

科技新闻

·深度报道·

暗夜归途：鸽子如何借地磁导航

两种独立于日光感知的机制或助鸽子利用地球磁场导航

文/Simon Spiro¹, Hal Drakesmith²

多种动物——包括某些鱼类、鸟类及海龟——能够感知地球磁场并用于导航。然而,实现这种磁感受的解剖学位点与分子机制仍存在激烈争议。Lisowski等在《Science》报告称,一种具有磁感受能力的鸟类(家鸽, *Columba livia*)肝脏中的特定免疫细胞可感知地球磁场方向,并可能通过传入神经将该信息传递至大脑。Nordmann等2025年11月20日发表的另一项研究同样以鸽子为对象,识别出大脑中被磁刺激激活的特定区域,并提示假定的磁感应细胞可能位于耳部。是否存在多种机制协同作用的可能?

关于动物如何感知地球磁场,目前存在3种主流假说:一是机械机制,即磁性颗粒受类似罗盘的磁力牵引,该过程可能与三叉神经(一条大型脑神经)相关;二是生物机制,即细胞内电压敏感型离子通道因磁场变化而被激

活;三是光化学机制,即视网膜色素受物理效应影响,可高效检测光子并向大脑传递信号,但该机制仅能在光照条件下运作。3种假说均有支持证据,但学界普遍认为尚无单一理论能完整解释该现象。

Lisowski等基于前期研究展开工作,该研究曾报告称巨噬细胞(一种白细胞)因吞噬衰老红细胞而具有超顺磁性。红细胞含铁,而超顺磁性常见于微小含铁颗粒,这类颗粒在外加磁场中可呈现强磁化特性。Lisowski团队假设此类颗粒(可能为铁储存蛋白铁蛋白)或可用于磁感受,遂采用振荡样品磁强计筛查多种鸽子组织的超顺磁特性,其中肝脏与脾脏呈现最强磁化信号,肌肉与喙部信号较弱。仅需将肝细胞悬液通过磁选柱,即可分离出超顺磁性细胞亚群。普鲁士蓝组织化学染色(可标记铁蛋白降解产物含铁血黄素)证实肝脏中存在含铁细胞。多项证据支持这些细胞为巨噬细胞,其中包括其表达主要组织相容性复合体II类分子(MHCII)。MHCII是一种由巨噬细胞表达的细胞表面糖蛋白。

氯膦酸盐是一种毒素,可通

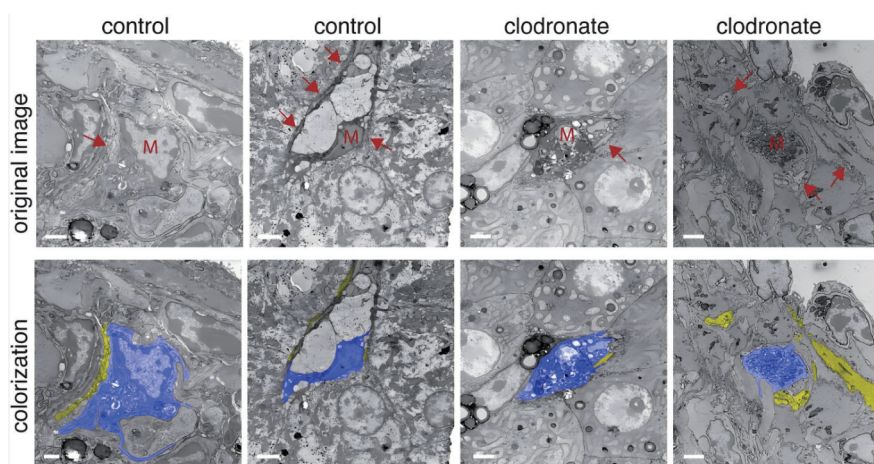
过装载至被吞噬的脂质体(具脂质双分子层的小型人工囊泡)靶向巨噬细胞。Lisowski团队向鸽子静脉注射氯膦酸盐脂质体,使肝脏中MHC II阳性细胞数量减少。干预后,肝细胞无法再通过磁选柱分离,肝脏中普鲁士蓝阳性细胞数量亦下降。这些观察结果进一步支持巨噬细胞即为鸽子肝脏中含铁且具有磁场敏感性的细胞这一假说。

Lisowski团队随后测试了巨噬细胞耗竭对鸽子归巢能力的影响。研究团队训练一群鸽子沿19 km西向东路线归巢。随后在预报为全天阴云天气的前一日,向训练有素的鸽子注射氯膦酸盐脂质体(或以不含氯膦酸盐的脂质体作为对照),使鸟类无法利用视觉线索、太阳位置及偏振光导航。次日阴天条件下,对照鸽群在70 min内成功完成19 km归巢,而氯膦酸盐处理组鸽子迷失方向,无一成功归巢(部分个体在太阳重现后迟滞抵达目的地)。



