m}$ , 内部包含着聚集成束的超顺磁磁铁矿颗粒。大约10到15个粒子束存在于一个神经末梢中, 沿着细胞膜排列。每一个超顺磁粒子束包埋在一个纤维杯中, 口朝向细胞表面, 通过纤维组织, 这些粒子束粘附在细胞表面上。除了超顺磁颗粒, 非晶态铁磷酸盐也被发现, 它们沿着神经末梢的纤维中心分布。解剖特征表明, 这些神经末端可以探测很小的地磁场强度的变化, 考虑到以超顺磁磁铁矿颗粒为基础的“磁接收器”理论, 他们还给出了几个“磁接收器”的模型。

**关键词** 家鸽, 磁铁矿, 超顺磁, 神经组织, 磁接收器

**Abstract** Magnetite can be found in many life forms, including superparamagnetic (SPM) particles in the upper-beak skin of homing pigeons. Using transmission electron microscopy it has been found that these superparamagnetic particles are concentrated in the subcutis and are identified as aggregates of magnetite nanocrystals with grain sizes between 1 and 5 nm. These particles form clusters of 1—3  $\mu\text{m}$  diameter, which are distributed in distinct coherent elongated structures, associated with nervous tissue and located between fat cells. Studies on the subcellular organization of afferent trigeminal terminals in the upper beak of the homing pigeon based on optical and electron microscopy have been reported. They are about 5  $\mu\text{m}$  in diameter and contain SPM crystals. The SPM nanocrystals are assembled in clusters, and about 10 to 15 of these clusters occur inside one nerve terminal, arranged along the cell membrane. Each SPM cluster is embedded in a solid fibrous cup open towards the cell surface, to which the cluster adheres by fiber strands. In addition to the SPM, iron phosphate is also found along a fibrous core of the terminal. The anatomic features suggest that these nerve endings can detect small intensity changes of the geomagnetic field. Several models about SPM based magnetoreceptor have been suggested. In this paper, a brief overview is presented of the above issues.

**Keywords** homing pigeon, magnetite, superparamagnetic, nerve, magnetoreceptor

\* 国家自然科学基金(批准号: 11375081) 资助项目

## 1 引言

磁铁矿(亚铁磁材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )在地球上是最普通的磁性材料。在所有自然界中的铁氧化物中,它的磁性最强,可以在很多生物体中被发现,虽然总是以数量很少的形式出现。磁铁矿最早在趋磁细菌中被发现<sup>[1]</sup>,分布在趋磁细菌的细胞内,以链状形式沿着趋磁细菌背部轴向分布,是趋磁细菌沿着地磁场取向的一个有用工具。随后它在许多广泛分布的生物体内被发现<sup>[2]</sup>。这些生物体内的磁铁矿具有规则的形状和大小,并且是在严格的生物控制下形成的。磁铁矿能否保留永久磁矩取决于它的尺寸,在50 nm以下,它是顺磁性的,在50 nm以上,它是亚铁磁性的。生物体内的大多数磁铁矿是超顺磁颗粒或单畴颗粒<sup>[3, 4]</sup>。

这些生物合成的磁铁矿可能是新陈代谢的一个副产品,还可能对铁在组织中的聚集起重要作用,或者是有独特的功能。比如在石鳖牙齿中具有帮助取食的功能<sup>[5]</sup>,再有就是作为“磁接收器”<sup>[6]</sup>。为了解释它在某些组织中的功能,它的成分、晶粒直径、存在的确切位置、在组织中的结构排列等都在很多文章中被阐明。

关于磁铁矿在生物体内作为“磁接收器”的说法很多。很多生物的取向、排列以及一些其他行为受到地磁场的影响。很多水中的生物,如趋磁细菌等,可以沿着地磁场方向排列;还有很多动物利用地磁场作为长距离迁徙和飞行的信息。比如,鸟类可以利用磁场方向确定飞行方向,利用磁场强度标定方位。在过去的40年中,研究者提出很多解释生物探测地磁场的机制,但是只有两个被实验支持,并不断被争辩讨论,即以光为基础的机制和以磁铁矿为基础的“磁接收器”机制。Kirschvink和Gould提出生物合成磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )晶体是生物“磁接收器”的物质基础<sup>[7]</sup>,他们的观点引起很多人的关注。研究者认为,这些生物体内存在着“磁接收器”,正是“磁接收器”接收到磁场信号并把它传递出去<sup>[8, 9]</sup>。以磁铁矿为基础的磁接收器包含两种,即单畴磁铁矿“磁接收器”和超顺磁磁铁矿“磁接收器”,在这

