

生物磁学在鸟类定向研究中的进展

王毅男^{①③} 潘永信^② 田兰香^② 梁冰^① 张树义^{①*}

(^①中国科学院动物研究所 北京 100080; ^②中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029; ^③中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要:地球上广泛存在的地磁场能够为导航提供可靠的信息,因此很多鸟类在迁徙和归巢过程中都使用地磁信息来保证航行方向的正确。在迁徙的鸟类中已经发现有 18 种是利用地磁罗盘进行定向和导航的。本文从鸟类使用的磁罗盘、航行地图以及磁感应机制等几方面阐述了目前在鸟类生物磁学方面的研究进展。

关键词:生物磁学;鸟类;磁罗盘;航行地图

中图分类号:Q494 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2005)05-119-05

Development of Biomagnetism in Avian Orientation

WANG Yi-Nan^{①②} PAN Yong-Xin^③ TIAN Lan-Xiang^③ LIANG Bing^① ZHANG Shu-Yi^①

(^①Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080; ^②Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; ^③Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The magnetic field can provide reliable information of orientation for birds in their navigating course. A magnetic compass has been demonstrated to effect on the process of pigeon homing and passerine migrating. 18 species of birds have been proved to use it for orientation and navigation. We elucidate the development of avian biomagnetism in relation to magnetic compass, navigating map and mechanism of magnetic induction in this paper.

Key words: Biomagnetism; Bird; Magnetic compass; Navigating map

地磁场的磁场矢量在南半球向上而在北半球向下,在磁场赤道处与地球平行,磁力线与地平线的夹角称为磁倾角。在地球的大部分地区,磁力线的方向都是由南到北,而磁场强度则是有规律的变化,由在磁极附近的 60 000 nT(纳特斯拉,磁场强度单位)减少到磁赤道附近的 30 000 nT,这种变化规律在两个半球是对称的。由于磁力线的上述性质,对于导航来说,他是一种非常可靠而且普遍存在的信息。磁力线矢量可以提供关于方向的信息,而磁场强度和磁倾角能够提供关于位置的信息。

早在 19 世纪就有学者认为鸟类的定向和磁场信息的获得是相关的。Von Middendorff^[1]是最早提出鸟类可以利用磁场信息导航概念的人,而 Viguiet^[2]则认为鸽子是凭借磁场总强度

和磁倾角找到归巢的方向。候鸟可以在夏季栖息场所和越冬场所之间进行准确的迁徙,鸽子无论飞出多远都可以找到回家的方向,地磁场在这些过程中都起到了重要的作用。

1 鸟类的磁罗盘

1.1 鸟类磁罗盘的特点 40 年前, Wilschko^[3]在欧亚鹁(*Erithacus rubecula*)的研究中第一次提出了磁罗盘的概念。鸟类的磁罗盘和工程罗盘有着很大的不同,最明显的区别在于(1)磁

基金项目 国家自然科学基金(No.30270169);

* 通讯作者, E-mail: zhangsy@ioz.ac.cn;

第一作者介绍 王毅男,男,硕士研究生;研究方向:动物生态学; E-mail: flyingbats@126.com

收稿日期 2005-04-16, 修回日期 2005-07-18

罗盘是磁倾角罗盘,而工程罗盘是磁极罗盘;
(2)磁罗盘可以对周围磁场的细微变化产生感应。

鸟类利用磁倾角罗盘意味着在忽略极性的情况下,利用空间中磁场的矢量方向和磁倾角进行定向。当对欧亚鸽所处环境的磁场进行改变后发现,只反转磁场的垂直分量或水平分量(保证磁场强度不变)对于其影响是相同的,欧亚鸽的定向也发生反转,而同时反转磁场的垂直分量和水平分量时鸟儿的定向不会受到影响^[4],这时相当于改变了磁极,但是磁力线的方向没有改变。因此鸟类能够区分的不是南极和北极,而是磁极向和磁赤道向,迄今研究的所有鸟类都遵循这一规律^[5]。这也意味着在磁赤道处鸟类会感受到两个磁极,从而影响其定位,行为学实验也证实,将鸟儿置于平行磁场中会导致其定位混乱^[4,6]。但在鸟类的磁罗盘系统中也有着解决这个问题的方法,秋天园林莺(*Sylvia borin*)在通过磁赤道后定向方向会从朝磁赤道向转为朝磁极向,从而一直朝向正确的迁徙方向^[7]。很明显,磁赤道处的磁场是园林莺定向改变的信号。