鸽子可能采取多种互补机制进行地磁导航,具体取决于环境条件
(图片来源:《Science》)

1. 英国伦敦动物学会,摄政公园外环,伦敦,英国
2. 英国医学研究理事会(MRC)转化免疫发现单元,MRC韦瑟罗尔分子医学研究所,约翰·拉德克利夫医院,牛津大学,牛津,英国



对照组和氯膦酸钠处理鸽子的肝脏组织的电子显微镜图像。顶层为原始图像，红色箭头指示神经纤维，“M”指示巨噬细胞。底层显示图像的伪彩色化，黄色指示神经束，蓝色指示巨噬细胞。比例尺为2 μm

在另一项晴日实验中，当视觉线索可用时，氯膦酸盐脂质体不影响归巢能力，表明鸽子并非因毒素暴露而单纯患病。这些发现提示，肝脏中数量最多的含铁超顺磁性巨噬细胞，是鸽子在缺乏视觉线索时实现归巢所必需的。

巨噬细胞如何将编码磁场信息的信号传递至大脑？Lisowski团队发现，部分含铁（且对氯膦酸盐敏感）的巨噬细胞在空间上邻近支配肝脏的神经束。研究者提出假说：分布于肝脏各处的含超顺磁性铁蛋白的巨噬细胞，会随外部磁场变化而发生重定向或形变。这一改变调节了假定的巨噬细胞-神经相互作用，从而产生影响导航的信号。

Lisowski团队这项颇具启发性的研究亦引发若干疑问。研究者采用普鲁士蓝染色识别鸽子肝脏中的含铁细胞，但该染色剂优先标记含铁血黄素——铁蛋白在铁过载条件下的降解产物。铁过载现象在圈养动物中已有广泛报

道，推测源于野生与圈养动物饮食差异。因此，观察到的普鲁士蓝染色结果可能是研究中所用圈养鸽子饮食所致，而非真实解剖学特征。尽管如此，完整铁蛋白与含铁血黄素均具超顺磁性，且铁蛋白在体外即使铁含量相对较低时亦呈现该特性。后续研究需明确巨噬细胞需积累多少铁才能呈现超顺磁性，以及磁感受传感器究竟是铁蛋白还是含铁血黄素。同样重要的是，需厘清生理“正常”水平的铁积累是否足以在体内赋予磁场敏感性。若答案是，则铁蛋白可能在多种磁感受动物中广泛承担此功能。此外，尽管氯膦酸盐实验提示巨噬细胞可能在磁感受中发挥作用，但肝脏是否为磁感受器官仍不明确。鸽子肝脏虽含最多磁敏感巨噬细胞，却未必是最适合磁感受的器官，且氯膦酸盐或可耗竭其他感觉部位的巨噬细胞。

Nordmann等从不同角度切入磁感受机制研究，聚焦鸽子大

脑中哪些区域对磁刺激呈现快速响应。尽管既往研究亦探索过该问题，但多采用聚焦特定脑结构的组织学技术。Nordmann团队则采用更全局、无偏倚的方法学。研究者通过脑组织透明化技术使鸽子大脑近乎透明，并运用光片显微镜测量全脑半球内c-Fos（一种标记神经元激活的转录因子）的浓度分布，从而识别对特定刺激响应的脑区。将鸽子暴露于旋转磁场中，可激活特定脑区，包括参与平衡功能的尾侧内侧前庭核与参与听觉处理的尾侧中脑皮层。目前尚未在前庭或听觉系统中发现铁磁性颗粒，但Nordmann团队观察到前庭系统中某些毛细血管表达可能响应变化电磁场并向大脑传递信号的离子通道。对该假说机制的功能验证，尚需等待鸽子遗传操作技术的进步。目前精准调控前庭系统特定细胞类型中候选离子转运蛋白的活性仍具挑战。

Lisowski与Nordmann团队的研究提出了2种独立于光刺激的磁感受潜在机制。尽管2者涉及不同的检测方式与解剖学位点，但数十年来学界始终未能完全阐明磁感受的底层机制，这提示多种互补机制可能协同作用，具体取决于环境条件。或许一种机制主导长距离导航，另一种则用于更精准的目的地定位，2者以不同精度协同运作。诚然，拥有不止一种暗夜归途的方式，或许是生物演化中的审慎策略。

（译自《Science》，2026,392(6801)）