两种“磁接收器”中,磁铁矿都能够给生物提供周围磁场方向和强度的信息。

## 2 家鸽头部的磁铁矿物质

众所周知,家鸽在离开家很远的地方放飞后仍能找到回家的路,就像很多候鸟在季节变换时进行的定向迁徙。很多文章指出,地磁场是家鸽飞行的信号之一,外加磁场的取向、强度等参量的变化会改变家鸽的方向感,就像磁场在鸟类取向中起作用。在鸟类中,超顺磁(SPM)磁铁矿和单畴(SD)磁铁矿晶体都被发现与三叉神经有密切联系<sup>[10]</sup>。鸽子头部神经组织中同样存在超顺磁磁铁矿颗粒<sup>[11]</sup>。

Walcott等人是最早探测鸽子头部磁性材料的<sup>[12]</sup>。他们发现磁性材料存在于硬脑膜和头盖骨之间的小的、单面的、片状神经组织中,并且通过居里温度测量确认它是磁铁矿。当用光学或电子显微镜观察这些组织时,发现它里面富含成束的电子穿不透的结构,大约0.08—0.15  $\mu\text{m}$ 长。Presti和Pettigrew在相似的实验中发现鸽子的两个部位有可诱导剩磁,一个是头部,一个是颈部肌肉组织,特别是头半棘肌和相连的韧带<sup>[13]</sup>。但是与Walcott等人不同的是,Presti和Pettigrew发现剩磁存在于鸽子的整个头部,他们在头盖骨中发现了肉眼看不到的磁结构,并从头半棘肌的表面和韧带表面之间分离出了高磁的黑色的粒子,似乎包含了磁铁矿。

但是,这些发现都没有解决磁性物质的尺寸、单独的磁性粒子的本质、磁性物质的具体分布地点及其在组织中的分布情况等问题。于是Marianne Hanzlik等人继续进行研究并得到了很好的结果<sup>[14]</sup>。他们的研究表明,家鸽三叉神经的中部视觉神经的前颌骨的分支(图1(a))也许与“磁接收器”有关系。

Marianne Hanzlik等人将家鸽上喙皮肤组织做成10  $\mu\text{m}$ 的切片后,在光学显微镜和电子显微镜下进行了观察;又做了选区电子衍射(SAED)图样观察;最后做了磁测量,包括在室温下用LETI

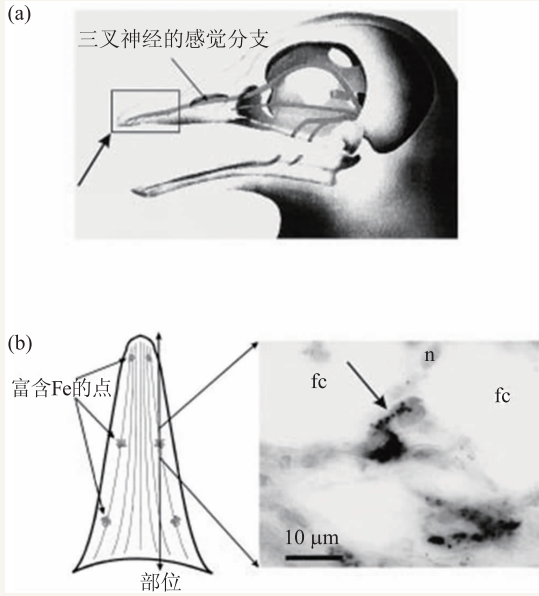


图1 (a)带有头盖发射神经的鸽子头骨示意图(三叉神经伸展到鸽子上喙);(b)左图:在鸽子上喙标记的 $\text{Fe}^{3+}$ 聚集点,这些聚集点位于图(a)中标记图框中的顶端;右图: $\text{Fe}^{3+}$ 聚集点的光学显微镜图,富含 $\text{Fe}^{3+}$ 的点(由箭头指出)为离散分布的直径大约1—3  $\mu\text{m}$ 的小颗粒,沿着细胞排列(图中fc代表肥细胞,n代表连接组织细胞的核<sup>[14]</sup>)