鸟类的磁罗盘可以根据环境中磁场总强度的变化进行精细的调节。居住在 46 000 nT 环境中的欧亚鸽在低于 34 000 nT 或高于 60 000 nT 的环境中都失去利用磁场进行定向的能力,这说明其功能范围很狭窄。但在新的磁环境中生活 3 d 以上,这些鸟儿会重新获得利用磁罗盘定向的能力,因此,磁罗盘的实际范围可能要远大于其表现出来的功能范围^[8]。

1.2 磁罗盘信息与其他导航信息的相互作用

除了使用磁罗盘外,鸟类还可以使用基于天空信息的罗盘,包括在白天使用的太阳罗盘和在夜间使用的星空罗盘。但太阳和星星的位置会随着时间和地理位置不同发生变化,单一的天空信息罗盘无法提供关于方向的信息。因此在不同的环境中 3 种罗盘需要共同作用、相互补充,这样才能为飞行提供正确的导航信息。

磁罗盘在鸟类太阳罗盘的建立过程中起到了重要的作用。无归巢经验的年幼原鸽(*Columba*

livia) 在还无法利用太阳罗盘之前一直会使用磁罗盘进行定向^[9],而且在太阳罗盘的建立过程中磁罗盘起到了方向参考系统的作用^[10]。在对成年原鸽进行测试时发现,当太阳罗盘提供错误信息的时候,原鸽还是可以利用磁罗盘正确地找到归巢的方向^[11]。

在夜间的迁徙过程中,磁罗盘和星空罗盘相互之间的关系更加复杂。鸟类利用星空罗盘的方式是根据星空的转动来判断方向,这个过程是独立于磁罗盘之外的^[12,13]。在迁徙之前,如果星空罗盘和磁罗盘提供的方向信息相冲突,会以前者为准^[14,15],但在迁徙过程中如果两者提供的信息发生冲突的话,磁罗盘则会取代星空罗盘成为定向的首选机制^[16,17]。

2 鸟类磁罗盘的作用机制

2.1 磁铁矿晶体在磁罗盘中的作用

很早以前,研究者就在鸟类筛骨处发现有富集的磁铁矿晶体^[18,19],而且在很多鸟类中其含量也足够作为磁性受体存在,如长刺歌雀(*Dolichonyx oryzivorus*)^[19]。与无磁性和顺磁性的化合物不同,铁磁体(如磁铁矿晶体)在外加强磁场的作用下可以获得并保持住磁场,因此他可以对外界磁场的变化做出反应。而行为学实验也证实,磁铁矿晶体的确参与了磁感应过程,将鸟类在短促的强磁场中(5 ms, 0.5 T, 这种磁场可以改变单晶磁铁矿晶体的磁化状态)进行处理后会影响到其定向^[20],在对 3 种候鸟进行这样的处理后发现,其定向都偏离了正确的迁徙方向,其中偏离角度最大的达到了 90°。

原鸽是惟一一种利用地磁场导航而不迁徙的鸟,他是利用磁罗盘来确定归巢的方向。Keeton^[21]的研究表明,在完全阴天的情况下将原鸽身上绑上磁铁放飞后他们无法正确的归巢。而 Walcott 和 Green^[22]在原鸽的头部安装了一个可以改变微环境磁场的电磁线圈,线圈在晴天没有作用,而在阴天则会根据线圈的磁场方向影响原鸽的飞行方向。由此可以看出,在不能使用太阳罗盘和星空罗盘的时候,原鸽只能利用磁罗盘进行导航,而磁场的改变会直接

影响原鸽体内磁铁矿晶体的排布,从而影响其使用磁罗盘时的定向。

在原鸽归巢的过程中,磁罗盘不仅仅参与在航行过程中的定向,其本身也是航行过程的组成部分。研究者发现,没有归巢经验的幼鸽在有干扰磁场存在的情况下,被运输到放飞地点后丧失了对归巢方向的正确定向能力^[23];而对照组中同样的原鸽在正常运输到放飞地点后也进行了相同强度和时间的磁处理,结果表明磁处理并没有影响其归巢定位。没有归巢经验的幼鸽还没有形成完善的航行地图,因此在陌生的旅途中需要使用磁罗盘不断地记录方向的变化,如果在这个过程中干扰了幼鸽磁罗盘的正常功能,他们就无法从天然磁场中获得正确的方向信息。

