



颜伟玉, 赵方媛, 孟雅苹. 磁场对蜜蜂行为影响的研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1039 - 1043.

磁场对蜜蜂行为影响的研究进展

颜伟玉^{#,*}, 赵方媛[#], 孟雅苹

(江西农业大学蜜蜂研究所, 南昌 330045)

摘要: 地球内部存在着天然磁性现象, 被称为地磁场。当今社会电子通讯发达, 电磁波信号频繁, 地球表面充满了电磁场。蜜蜂作为重要的授粉昆虫, 其活动范围大部分都处于磁场环境中。目前研究者普遍认为蜜蜂能利用磁场进行导航, 但环境中异常的磁场同样会影响蜜蜂的定位导航、飞行行为、采集活动和学习认知能力等。本文对前人的研究结果进行了综述, 以期系统地了解磁场对蜜蜂行为特性的影响。

关键词: 蜜蜂; 磁场感应; 定位导航; 生命活动; 学习记忆

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 05-1039-05

Advances in research on the influence of magnetic field on behavioral characteristics of honey bees

YAN Wei-Yu^{#,*}, ZHAO Fang-Yuan[#], MENG Ya-Ping (Honeybee Research Institute, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: There is a natural magnetic phenomenon inside the earth, which is called the earth's magnetic field. With today's communications developed the electromagnetic waves are frequent, the earth's surface is filled with electromagnetic fields. Honey bees are important pollinators and their foraging flights are exposed to magnetic field environment. At present, researchers generally believe that bees can use magnetic fields for navigation. But the abnormal magnetic fields in the environment will also affect the positioning navigation, flight, foraging activity, learning cognitive ability of bees. In order to understand the influence of magnetic fields on the behavioral characteristics of bees, the results of previous studies were summarized.

Key words: Honey bees; magnetic sensing; positioning navigation; life activities; learning and memory

磁场是由运动电荷或电场的变化产生的。磁场是一种看不见、摸不着的物质, 两磁体之间以磁场作为媒介, 不经接触就能发生相互作用。常见的磁场分为电磁场和地磁场, 变化的电场与变化的磁场交替感应产生电磁场 (包家立, 2015)。地球本身就是一个大磁体, 其产生的磁场即为地磁场。磁场为矢量场, 有大小和方向之分, 磁场

的大小用磁感应强度 B 表示, 国际通用单位为特斯拉 (T), 在高斯单位制中为高斯 (Gs), 单位之间的换算为: $1\text{ T} = 10^3\text{ mT} = 10^6\text{ }\mu\text{T} = 10^9\text{ nT} = 10^4\text{ Gs}$ (贺静澜等, 2018)。

蜜蜂作为重要的授粉昆虫, 约占授粉昆虫总数的 80%, 其活动范围十分广泛, 一般活动半径为 2~3 km (He *et al.*, 2013)。蜜蜂能在复杂环境

基金项目: 国家自然科学基金 (31660696); 江西省蜂产业技术体系 (JXARS-14)

[#]并列第一作者: 颜伟玉, 女, 1978 年生, 江西玉山人, 博士, 教授, 研究方向为蜜蜂生物学, E-mail: ywygood-0216@163.com; 赵方媛, 女, 1994 年生, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向为蜜蜂生物学, E-mail: 504845008@qq.com

^{*} 通讯作者 Author for correspondence: 颜伟玉, E-mail: ywygood-0216@163.com

收稿日期 Received: 2019-10-28; 接受日期 Accepted: 2019-12-11

中准确找到蜜源, 并顺利归巢, 不仅是依赖舞蹈语言、地面标志物和太阳罗盘等, 还可能利用环境中的磁场进行导航 (李位三, 2010)。磁场与其他导航参考信息相比, 不受时间、天气影响, 几乎存在于地球上任何地方。地磁场强度为 25 ~ 70 μT , 在两极处最强, 赤道处最弱, 平均强度为 50 μT (朱晓璐和王江云, 2013)。地磁场是许多生物进行远距离迁徙和导航的重要参考, 如鸟类 (Wiltshko and Wiltshko, 2005)、海龟 *Caretta caretta* (Lohmann *et al.*, 2001)、蝙蝠 *Nyctalus plancyi* (Wang *et al.*, 2007)、虹鳟鱼 *Oncorhynchus mykiss* (Diebel *et al.*, 2000)、带刺龙虾、蚂蚁和蜜蜂 (Lohmann *et al.*, 2007) 均能利用磁场的矢量获得方向信息, 利用磁偏角或强度获取位置信息。