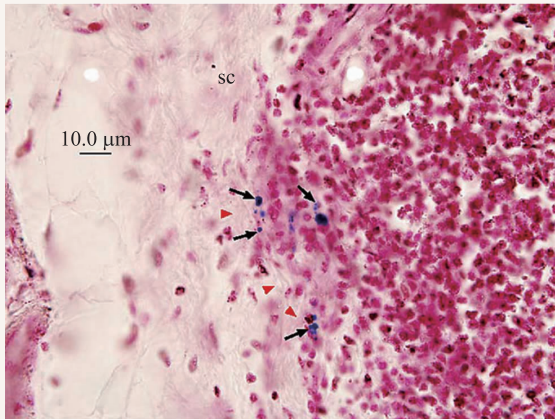


图2 在光学显微镜下观察到,微小的呈点状分布的黑色磁铁矿颗粒(箭头处)分布在连接组织(红色)的皮下组织下方<sup>[15]</sup>

SQUID 磁力计测量了鸽子上喙皮肤(新鲜未固定的组织)等温剩磁曲线,用MPMS-XL SQUID 磁力计进行了低温磁测量;还测量了零场冷却曲线和加场冷却曲线。

用光学显微镜观察到,在鸽子上喙的皮肤中有6个对称的单独分布的富含 $\text{Fe}^{3+}$ 的点(图1(b),左图)。这些点不是随意分布在皮肤中,总是出现

在肥细胞间连接组织的皮下组织中,呈线状排列,与神经线紧密相连(图1(b),右图)。富含 $\text{Fe}^{3+}$ 的点沿细胞排列,有时候延伸长度达200  $\mu\text{m}$ 。在加大放大倍数的光学显微镜下,这些点可以看成是由一些离散的直径在1—3  $\mu\text{m}$ 的点构成(图1(b),右图中箭头指向的黑色的点)。在更高的放大倍数下发现,富含 $\text{Fe}^{3+}$ 的点又是由更小的直径在1—5 nm的粒子构成,直径为2 nm的小颗粒的数目最多。在鸽子上喙的其他皮肤中没有发现富含 $\text{Fe}^{3+}$ 的地方。

粒子束的选区电子衍射(SAED)图样显示出了小晶体材料的粉末衍射图样特性。晶格间距和小晶体材料相应的强度以及光学显微镜下显现出来的黑色特征证明,它们就是磁铁矿,并且粒子尺寸位于超顺磁颗粒的范畴,没有发现尺寸超过5 nm的粒子,而且在这些粒子束外并没有探测到其他的磁铁矿粒子。Marianne Hanzlik等人的工作证实了Walcott、Presti和Pettigrew的发现。

为了进一步证实, Marianne Hanzlik 等人用SQUID 磁力计对在鸽子上喙组织中发现的亚铁磁材料进行了一系列的测量。在零场下,未固定的新鲜组织并没有显示出可观察到的剩磁,但是在1 Oe测量时,产生了一个诱导磁性。过了大约30分钟后,磁场逐步增加,组织则获得剩磁磁矩。这些结果表明,很有可能是因为干燥,新鲜组织迅速改变了最初的结构,从而改变了原来假定的磁性粒子聚集状态。对此, Marianne Hanzlik 等人认为,在这30分钟内,超顺磁颗粒结块,增大了有效粒子尺寸,超过了从顺磁转向具有稳定磁性颗粒的尺寸极限。Marianne Hanzlik 还发现,所有样品都显示了饱和剩磁磁矩。当暴露在2000 Oe的饱和磁场下,样品的饱和剩磁磁矩强度在 $15 \times 10^{-6}$ — $30 \times 10^{-6}$  emu之间,而这同之前光学显微镜观察到的结果一致。

