

褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内磁性物质定位和定量检测

颜学宾^{1,2,#}, 刘宇新^{1,#}, 姚亮宇^{1,2}, 王文肖^{1,2}, 潘卫东^{3,*}, 陈法军^{1,*}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫学系, 南京 210095; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院生态学系, 南京 210095; 3. 中国科学院电工研究所生物电磁学北京市重点实验室, 北京 100190)

摘要:【目的】地磁定向是昆虫远距离迁飞定向的重要机制之一。本研究以迁飞性害虫褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 长翅型和短翅型雌雄成虫为研究对象, 系统开展虫体内磁性物质定量研究。【方法】本研究利用 MPMS-7 型超导量子磁强计检测褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内的磁性物质, 并将经普鲁士蓝染色后的虫体超薄石蜡切片于 JEM-2100 型透射电子显微镜下观察磁性物质的分布状况, 最后利用原子发射光谱法对虫体内的磁性物质进行定量分析与比较。【结果】超导量子磁强计检测发现, 仅在褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部的磁滞曲线有明显闭合现象, 证明该部位存在磁性物质; 经透射电镜观察发现, 普鲁士蓝沉淀主要呈点簇状存在于虫体腹部, 证明该部位存在铁磁性物质; 通过等离子发射光谱检测发现, 同一性别长翅型成虫体内铁离子含量显著高于短翅型成虫, 且相同翅型雄成虫体内铁离子含量显著高于雌成虫。【结论】褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部普遍存在铁磁性物质, 且不同翅型和性别间磁性物质含量差异显著。

关键词: 褐飞虱; 迁飞定向; 翅型; 性别; 磁性物质; 超导量子磁强计; 普鲁士蓝染色; 原子发射光谱法

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2015)02-0132-07

Localization and quantitative detection of magnetic materials in the macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae)

YAN Xue-Bin^{1,2,#}, LIU Yu-Xin^{1,#}, YAO Liang-Yu^{1,2}, WANG Wen-Xiao^{1,2}, PAN Wei-Dong^{3,*}, CHEN Fa-Jun^{1,*} (1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Department of Ecology, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Beijing Key Laboratory of Bioelectromagnetics, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: 【Aim】 The geomagnetic orientation is one of the important mechanisms for the flight orientation of migratory insects in their long distance migration. In this study, the macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* were selected to systemically study the magnetic materials harbored in their bodies. 【Methods】 The superconducting quantum interference device (SQID) (model: MPMS-7) was used to detect the existence of magnetic materials in the macropterous and brachypterous female and male adults of BPH, and the distribution of magnetic materials in the four types of adults was observed using the ultrathin paraffin sections (UPS) with Prussian blue staining (PBS) under the transmission electron microscope (TEM) (model: JEM-2100). The atomic emission spectroscopy (AES) was used for the quantitative analysis and comparison of the magnetic materials in the four types of adults. 【Results】 The SQID detection found that the hysteresis curves were obviously closing only in the abdomen of the macropterous and brachypterous female and male adults of *N. lugens*, indicating that magnetic materials harbored in the abdomen of

基金项目: 国家重点基础研究规划(“973”计划)项目(2010CB126200); 国家自然科学基金项目(31470454, 31272051, 31170362); 江苏省“青蓝工程”优秀中青年学术带头人项目; 2013 国家大学生创新性实验计划“SRT”

作者简介: 颜学宾, 男, 1993 年生, 江苏建湖人, 学士, 主要从事生物电磁学研究, E-mail: 12211128@njau.edu.cn; 刘宇新, 男, 1983 年生, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事迁飞昆虫地磁定向机理研究, E-mail: 2012802140@njau.edu.cn

共同第一作者 Authors with equal contribution

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: panwd@mail.iee.ac.cn; fajunchen@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2014-10-13; 接受日期 Accepted: 2014-12-26

adults. Prussian blue precipitate also mainly existed in the abdomen through the observation under TEM, indicating that the detected magnetic materials are ferromagnetic substance. There were significant differences in the contents of magnetic materials between the macropterous and brachypterous adults and between the males and females through the AES detection. For adults of the same gender, the Fe ion content in the macropterous individuals was significantly higher than that in the brachypterous individuals. And for the same wing-form, the Fe ion content in the male adults was significantly higher than that in the female adults. 【Conclusion】 Fe magnetic materials generally exist in the abdomen of macropterous and brachypterous female and male adults of *N. lugens*, and their contents are significantly different between the macropterous and brachypterous adults and between the males and females.