由此可见,无论是雀形目的鸟类还是原鸽都可以对磁场的变化做出反应,他们体内的磁感应机制可以直接对磁场产生感应,在这个过程中鸟类体内的磁性物质起到了至关重要的作用。

2.2 不同光波长对磁罗盘的影响 Leask 在 1977 年第一次提出鸟类的磁感应过程是一个光依赖性的过程^[24],但对这种波长依赖性特性进行首次描述的却是在两栖动物绿红东美螈 (*Notophthalmus viridescens*) 的研究中完成的^[25]。在对雀形目鸟类进行的研究中发现,鸟儿在 433 nm 的蓝光和 565 nm 的绿光下定向准确,但是在 630 nm 的红光下失去了定向能力(这时的活动性并没有减弱,与在白光下的相同)^[26]。将没有归巢经验的幼鸽在特定的光照下运输到放飞地点后发现,在用白光和 565 nm 绿光照射下幼鸽可以保持正确的定向,而在 630 nm、660 nm 红光以及完全黑暗中运输后幼鸽丧失了正确定向的能力^[27]。幼鸽在运输过程中需要不断地从自然磁场中获得信息以保持正确的定向,而长波光(红光)的照射或黑暗条件会阻断磁信息的获得。

鸟类只能在一定波长范围的光下才能准确地定向,波长的下限还不清楚,但上限大约在 565 nm 的绿光和 590 nm 的黄光之间。鸟类在

绿光下可以准确的定向,但是在黄光下却失去了定向能力,这种转变非常迅速。而且鸟类可以利用磁信息的波长范围要比他们可视光的范围(320 ~ 680 nm)小的多。

但这种波长范围并不是绝对的。在 635 nm 的红光下测试欧亚鸽定向之前,先将其放置在同样的红光下照射 1 h 后马上测试,这时的欧亚鸽可以进行正确的定向^[28]。因此鸟类在波长超过 590 nm 的光下也可能完成定向,他们可以利用的光波长范围可能大于目前观察到的功能范围,这和鸟类在超出正常强度的磁场中的适应性有相似之处。光强度的增加也会导致定向行为的改变,在比正常强度高 7 倍的 565 nm 绿光下照射的灰胸绣眼鸟 (*Zosterops l. lateralis*) 出现定向错误^[29],而欧亚鸽在 7 倍的蓝光、绿光和蓝紫光光照下也改变了正常的方向选择^[30]。这表明鸟类的光依赖性磁感应过程是一个复杂而精密的过程,可以受到很多因素的干扰和调控。

光在磁感应过程中起到了很重要的作用,短波长的光照可能为磁感应过程的启动提供信号。但是这种机制与以磁铁矿晶体受体为基础的磁感应过程并不矛盾,很多夜间迁徙的雀形目鸟类和原鸽在野外无光的情况下也能够利用磁信息进行正确的定向,因此这两种机制应该是互为补充、共同作用的。

3 鸟类基于磁信息的航行地图

一般来说,有过迁徙经验的候鸟或有过成功归巢经历的成年原鸽在自己的脑中都会形成一个航行地图,这个地图是鸟类根据经验将航行中空间分布的各种因素在头脑中再现形成的。利用地图,鸟类可以确定自己的位置并且通过一定的过程到达远方的目的地。在这种航行地图中,鸟类可以利用总磁场强度和磁倾角等磁参数的梯度变化来进行定位。

在对灰胸绣眼鸟的成鸟和幼鸟分别进行磁处理后发现,成鸟进行处理后的方向选择和处理前相比有着 90° 的顺时针偏转,而磁处理对幼鸟则没有影响^[31]。这就表明成鸟和幼鸟的飞

行导航系统中的某些组分是有区别的,这种区别导致了他们经过磁处理后的行为差别。幼鸟在第一次迁徙的时候所选择的方向是冬季栖息地的大致方向,这是由天生的方向感为罗盘提供的信息决定的;而成鸟在以往的迁徙过程中可以利用获得的信息进一步完善航行地图,那么他们在定位的时候就完全依靠航行地图提供的信息^[32]。因此,成鸟经过磁处理后的定向偏转可能是由于航行地图获得了错误的磁信息而导致给出了错误导向。

与在磁罗盘中应用的受体机制不同的是,鸟类在航行地图的磁感应过程中必须具备分辨微小磁场变化(大约相当于总磁场强度的1%)的能力^[33]。由于这个过程对于磁场的细微变化非常敏感,人们推测在其中会有神经系统的参与。近年的研究表明,三叉神经系统在这一过程中可能起到了重要的作用,他可以对磁场的细微变化产生反应^[34]。而在所有可能的磁感应材料中,磁铁矿晶体是唯一符合三叉神经的敏感性以及磁导航地图需要的材料。