在 Marianne Hanzlik 等人做了上述实验后, Lanxiang Tian 等人又做了验证实验,得到了同样的结果,一些很小的、点状分布的 $\text{Fe}^{3+}$ 聚集体(尺寸在1—4  $\mu\text{m}$ )直接分布在连接组织的皮下组织下方(图2)<sup>[15]</sup>。

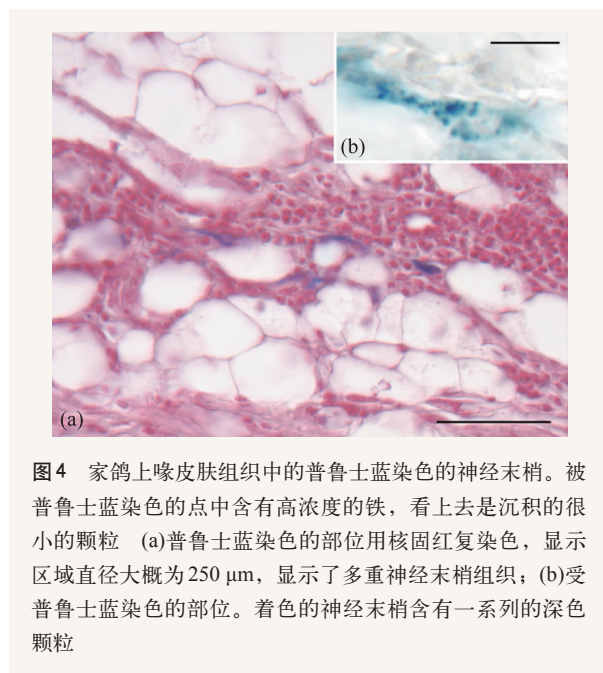
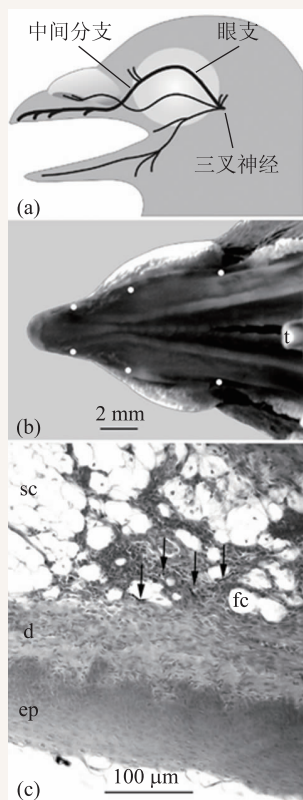
### 3 家鸽头部磁性物质与神经组织——家鸽头部的“磁接收器”

实验证明，家鸽中的超顺磁颗粒所在的区域覆盖了三叉神经的一个分支——中间视神经分支。这个神经分支的电生理学记录能够显示外磁场强度变化引起的神经脉冲<sup>[16]</sup>，这表明这条神经承担了感觉并传递家鸽上喙皮肤组织中的“磁接收器”传递出的信息的功能。

为了探讨家鸽中超顺磁物质与神经组织的关系，Gerta Fleissner等人将家鸽上喙皮肤组织做了光学显微镜观察和电子显微镜观察<sup>[16]</sup>。在光学显微镜观察中采用了普鲁士蓝(PB)染色，因为普鲁士蓝可以使含有 $Fe^{3+}$ 氧化物的细胞染色。

在光学显微镜下可以看到直径大约为250  $\mu m$ 的、微小的点状深蓝色区域(图3(c))。在鸽子喙皮肤组织中喙和膜之间有大体6个这样的区域(图3(b))，它们对称地分布在接近喙的侧面的

**图3** 磁接收器在家鸽喙中的分布 (a)家鸽头骨示意图。三叉神经眼部分支通过中间分支使家鸽上喙尖端体觉受到神经支配；(b)家鸽上喙内部的光学显微观察。图中白点是磁接收器神经末梢所在点(图中t代表舌头)；(c)穿过家鸽上喙内部皮肤得到的径向截面。普鲁士蓝(PB)染色的神经末梢(箭头处)在固体层的上部，表皮(ep)和真皮(d)在皮下组织(sc)中，这些海绵状组织中含有很多肥细胞(fc)<sup>[16]</sup>