Key words: *Nilaparvata lugens*; migratory orientation; wing form; gender; magnetic materials; superconducting quantum interference device (SQUID); Prussian blue staining (PBS); atomic emission spectroscopy (AES)

迁飞性昆虫通常是指具有远距离迁飞习性的昆虫种类,它们可飞行数百乃至数千公里到达新的栖息地繁衍生息,如稻飞虱、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、大斑蝶 *Danaus plexippus*、小地老虎 *Agrotis ipsilon*、草地螟 *Loxostege sticticalis*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、蝗虫等许多农业害虫,这类昆虫都具有远距离迁飞习性(江幸福和罗礼智,2008)。大量研究证实褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、白背飞虱 *Sogatella furcifera* 和灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 等具有典型的远距离迁飞习性(翟保平和程家安,2006; Otuka, 2013)。近年来,稻飞虱的发生危害面积不断扩大,为害程度亦日趋加重,成为威胁我国南方水稻生产的最重要害虫种类之一,其迁飞习性也大大提高了稻飞虱发生预警与防控的难度。稻飞虱主要刺吸水稻茎叶,导致植株干枯,大发生时可造成水稻枯死,并大面积出现“穿顶”和“冒穿”,甚至颗粒无收,致使水稻大幅度减产甚至绝收,造成严重经济损失(程遐年和王海扣,1996)。此外,3种稻飞虱还是多种病毒传播的媒介昆虫,因病毒病导致的间接危害损失更甚(姜辉等,2005)。

昆虫雷达观测结果表明,远距离迁飞性昆虫的空中虫群具有典型的共定向行为,空中虫群的头向均朝向同一地理方位,通常与风向保持一定夹角。这种共同定向行为对于昆虫顺利抵达迁飞目的地具有重要意义。远距离迁飞昆虫如何能在大尺度迁飞过程中进行共定向,其定向行为机制耐人寻味(高月波和翟保平,2010)。大量研究证明,昆虫可能的迁飞定向机制包括太阳罗盘定向(Oliveira *et al.*, 1998)、星空标志定向(Wehner, 1984)、偏振光定向(Rössel and Wehner, 1986)、侧风漂移补偿(Preiss

and Gewecke, 1991)和地磁定向(Banks and Srygley, 2003)等。目前,夜间迁飞昆虫定向机制的研究表明,夜间迁飞昆虫最可能利用的定向信号是地磁场(Chapman *et al.*, 2011)。但这一观点还只停留在利用雷达观测现象进行的推论(翟保平,2005),尚缺乏行为学和生理学上的试验证据支持。因此,开展夜行型迁飞昆虫的磁生理学研究对于揭示迁飞定向机制具有重要意义。其现实意义在于,研究明确迁飞定向机制有助于判断害虫迁飞路径及其降落区域,为迁飞害虫的异地预测提供依据(吴先福等,2006;高月波和翟保平,2010)。但时至今日,国内外关于稻飞虱地磁定向的相关研究还未见报道。解春兰等(2011)在对褐飞虱进行分体段检测时发现,褐飞虱短翅型和长翅型雌、雄成虫腹部温度退磁曲线在 $T = 220\text{K}$ 处有明显拐点,且磁滞回线明显闭合,说明该部位有磁滞(即矫顽力)存在,也即存在着磁性物质;而短翅型和长翅型雌、雄成虫头胸部的磁滞回线无闭合现象,说明该部位无磁性物质存在。但其并没有直接观测到存在于褐飞虱成虫腹部的磁性物质,也没有对不同翅型、不同性别的褐飞虱体内磁性物质含量进行比较分析。本研究以水稻重大迁飞性害虫褐飞虱为对象,检测褐飞虱不同翅型(长翅型和短翅型)和性别(雌性和雄性)成虫体内磁性物质及其分布状况,并进行定量分析,为稻飞虱地磁定向研究奠定物质基础。