4 小 结

以上提到的磁感应机制是鸟类所特有的,其他可以利用磁场定向的动物可能有着不同的磁感应机制。绿红东美螽是除了鸟类外惟一发现有光波长依赖性磁感应过程的动物^[25],而其他可以利用磁信息的动物都不使用光依赖性的磁感应机制。其他动物在定向时所使用的罗盘也不尽相同,鱼和哺乳动物使用的是可以感应磁极的罗盘^[35],而海龟则和鸟类一样也使用磁倾角罗盘^[36],而有些无脊椎动物在完全黑暗的情况下也可以使用磁罗盘进行定向^[5]。对于长距离迁徙的动物来说,地磁场是一种普遍存在而且可靠的方向信息来源,而很多动物也的确能够利用磁信息作为自己导航系统的参数,因此研究地磁场对生物导航定向的影响有助于我们更好地了解动物迁徙、捕食和繁殖等方面的情况。

近年来,生物磁学是一个热点的研究领域,研究者在动物和地磁场的相互关系、地磁场

在动物导航中的作用以及磁罗盘的生理机制等方面取得了重要的突破。而生物磁学的研究对于我们改进飞行器的导航系统以及对观测地磁场细微扰动等方面有着重要的意义,因此加强这一方面的研究势在必行。目前对于生物磁学的研究才刚刚起步,很多研究都只侧重于行为学方面,而且生物磁学的研究手段和仪器设备等也有待进一步提高和改进。近年来生物磁学的研究比较侧重于动物磁感应过程的生理机制方面,最近在鸟类的视觉神经系统中已经发现了在磁感应过程中起作用的多个神经元^[37]。生物磁学领域内还有很多难解之谜等待着研究者在未来的工作中去探索和发现。

我国关于生物磁学的研究基本上是空白,还缺乏有组织的系统化工作。中国物种资源丰富、地域广阔,在进行生物磁学研究方面有着很大的资源优势,而且从国际上的研究进展来看,与其他生物研究领域相比生物磁学的研究还有待进一步深入,因此在国内加强生物磁学方面的研究、缩短在这一领域内与国际水平的差距势在必行。

参 考 文 献

- [1] Von Middenforff A. Die Isepiptesen Ru ß lands. Men. Acad. Sci. St Petersburg VI, *Ser Tome*, 1859, 8 :1 ~ 143.
- [2] Viguier C. Le sens de l'orientation et ses organes chez les animaux et chez l'homme. *Rev Phil France Etranger*, 1882, 14 :1 ~ 36.
- [3] Wiltshcko W. Über den Einflu ß statischer magnetfelder auf die zugorientierung der Rotkehlchen(*Erithacus rubecula*). *Z Tierpsychol*, 1968, 25 :537 ~ 558.
- [4] Wiltshcko W, Wiltshcko R. Magnetic compass of European robins. *Science*, 1972, 176 :62 ~ 64.
- [5] Wiltshcko R, Wiltshcko W. Compass orientation. In : Bradshaw S D, Burggren W eds. *Magnetic Orientation in Animals*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1995 :43 ~ 76.
- [6] Wiltshcko W. Der Magnetkompass der Gartengramucke(*Sylvia borin*). *J Ornithol*, 1974, 115 :1 ~ 7.
- [7] Wiltshcko W, Wiltshcko R. Migratory orientation : magnetic compass orientation of garden warblers(*Sylvia borin*) after a simulated crossing of the magnetic equator. *Ethology*, 1992, 91 :70 ~ 79.