**图4** 家鸽上喙皮肤组织中的普鲁士蓝染色的神经末梢。被普鲁士蓝染色的点中含有高浓度的铁，看上去是沉积的很小的颗粒 (a)普鲁士蓝染色的部位用核固红复染色，显示区域直径大概为250  $\mu m$ ，显示了多重神经末梢组织；(b)受普鲁士蓝染色的部位。着色的神经末梢含有一系列的深色颗粒

边缘位置：一对接近喙的顶端，另一对接近喙的腺底部，还有一对在它们的中间。这些被PB染色的结构直接分布在皮下组织的下方、皮肤的固体层、肥细胞之间以及远离喙的骨头部位(图3(c))。

在较高的放大倍数下可以看到，被PB染色的结构是很细的神经末梢(平均直径是5  $\mu m$ )，位于微厚的连接组织线里(图4(a))。神经末梢中有两个不同的结构被PB染色，一个位于整个神经末梢中的浅蓝色区域，另一个是同一个神经末梢中的大约10到15个尺寸在1  $\mu m$ 的深蓝色球形颗粒。深蓝色球状颗粒沿着细胞表面形成不规则的排列链。这个球形颗粒链在神经末梢形成一个球形空间，中间部分免于染色(图4(b))。在被PB染色的神经末梢附近的带有髓鞘的神经组织中并不含有与PB相作用的成分。

电子显微镜的观察结果与光学显微镜一样，即相同样品观察区域中分布着蓝色的区域和深蓝色球状颗粒。而未被染色的部位显示出黑色的颗粒，这些黑色颗粒位于深蓝色背景中(图5(a))。