1 材料与方 法

1.1 供试褐飞虱

供试褐飞虱成虫包括长翅型和短翅型雌雄成虫4种类型。2013年7月下旬,在山东德州气候变化

与生物多样性和控害减排创新研究基地 (37°38'30.7"N, 116°51'11.0"E; <http://www.ccbpm.org>) 大田罩网内, 利用稻丛扫网法收集了继代饲养的褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫, 分别置于 1.5 mL 离心管中, 每种类型成虫每管各 15 头, 各 3 次重复, 用微量天平 (型号为 METTLER TOLEDO XP6; 最大量程

6.1 g, 精度 0.001 mg, 线性误差为 0.004 mg) 称得每管褐飞虱虫体重, 离心管编号后加入 Na_2HPO_4 9.465 g 和 KH_2PO_4 9.07 g 溶于 1 L 去离子水中制成的 1.15 mol/L 的 pH 6.8 的磷酸盐缓冲液中保存备用, 以防止临时保存的褐飞虱样品组织降解。样本量及实验重复信息见表 1。

表 1 褐飞虱长 (短) 翅型雌雄成虫供试样本量及其重复数

Table 1 Sample size and replications of the tested macropterous (brachypterous) female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

	磁滞回线检测 Detection of hysteresis loop		磁性物质定位检测 Localization of magnetic materials		磁性物质含量检测 Detection of the content of magnetic particles	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
样本大小 (头) Sample size (number of individuals)	15 (15)	15 (15)	15 (15)	15 (15)	15 (15)	15 (15)
重复数 Replications	3 (3)	3 (3)	3 (3)	3 (3)	3 (3)	3 (3)

样本大小表示用于一次性检测的长翅型 (短翅型) 雌雄成虫数量; 括号中的数值表示短翅型成虫数量。Sample size means the number of macropterous (brachypterous) female and male adults used for one test. Values in parentheses stand for the number of brachypterous adults.

1.2 磁滞回线检测

磁滞回线描述的是磁通密度或磁化强度与磁场强度的关系, 可直接反映磁性材料的磁性强弱。通过观察磁滞回线是否闭合可确定褐飞虱成虫体内磁性的强弱。磁滞回线测定参照解春兰等 (2011) 的方法, 测定仪器为超导量子磁强计 (型号 MPMS-7, 美国 Quantum Design 公司), 其测量范围为 $1 \times 10^{-10} \sim 0.3 \text{ Am}^2$, 绝对灵敏度 $1 \times 10^{-10} \text{ Am}^2$ (0.8 mA/m) 和 $5 \times 10^{-10} \text{ Am}^2$ (4.0 mA/m), 磁场范围为 $\pm 4.8 \text{ mA/m}$, 温度范围为 1.9 ~ 400 K, 样品空间 $< \Phi 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 测定指标为磁滞回线 ($T = 10 \text{ K}$)。

1.3 磁性物质定位检测

动物体内的铁以铁蛋白、含铁血黄素或酸性磷酸酶等形式存在, 这些铁在酸化的低铁氰化钾溶液中反应, 生成蓝色的铁氰化铁沉淀 (即普鲁士蓝), 并定位于含铁部位, 此染色法称为普鲁士蓝反应 (曲淑贤等, 2009)。取出供试褐飞虱, 使用配好的磷酸盐溶液冲洗去除其表面杂质; 切取褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部, 用 8% ~ 10% 甲醛溶液进行组织固定; 将处理好的虫体送至清华大学进行石蜡超薄切片制作, 经普鲁士蓝染色后于透射电镜 (JEM-2100 型透射电子显微镜) 下观察, 进而对褐飞虱体内的磁性物质进行定位。

1.4 磁性物质定量检测

褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内磁性物质的定量检测采用原子发射光谱 (ICP) 法, 该方法利用物质在热 (电) 激发下元素的原子或离子发射特