但当今社会工业发展迅速, 地球表面很多地方设置了高压线和电子通讯设施。研究表明, 400 kV 输电线路下的地平面磁场强度可达 100 μT , 但蜜蜂在采集活动中会更靠近输电线路, 从而暴露于更高强度的磁场环境中。距离输电线路 1 m 处的磁场强度为 0.6 mT, 1 cm 处为 14 mT (Shepherd *et al.*, 2018)。环境中无处不在的磁场是极其重要却研究甚少的应激源, 随着人为因素的影响, 蜜蜂采集活动越来越多的暴露于磁场环境中。蜜蜂在大范围的采集活动中如果不能顺利归巢, 蜂群势必会得不到充足的食物, 进而影响到整个蜂群的生存与繁衍, 而蜂群又与植物授粉息息相关。因此, 为了更好地探究磁场对蜜蜂的影响, 本文对蜜蜂可能存在的磁感应机制及不同磁场强度对蜜蜂行为特性的影响进行综述。

1 蜜蜂体内的磁感应机制

关于蜜蜂体内的磁感应机制, 被人们普遍接受的是以磁颗粒介导的磁受体假说, 认为蜜蜂利用腹部的磁铁颗粒感受磁场。有试验显示, 训练蜜蜂将磁场刺激与蔗糖奖励联系后, 切断腹部与胸部的腹神经索, 蜜蜂就不会将磁场刺激与蔗糖奖励联系在一起, 但嗅觉仍能做出正常反应, 证明蜜蜂利用腹部感知磁场 (Liang *et al.*, 2016)。台湾国立清华大学李家维教授等首次在蜜蜂腹部发现了超顺磁铁颗粒 (刘喜生等, 2015), Gould (1978) 等在蜜蜂前腹部发现有磁性物质存在, 且发现磁性物质在蜜蜂蛹期就已形成, 并持续保留

在成虫体内。Hsu 和 Li 建立了尺寸 - 密度纯净工序, 大量的铁粒子从蜜蜂体内的滋养细胞中提取出来, 并利用了超导量子干涉实验仪在蜜蜂腹部发现了剩磁 (Hsu *et al.*, 2007)。Schiff 在蜜蜂前腹部的绒毛基部发现含有超顺磁铁颗粒, 但由于缺乏进一步的研究, 很难判断该区域的超顺磁铁颗粒与含有超顺磁铁的腹部绒毛之间的联系 (Schiff, 1991)。除了在蜜蜂前腹部发现铁磁物质外, 蜜蜂腹部脂肪中的营养细胞中也发现了超顺磁铁颗粒, 研究表明营养细胞中的超顺磁铁颗粒可能发挥着磁感受器这一作用。但这一结论随后又被质疑 (Kuterbach and Walcott, 1986; Hsu and Li, 1994; Hsu *et al.*, 2007), 因为有学者发现, 该颗粒内的铁微粒大小与血铁黄素蛋白或铁蛋白一致, 即该颗粒极有可能具有储存铁的功能, 而非磁感受器 (Kirschvink and Walker, 1995)。

最近几年在鸟类和其他昆虫中相继发现了光受体蛋白 (Mouritsen and Hore, 2012; 王晓明等, 2014) 和复合物 Cry-MagR (Qin *et al.*, 2015; 曾维倩, 2016), 有学者提出了除基于铁磁物质的生物磁受体理论以外的化学-光依赖的自由基假说和基于蛋白质的生物指南针模型假说。自由基对假说认为, 将光感受器 (如隐花色素 Cry) 暴露于紫外光或蓝光下, 可诱导自由基对作为短暂的中间体, 最终使动物能看到磁场 (Ritz *et al.*, 2000; Ritz *et al.*, 2010)。基于蛋白质的生物指南针假说认为, 复合物 Cry-MagR 是由大量的光受体蛋白 Cry 和磁受体蛋白 MagR 组成, Cry 包围在外侧, MagR 在内侧, 光刺激引起 Cry 的电子跃迁, 电子传递给内侧磁受体蛋白 MagR, 将光和磁偶联起来, 从而感知磁场 (Qin *et al.*, 2015)。蜜蜂体内存在 Cry 和 MagR (Yuan *et al.*, 2007), 但蜜蜂体内是否存在这种磁感应机制尚不清楚。因此, 蜜蜂究竟是利用何种机制感知磁场的, 目前尚无定论。