- [8] Wilschko 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, New York : Springer-Verlag, 1978, 302 ~ 310.
- [9] Wilschko R, Wilschko W. The development of sun compass orientation in young homing pigeons. *Behav Ecol Sociobiol*, 1981, **9** :135 ~ 141.
- [10] Wilschko W, Wilschko R, Keeton W T, *et al.* Growing up in an altered magnetic field affects the initial orientation of young homing pigeons. *Behav Ecol Sociobiol*, 1983, **12** :135 ~ 142.
- [11] Wilschko R, Kumpfmüller R, Muth R, *et al.* Pigeon homing : the effect of a clock-shift is often smaller than predicted. *Behav Ecol Sociobiol*, 1994, **35** :63 ~ 73.
- [12] Emlen S T. Celestial rotation : its importance in the development of migratory orientation. *Science*, 1970, **170** : 1 198 ~ 1 201.
- [13] Wilschko W, Daum P, Fergenbauer-Kimmel A, *et al.* The development of the star compass in Garden Warblers, *Sylvia borin*. *Ethology*, 1987, **74** :285 ~ 292.
- [14] Able K P, Able M A. Daytime calibration of magnetic orientation in a migratory bird requires a view of skylight polarization. *Nature*, 1993, **364** :523 ~ 525.
- [15] Able K P, Able M A. Interactions in the flexible orientation system of a migratory bird. *Nature*, 1995, **375** :230 ~ 232.
- [16] Bingman V P. Earth 's magnetism and the nocturnal orientation of migratory European robins. *Auk*, 1987, **104** :523 ~ 525.
- [17] Beason R C. Use of an inclination compass during migratory orientation by the bobolink (*Dolichonyx oryzivorus*). *Ethology*, 1989, **81** :291 ~ 299.
- [18] Walcott C, Gould J L, Kirschvink J L. Pigeons have magnets. *Science*, 1979, **205** :1 027 ~ 1 029.
- [19] Beason R C, Brennan W J. Natural and induced magnetization in the bobolink (*Dolichonyx oryzivorus*). *J Exp Biol*, 1986, **125** :49 ~ 56.
- [20] Wilschko W, Beason R C. Magneteffekte bei der Heimorientierung von Brieftauben. *Verh dt Zool Ges*, 1991, **83** :435 ~ 436.
- [21] Kenton W T. Magnets interfere with pigeon homing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1971, **68** :102 ~ 106.
- [22] Walcott C, Green R P. Orientation of homing pigeons altered by a change in the direction of an applied magnetic field. *Science*, 1974, **184** :180 ~ 182.
- [23] Wilschko R, Wilschko W. Evidence for the use of magnetic outward journey information in homing pigeons. *Naturwissenschaften*, 1978, **65** :112.
- [24] Leask M J M. A physiochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons. *Nature*, 1977, **267** :144 ~ 145.
- [25] Phillips J B, Borland S C. Behavioural evidence for use of a light-dependent magnetoreception mechanism by a vertebrate. *Nature*, 1992, **359** :142 ~ 144.
- [26] Wilschko W, Munro U, Ford H, *et al.* Red light disrupts magnetic orientation of migratory birds. *Nature*, 1993, **364** : 525 ~ 527.
- [27] Wilschko R, Wilschko W. Pigeon homing : effect of various wavelengths of light during displacement. *Naturwissenschaften*, 1998, **85** :164 ~ 167.
- [28] Müller A, Gesson M, Noll C, *et al.* Light-dependent magnetoreception in migratory birds : previous exposure to red light alters the response to red light. In : Gagliardo A ed. *Orientation and Navigation : Birds, Humans and Other Animals*. Oxford : Royal Institute of Navigation, 2001 (6 - 1) ~ (6 - 6).
- [29] Wilschko W, Gesson M, Wilschko R. Magnetic compass orientation of European robins under 565 nm green light. *Naturwissenschaften*, 2001, **88** :387 ~ 390.
- [30] Wilschko W, Wilschko R. Light-dependent magnetoreception in birds : the behavior of European robins, *Erithacus rubecula*, under monochromatic light of various wavelengths and intensities. *J Exp Biol*, 2001, **204** :3 295 ~ 3 302.
- [31] Munro U, Munro J A, Phillips J B, *et al.* Evidence for a magnetite-based navigational " map " in birds. *Naturwissenschaften*, 1997, **84** :26 ~ 28.
- [32] Perdeck A C. Two types of orientation in migrating *Sturnus vulgaris* and *Fringilla coelebs* as revealed by displacement experiments. *Ardea*, 1958, **46** :1 ~ 37.
- [33] Wilschko W, Wilschko R. Magnetic orientation in birds. *Curr Ornithol*, 1988, **5** :67 ~ 121.
- [34] Semm P, Beason R C. Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink. *Brain Res Bull*, 1990, **25** :735 ~ 740.
- [35] Mahold S, Wilschko W, Burda H. A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften*, 1997, **84** :421 ~ 423.
- [36] Light P, Salmon M, Lohmann K J. Geomagnetic orientation of loggerhead sea turtles : evidence for an inclination compass. *J Exp Biol*, 1993, **182** :1 ~ 10.
- [37] Wilschko W, Wilschko R. Magnetic compass orientation in birds and its physiological basis. *Naturwissenschaften*, 2002, **89** :445 ~ 452.