光学显微镜下观察到的结果与Marianne Hanzlik的SAED测量结果相同，即深蓝色球形颗粒

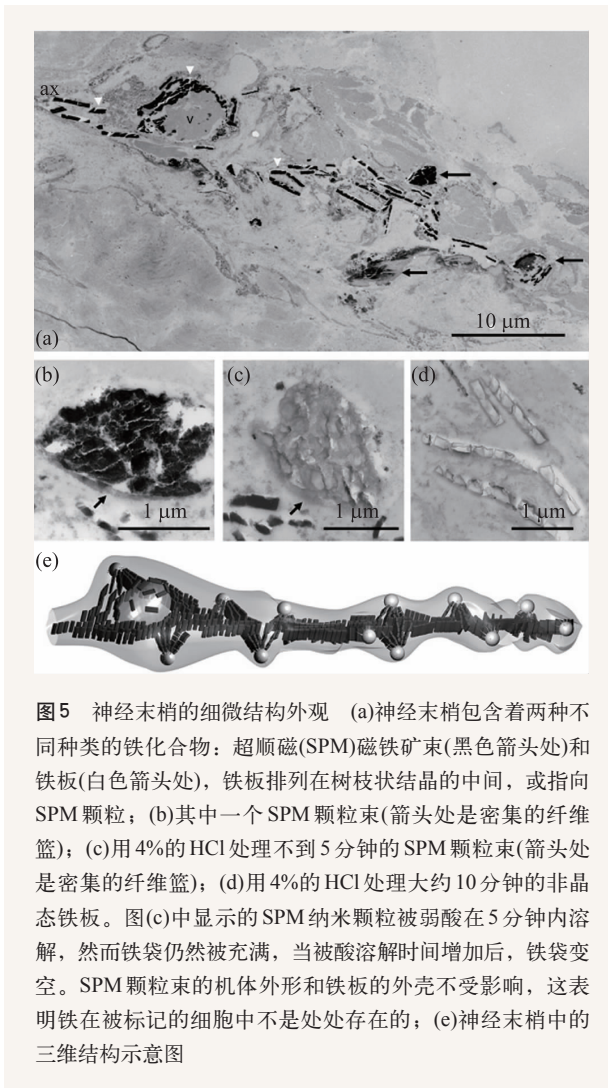


图5 神经末梢的细微结构外观 (a)神经末梢包含着两种不同种类的铁化合物:超顺磁(SPM)磁铁矿束(黑色箭头处)和铁板(白色箭头处),铁板排列在树枝状结晶的中间,或指向SPM颗粒;(b)其中一个SPM颗粒束(箭头处是密集纤维篮);(c)用4%的HCl处理不到5分钟的SPM颗粒束(箭头处是密集纤维篮);(d)用4%的HCl处理大约10分钟的非晶态铁板。图(c)中显示的SPM纳米颗粒被弱酸在5分钟内溶解,然而铁袋仍然被充满,当被酸溶解时间增加后,铁袋变空。SPM颗粒束的机体外形和铁板的外壳不受影响,这表明铁在被标记的细胞中不是处处存在的;(e)神经末梢中的三维结构示意图

就是位于有机体中的SPM纳米晶体颗粒束。在透射电子显微镜下,它们看上去是黑色的椭圆或圆形颗粒(图5(a), (b))。通过元素分析(EDX)和SAED分析,确认SPM颗粒束以树枝状结晶态出现(图5(e))。蓝色背景没有衍射图样,是非晶态铁,沿着神经末梢的中间线,以多个矩形铁板的形态聚集在口袋状神经组织中(图5(a), 图6(d))。元素分析表明,在口袋状神经组织中,铁与磷共同出现,因此,非晶态铁也许是铁的磷酸盐化合物。把样品放入浓度为4%的盐酸中,在3分钟内就溶解了机体中的所有SPM纳米晶体(图5(c)),而非晶态铁板在不到10分钟内溶解(图5(d)),SPM的外围机体和围绕着铁板的口袋状神经组织则保持着它们的形

状和结构。

根据实验结果,鸽子上喙皮肤组织中的磁铁矿分布有以下特性:(1)一个小囊泡(直径大约是4—5 μm)与还没有确认的无组织成分接近神经轴突的树枝状结晶,即SPM粒子束的最近端(图5(a));(2)整个树枝状结晶——SPM粒子束密集堆积在神经末梢的中轴上(图5(a), 6(d));(3)SPM粒子束(直径为1—2 μm)位于细胞表面和中央纤维核之间(图5(a));(4)SPM粒子束外围机体由非纤维状材料组成(图5(c));不到一半的SPM粒子束由一个固态的,紧密堆积的纤维杯状结构(大约150 nm厚)包围着(图5(b), 图6(c)),这个纤维杯状结构看上去稳固地绑在中央纤维核心中;另一半面向细胞表面的SPM粒子束,只覆盖着松散的纤维(图6(b))。细小的纤维线延伸到膜上,看上去就像一个由短纤维材料覆盖的“阴极”结构;(5)非晶态铁板沿着纤维轴排列(图5(a), 图6(d)),这些非晶态铁板比200 nm薄,大多数是长形的,深度超过500 nm,完全围绕着接近神经轴突的“空”的囊泡,像一个支撑的脚手架。铁板带通过纤维附着在中央神经纤维材料上(图6(d));(6)在SPM粒子束附近,这些铁板改变了排列方向,看上去指向磁铁矿聚集体(图5(a), 5(e), 6(a));(7)铁板堆积在口袋状神经组织中,这些神经组织不是囊泡膜,但它与包围SPM粒子束的机体含有相同的材料成分(图5(d), 图6(d))。

#### 4 家鸽头部“磁接收器”模型

Gerta Fleissner等人给出的家鸽体内超顺磁物质与神经组织在生理学上的分布关系,更加引起人们对以磁性物质为基础的“磁接收器”的兴趣。

三叉神经分支支配鸟类中的“磁接收器”的证据有很多,比如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<sup>[17]</sup>。磁场脉冲在某些条件下能改变超顺磁晶体颗粒,因而可以改变动物的行为,这也可以证明磁铁矿为基础的