2 磁场对蜜蜂行为的影响

2.1 磁场对蜜蜂导航的影响

蜜蜂能利用太阳偏振光、太阳罗盘、地面标志物、颜色、蜜蜂舞蹈和地球磁场进行定位导航 (Dyer and Gould, 1981; 刘新迎, 1990; Schmitt and Esch, 1993)。蜜蜂之所以能利用地磁进行导航, 可能是因为其体内存在磁感应器, 通过感应地磁

场三要素(磁感应强度、磁偏角、磁倾角)来进行定位导航。Could 和 Wajnbery 通过试验发现,蜜蜂通过摆尾舞传递的方向信息是有误差的,当地磁消失后这种误差也会消失;如果将巢脾水平放置,即重力线与巢房之间的方向改变,蜜蜂将会停止舞蹈或舞蹈传递错误信息,一段时间后,蜜蜂可以按磁场方向舞蹈来正确指示方向,然而磁场消失后,这种行为也会随之消失(Towne and Gould, 1985)。Karl von Frisch 曾做了一个试验,将蜜蜂从巴黎搬到纬度相似的纽约,蜜蜂能够正常的采集归巢,当放置于纬度不同的地方时,蜜蜂的采集活动就会变得混乱(任勤等, 2012),这是由于两地的纬度不同导致地磁存在差异。另外,将蜂箱置于磁场发生处(如高压电线下)蜂群很容易发生迷巢(刘新迎, 1990)。因此,磁场变化对蜜蜂的采集活动和定位存在一定影响。

2.2 磁场对蜜蜂采集活动的影响

磁场对蜜蜂的采集活动有着直接的影响。在没有其他外部信号(景物标志、气味、声音等)存在时,蜜蜂可通过地磁场来建立自身的生命节律,当加以外部磁场时,生命节律就会被打乱(Gould *et al.*, 1978)。蜜蜂暴露于磁场中会导致磁感受失调(Lambinet *et al.*, 2017)。蜜蜂通过训练后能对磁场的变化做出反应,实验室内磁场诱导和太阳诱发的地磁风暴会使采集蜂产生一种磁接受障碍,导致它们归巢途中迷路,所以当太阳日冕大爆发或者地球磁场发生剧烈变化时(如地震),可能会干扰蜜蜂的采集活动和归巢能力,这将会导致整个蜂群受损(Gould *et al.*, 1980; Tomlinson *et al.*, 1981)。将经过磁场处理的蜜蜂和未经过磁场处理的蜜蜂带至距蜂群不同的距离放飞,结果显示随着距离的增加,未经磁场处理的蜜蜂归巢数量高于经过磁场处理的蜜蜂(Ferrari, 2014)。Greenberg 指出,当蜂箱放置于高压电线下时,蜂群表现出活动增加、蜂箱重量下降、蜂群失王、蜂群越冬能力下降、蜂王产卵能力下降、产卵异常、封盖率和孵化率降低等;蜂群在 7 ~ 11 kV/m 的交流电线路下筑巢后,蜂群变得异常活跃,几天后巢门口完全被蜂胶封闭且蜂群死亡(Greenberg *et al.*, 1981)。Wellenstein 观察到,将蜂群放置 110 kV 高压电线下,蜂群采集花蜜增多;在 220 kV 的高压电线下,蜂群聚集的趋势增加(Wellenstein, 1973)。Altmann 通过试验得到,蜂群在 7.4 kV 环境下开始飞逃,在 20 kV 以上代谢

率随磁场强度增加而增加,在 50 kV 时开始互相螫刺(Altmann and Warnke, 1976)。暴露于低水平磁场会降低蜜蜂的摄食量,影响蜜蜂的飞行活动,导致振翅频率增加(Brembs *et al.*, 2007)。蜜蜂的飞行是一个高耗能运动,与蜜蜂寿命也高度相关,任何飞行行为的中断都会使暴露于电磁场中的蜜蜂产生更大的能量需求,摄食量的降低与飞行行为的改变不仅影响单个蜜蜂,也影响整个蜂群的健康状况与群势。