“磁接收器”的存在<sup>[15]</sup>。

Kirschvink 和 Gould 提出了第一个以超顺磁铁矿为基础的“磁接收器”理论模型，称为“弹性棒变换模型”。其中，超顺磁铁矿颗粒被假定处于一个弹性机体中，磁场能量可以转换成机械能。外部磁场引起“磁接收器”沿着垂直于磁场轴线的方向延伸或者沿着磁场方向收缩，从而弯曲成扁圆的拉紧的椭圆体。“磁接收器”表面被诱导出的相反极性的磁极会随着外磁场能量的增加而相互接近，这不但会增大磁接收器的拉伸能量，而且会增大它的磁能，因为所有的系统都有趋向于能量最小的趋势，最终，磁极之间会相互移动，而导致拉紧的椭圆体的长轴指向外加磁场方向。必须说明的是，磁场诱导的变形只取决于外加磁场的方位，而并不取决于磁场的极性(图7)。

Sonke Johnsen 进一步提出，在某些条件下，在外界地磁场强度量级的磁场作用下，超顺磁颗粒可以被诱导产生足够强的磁场，使邻近的晶体相互吸引或排斥。这些粒子间的相互作用可以改变晶体颗粒束所在的外围机体形状。神经系统可以探测到一个单独的粒子束或一系列粒子束的扩张或收缩。因而就为探测磁场方向、强度等提供了一个可能的手段。为了探测到一个可以感觉到的刺激，一个感觉神经必须把这个刺激的化学或物理量转化成电信号，而这个电信号可以被大脑发射或处理。在最简单的情况下，刺激直接被离子通道探测。而更普通的情况下，刺激被专门的探测机制探测，然后转化成离子通道模式。根据目前的证据，存在于家鸽上喙的 SPM 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(细纤维连接着 SPM 粒子束和质膜)，因此可以认为，这些刺激可以引起 SPM 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，而环绕这些神经末梢的表皮下肥细胞则防止内部产生磁刺激。

基于上述说法，Gerta Fleissner 等人提出一个新颖的、家鸽以 SPM 为基础的“磁接收器”的

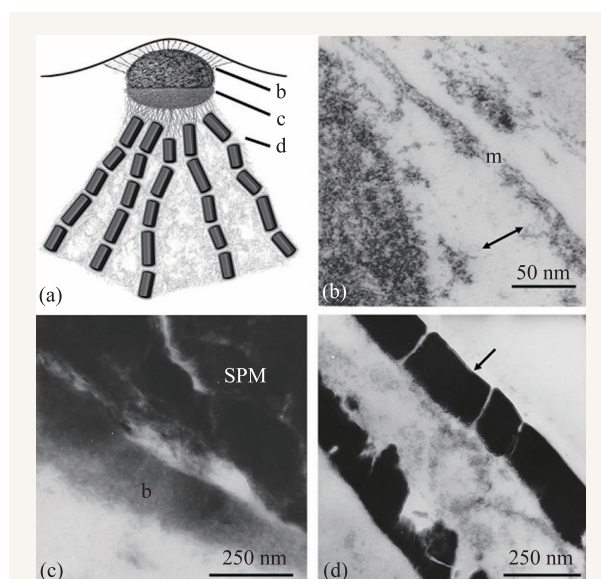


图6 (a)神经网络与SPM颗粒之间关系的示意图(图中标记的b—d对应于图6(b)—(d)的电子显微图像); (b)—(d)为家鸽上喙皮肤组织的截面的超细微结构; (b)靠近细胞膜(m)的SPM粒子束(左)粘附的膜(双箭头处)和覆盖于SPM的松的神经线; (c)围绕SPM粒子束的密集纤维篮(b); (d)紧紧锚定在中央纤维核中的铁板<sup>[16]</sup>

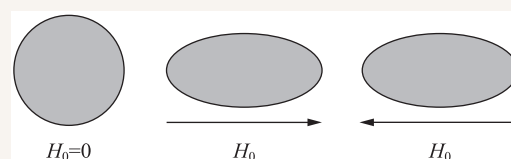


图7 假设的磁接收器的物理机制: 超顺磁颗粒在外磁场的作用下变形。在外磁场缺席的情况下, 超顺磁颗粒粒子束呈现出球形。在外加磁场 $H_0$ 作用下, 粒子束最可能的形状是扁长的椭圆体, 长轴平行于 $H_0$ 。磁场 $H_0$ 的极性不能从椭圆体的取向得出, 因为具有相反极性的磁场会产生相同的椭圆体。这个行为与观察到的“倾度罗盘”行为(即鸽子只能感觉到地磁场与飞行方向角度的行为)一致<sup>[15]</sup>