2.3 磁场对蜜蜂学习记忆的影响

在自然环境中,蜜蜂必须通过学习记忆来寻找采集地点、分析蜜粉源的质量与形态(如花的形状、颜色、气味)、记住地面标志物以及采集地点与巢房之间的位置关系等,以便与蜂群进行沟通(Hammer, 1997)。蜜蜂学习能力的高低与蜂群的采集活动高度相关,学习能力差的蜂群花蜜采集量低于学习能力高的蜂群(Raine and Chittka, 2008)。Shepherd 首次发现,急性暴露于极低频电磁场(电力能源在使用、运输、泄露时所产生的,频率为 3 ~ 3 000 Hz)会降低蜜蜂的嗅觉学习能力,在 20 ~ 1 000 μT 的范围内,各个水平的极低频电磁场均会干扰蜜蜂的学习性能(朱晓璐和王江云, 2013)。随着社会发展,电力设施越来越多,电磁场覆盖面也越来越广,蜂群的采集活动将会受到影响。蜜蜂学习记忆能力的降低也将会影响蜜蜂个体和整个蜂群的发展与安全。

3 结论与展望

地球上的生物时时刻刻都处于磁场环境中,许多生物在迁徙、觅食过程中都能利用地磁强度、磁偏角、磁倾角进行定位导航。大量研究表明,当动物处于亚磁场(低于 5 μT)中时,其中枢神经系统将会出现功能性障碍,如影响鸟类的昼夜节律和发声行为(Bliss and Heppner, 1976),果蝇的学习和记忆发生障碍(Zhang *et al.*, 2004)。50 Hz 的调制磁场和中等的静态磁场会影响家兔韧带成纤维细胞的增殖能力(Ross, 1990)。强磁场会改变非洲爪蟾卵早期细胞分裂的几何结构(Valles, 2002)。

磁场对蜜蜂的定向导航有很大影响,但具体的影响机制尚不明确,蜜蜂利用磁场导航的磁场强度范围也不清楚。太阳无时无刻不在移动,地磁场也相应地发生变化,蜜蜂是如何处理太阳偏

振光方向和地磁场两者之间的关系,目前尚无统一的解释。蜜蜂在导航中参考多种信息,究竟哪一种信息占主导地位,还是几种信息相结合起作用尚不清楚。

磁场影响着蜜蜂的飞行行为和采集活动。最早是1994年在意大利和法国发生了蜂群衰竭失调症(简称CCD),在2006年几乎在全球范围内出现了CCD的大爆发,这可能与多种因素有关(颜志立,2010)。当今社会电子通讯发达,电磁波信号频繁,CCD的大范围爆发是否与电磁波干扰或电磁场有关?目前,关于极低频电磁场对生物影响的研究主要集中在哺乳动物,长期接触极低频电磁场是哺乳动物主要的压力因素(Simko and Mattsson,2004),可导致记忆缺陷(Jadidi *et al.*,2007)和焦虑行为(Liu *et al.*,2008)。很少有人研究较高强度的磁场是否会对蜜蜂产生影响。电线周围的磁场强度是否会降低蜜蜂的学习和认知能力,进而影响蜂群的授粉能力?近年来飞行昆虫的生物量显著下降,昆虫多样性和丰富度的降低将会对食物链产生连锁反应,并危及整个生态系统(Hallmann *et al.*,2017)。因此,我们需要进一步了解磁场对授粉昆虫的影响,以便采取措施减少授粉昆虫的生存压力,更好地为生态系统服务。

参考文献 (References)

- Altmann VG, Warnke U. Der stoffwechsel von bienen (*Apis mellifica* L.) im 50-Hz-hochspannungsfeld [J]. *Journal of Applied Entomology*, 1976, 80: 267 - 271.
- Bao JL. Health effects of extremely low frequency electromagnetic fields [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41 (8): 2550 - 2561. [包家立. 极低频电磁场的健康效应 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (8): 2550 - 2561]
- Bliss VL, Heppner FH. Circadian activity rhythm influenced by near zero magnetic field [J]. *Nature*, 1976, 261 (5559): 411 - 412.
- Brembs B, Christiansen F, Pflugger HJ, *et al.* Flight initiation and maintenance deficits in flies with genetically altered biogenic amine levels [J]. *Journal of Neuroscience*, 2007, 27 (41): 11122 - 11131.
- Diebel CE, Proksch R, Green CR, *et al.* Magnetite defines a magnetoreceptor [J]. *Nature*, 2000, 406 (6793): 299 - 302.
- Dyer FC, Gould JL. Honeybee orientation: A backup system for cloudy days [J]. *Science*, 1981, 214: 1041 - 1042.
- Ferrari TE. Magnets, magnetic field fluctuations and geomagnetic disturbances impair the homing ability of honey bees (*Apis mellifera*) [J]. *Journal of Apicultural Research*, 2014, 53 (4): 452 - 465.
- Gould JL, Kirschvink JL, Deffeyes KS. Bees have magnetic remanence [J]. *Science*, 1978, 201 (4360): 1026 - 1028.
- Gould JL, Kirschvink JL, Deffeyes KS, *et al.* Orientation of demagnetized bees [J]. *J. Exp. Biol.*, 1980, 86: 1 - 8.
- Greenberg B, Bindokas VP, Frazier MJ, *et al.* Response of honey bees, *Apis mellifera* L., to high - voltage transmission lines [J]. *Environmental Entomology*, 1981, 10 (5): 600 - 610.
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, *et al.* More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12 (10): e0185809.
- Hammer M. The neural basis of associative reward learning in honeybees [J]. *Trends in Neurosciences*, 1997, 20: 245 - 252.
- He JL, Wang GJ, Zhang M, *et al.* Progress in the study of geomagnetic responses of organisms [J]. *Prog. Biochem. Biophys.*, 2018, 45 (7): 689 - 704. [贺静澜, 万贵钧, 张明, 等. 生物地磁响应研究进展 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2018, 45 (7): 689 - 704]
- He X, Wang W, Qin Q, *et al.* Assessment of flight activity and homing ability in Asian and European honey bee species, *Apis cerana* and *Apis mellifera*, measured with radio frequency tags [J]. *Apidologie*, 2013, 44: 38 - 51.
- Hsu CY, Ko FY, Li CW, *et al.* Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*) [J]. *PLoS ONE*, 2007, 2: e395.
- Hsu CY, Li CW. Magnetoreception in honeybees [J]. *Science*, 1994, 265 (5168): 95 - 97.
- Jadidi M, Firoozabadi SM, Rashidy - Pour A, *et al.* Acute exposure to a 50Hz magnetic field impairs consolidation of spatial memory in rats [J]. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2007, 88 (4): 387 - 392.
- Kirschvink JL, Walker MM. Honeybees and magnetoreception [J]. *Science*, 1995, 269 (5232): 1888 - 1889.
- Kuterbach DA, Walcott B. Iron - containing cells in the honey bee (*Apis mellifera*) [J]. *J. Exp. Biol.*, 1986, 126: 375 - 387.
- Lambinet V, Hayden ME, Reigl K, *et al.* Linking magnetite in the abdomen of honey bees to a magnetoreceptive function [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284 (1851): 20162873.
- Liang CH, Chuang CL, Jiang JA, *et al.* Magnetic sensing through the abdomen of the honey bee [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23657.
- Liu TT, Wang S, He LH, *et al.* Anxiogenic effect of chronic exposure to extremely low frequency magnetic field in adult rats [J]. *Neuroscience Letters*, 2008, 434 (1): 12 - 17.
- Liu XS, Li CY, Jiang YS. Advances in research on bee orientation mechanism [J]. *Apiculture of China*, 2015, 66 (1): 15 - 17. [刘喜生, 李春雁, 姜玉锁. 蜜蜂定向机制的研究进展 [J]. 中国蜂业, 2015, 66 (1): 15 - 17]
- Liu YX. Directional positioning of bees and application of their production [J]. *Journal of Bee*, 1990, 6: 13 - 14. [刘新迎. 蜜蜂的定向定位及其生产的应用 [J]. 蜜蜂杂志, 1990, 6: 13 - 14]
- Li WS. The effect of static charge and electromagnetic waves on bees and their correlation with CCD [J]. *Apiculture of China*, 2010,