概念。它假设，每一个铁板代表一个磁赤铁矿单晶，排成列的磁赤铁矿铁板将磁场传递给 SPM 粒子束，膜的变形则归功于 SPM 粒子束对细纤维的拖拽，从而导致机械感觉离子通道的打开。图 6(a)示意性地给出鸽子中一个以 SPM 粒子束为“磁接收器”的次细胞结构。

## 5 结束语

以上讨论与从磁测量、理论计算、模型实

验、行为数据得到的推断一致，并且与以往关于候鸟的电生理学上的记录一致。必须说明，目前地磁场信号由专门的感觉细胞转化成电信号的转化机制尚不清楚，关于这方面的工作还正在进行。

总之，在家鸽上喙皮肤组织中存在规则分布的超顺磁铁矿颗粒，体内存在着“磁接收器”，这些磁铁矿物质应该就是鸽子体内的“磁接收器”的生物物理基础。

参考文献

[1] Blakemore R P. Science, 1975, 190:377  
 [2] 钱霞. 物理, 2008, 37:256  
 [3] Frankel R B, Blakemore R P. J. Magn. Magn. Mater., 1980, 18: 1562  
 [4] 钟文定. 铁磁学(中册)[M]. 北京: 科学出版社, 2000  
 [5] 钱霞, 刘维, 赵见高. 科学通报, 2002, 47(1): 10  
 [6] Cadiou H, McNaughton P A. J. R. Soc. Interface, 2010, 7: S193  
 [7] Shcherbakov V P, Winklhofer M. Eur. Biophys. J., 1999, 28: 380  
 [8] Walcott C, Green R P. Science, 1974, 184: 180  
 [9] Wiltshcko R, Schiffner I, Wiltshcko W. The Journal of Experimental Biology, 2009, 212: 2983

[10] Kirschvink J L, Gould J L. Biosystems, 1981, 13: 181  
 [11] Hanzlik M, Heunemann C, Holtkamp-Rötzler E *et al.* BioMetals, 2000, 13: 325  
 [12] Walcott C, Gould J L, Kirschvink J L. Science, 1979, 205: 1027  
 [13] Presti D, Pettigrew J D. Nature, 1980, 285: 99  
 [14] Tian L X, Xiao B, Lin W *et al.* BioMetals, 2007, 20: 19  
 [15] Winklhofer M, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M *et al.* Eur. J. Mineral., 2001, 13: 659  
 [16] Fleissner G, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M *et al.* The Journal of Comparative Neurology, 2003, 458: 350  
 [17] Johnsen S, Lohmann K J. Nature Reviews, 2005, 6: 703

ILOPE—北京光电展

## 北京国际光电产业博览会 暨

### 第十九届中国国际激光·光电子及光电显示产品展览会

**北京·中国国际展览中心(三元桥) 2014年10月15日-17日**

|  |   |   |  |  |
|--|---|---|--|--|
| <p><b>主办单位</b></p> <p>中国国际贸易促进委员会<br/>             中国国际展览中心集团公司<br/>             中国光学光电子行业协会</p> <p><b>承办单位</b></p> <p>中国光学光电子行业协会<br/>             中展集团北京华港展览有限公司</p> | <p><b>支持单位</b></p> <p>中国工业和信息化部<br/>             中国兵器工业集团公司<br/>             美国光电协会<br/>             德国光学、医疗精密设备协会</p> <p><b>展品范围</b></p> <p><b>激光与红外产品及设备<br/>             光电材料与元件</b></p> | <p>中国科技部<br/>             北京生产力促进中心<br/>             美国光学工程学会<br/>             财团法人光电科技工业协进会</p> <p><b>光电显示及照明<br/>             光学元件与材料</b></p> | <p>中国科学院<br/>             北京光机产业基地<br/>             日本光产业技术振兴会<br/>             北京市市政工程总公司(集团)</p> <p><b>LED &amp; OLED &amp; FPD<br/>             光通讯设备</b></p> | <p>中国物理学会<br/>             中国图形图象学学会<br/>             韩国光产业振兴会</p> |
|--|---|---|--|--|