- 61 (6): 54–55. [李位三. 静电荷、电磁波对蜜蜂影响和 CCD 相关性 [J]. 中国蜂业, 2010, 61 (6): 54–55]
- Lohmann KJ, Cain SD, Dodge SA, *et al.* Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles [J]. *Science*, 2001, 294 (5541): 364–366.
- Lohmann KJ, Lohmann CMF, Putman NF. Magnetic maps in animals: Nature's GPS [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2007, 210 (21): 3697–3705.
- Mouritsen H, Hore PJ. The magnetic retina: Light – dependent and trigeminal magnetoreception in migratory birds [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2012, 22 (2): 343–352.
- Qin SY, Yin H, Yang CL, *et al.* A magnetic protein biocompass [J]. *Nature Materials*, 2015, 15 (2): 217–226.
- Raine NE, Chittka L. The correlation of learning speed and natural foraging success in bumble – bees [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 275: 803–808.
- Ren Q, Dai RG, Luo WH, *et al.* Advances in research on bee orientation mechanism [J]. *Apiculture of China*, 2012, 63 (Z2): 14–17. [任勤, 戴荣国, 罗文华, 等. 蜜蜂定向机制研究进展 [J]. 中国蜂业, 2012, 63 (Z2): 14–17]
- Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor – based magnetoreception in birds [J]. *Biophysical Journal*, 2000, 78 (2): 707–718.
- Ritz T, Ahmad M, Mouritsen H, *et al.* Photoreceptor – based magnetoreception: Optimal design of receptor molecules, cells, and neuronal processing [J]. *J. R. Soc. Interface*, 2010, 7 (Suppl. 2): S135–S146.
- Ross SM. Combined DC and ELF magnetic fields can alter cell proliferation [J]. *Bioelectromagnetics*, 1990, 11 (1): 27–36.
- Schiff H. Modulation of spike frequencies by varying the ambient magnetic field and magnetite candidates in bees (*Apis mellifera*) [J]. *Comp. Biochem. Physiol. A Comp. Physiol.*, 1991, 100 (4): 975–985.
- Schmitt DE, Esch HE. Magnetic orientation of honeybees in the laboratory [J]. *Naturwissenschaften*, 1993, 80 (1): 41–43.
- Shepherd S, Lima MAP, Oliveira EE, *et al.* Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 7932.
- Simko M, Mattsson MO. Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses *in vitro*: Possible immune cell activation [J]. *Journal of Cellular Biochemistry*, 2004, 93 (1): 83–92.
- Tomlinson J, McGinty S, Kish J. Magnets curtail honey bee dancing [J]. *Animal Behaviour*, 1981, 29 (1): 307–308.
- Towne WF, Gould JL. Magnetic Field Sensitivity in Honeybees [M]. New York: Springer US, 1985, 385–406.
- Valles JM. Model of magnetic field – induced mitotic apparatus reorientation in frog eggs [J]. *Biophysical Journal*, 2002, 82 (3): 1260–1265.
- Wang XM, Ceng W, Li Y, *et al.* Research progress of cryptochromes light – dependent magnetoreception mechanism [J]. *Biotechnology*, 2014, 24 (3): 95–100. [王晓明, 陈薇, 李燕, 等. 隐花色素蛋白光依赖磁感应机制研究进展 [J]. 生物技术, 2014, 24 (3): 95–100]
- Wang Y, Pan Y, Parsons S, *et al.* Bats respond to polarity of a magnetic field [J]. *Proc. R. Soc. B*, 2007, 274 (1627): 2901–2905.
- Wellenstein VG. Der einfluß von hochspannungsleitungen auf bienenvölker (*Apis mellifica* L.) [J]. *Journal of Applied Entomology*, 1973, 74: 86–94.
- Wiltshko W, Wiltshko R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals [J]. *J. Comp. Physiol. A*, 2005, 191: 675–693.
- Yan ZL. Postscript of the 7th bee and bee products symposium on both sides of the Taiwan Straits (one) [J]. *Journal of Bee*, 2010, 1: 16–17. [颜志立. 海峡两岸第七届蜜蜂与蜂产品研讨会后记 (一) [J]. 蜜蜂杂志, 2010, 1: 16–17]
- Yuan Q, Metterville D, Briscoe AD, *et al.* Insect cryptochromes: Gene duplication and loss define diverse ways to construct insect circadian clocks [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2007, 24 (4): 948–955.
- Zeng QW. The discovery of the magnetic receptor protein MagR and the molecular mechanism of animal migration navigation [J]. *Science Guide*, 2016, 34 (13): 67–69. [曾维倩. 磁受体蛋白 MagR 的发现和动物迁徙导航的分子机理 [J]. 科技导报, 2016, 34 (13): 67–69]
- Zhang B, Lu H, Xi W, *et al.* Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster* [J]. *Neuroscience Letters*, 2004, 371 (2–3): 190–195.
- Zhu XL, Wang JY. The effect of geomagnetism on biomagnetism [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35 (3): 200–206. [朱晓璐, 王江云. 地磁场与生物的磁感应现象 [J]. 自然杂志, 2013, 35 (3): 200–206]