征光谱来判断物质组成以进行元素定量分析。切取褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部, 在磷酸盐缓冲液中清洗后收集; 将腹部组织切开, 用超细镊子或玻璃棒挤压使其中物质充分挤出, 将所有物质收集到离心管中反复冻融 3 次; 用电动组织研磨器充分打碎, 1 000 r/min 离心 60 s; 弃掉上清液, 加入 4.5 mL 去离子水, 然后加入 0.5 mL 浓硝酸, 180°C 油浴 30 min; 取出擦净离心管后用发射光谱仪 (SPECTRO ARCOS 型全谱直读等离子发射光谱仪) 进行 ICP 检测, 磁性物质相对含量 (ng/mg) = 检测得到的磁性物质含量 (ng) / 所测样本虫体重量 (mg), 磁性物质绝对含量 (ng/头) = 检测得到的磁性物质含量 (ng) / 所测样本成虫头数 (头)。

1.5 数据分析

试验数据分析采用 SPSS16.0 统计软件进行。采用双因子方差分析 (Two-way ANOVA) 比较不同翅型 (长翅型和短翅型) 和不同性别 (雌虫和雄虫) 褐飞虱成虫体内磁性物质含量差异。处理间差异显著性分析采用 LSD 检验 ($P < 0.05$)。数据分析前, 绝对值数据进行对数转换以符合正态分布假设。

2 结果

2.1 褐飞虱长 (短) 翅型雌雄成虫体内磁性物质的磁滞回线

磁滞回线可直接反映磁性材料的磁性强弱或

有无。通过超导量子磁强计检测发现, 褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部的磁滞曲线均有明显闭合现象(图 1: A ~ D), 证明该部位存在磁性物

质; 而对应的头胸部磁滞回线检测未发现明显闭合现象(图 2: A ~ D), 说明该部位无磁性物质分布。

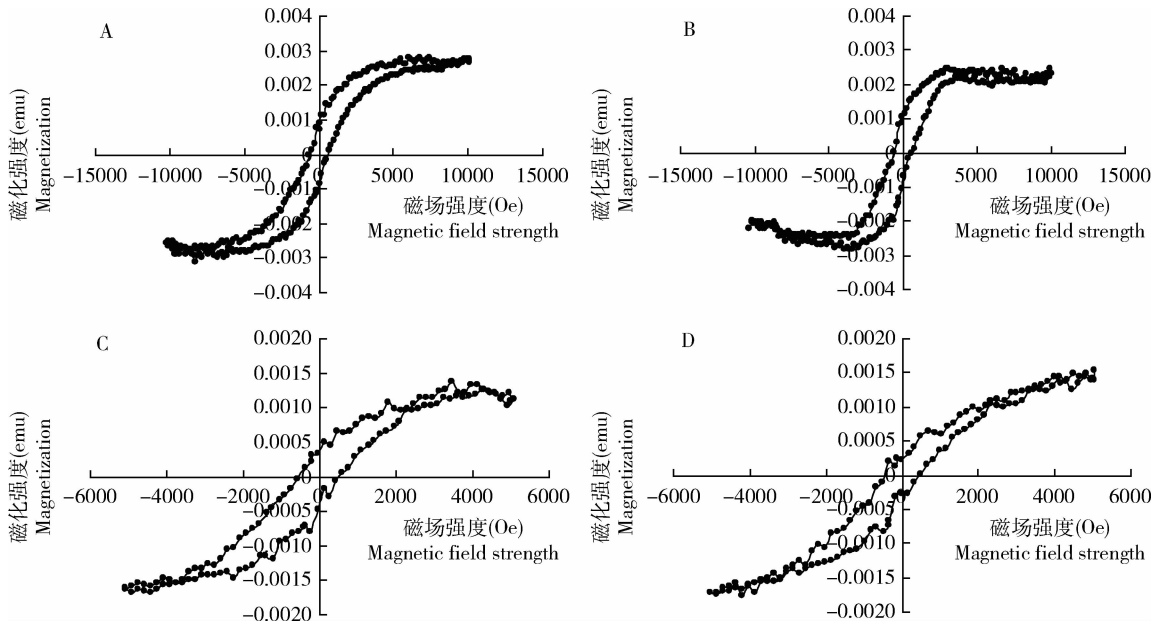


图 1 褐飞虱长(短)翅型雌雄成虫腹部磁性物质的磁滞回线检测

Fig. 1 Detection of the hysteresis loops of magnetic materials in the abdomen of macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

A: 长翅型雄虫 Macropterous males; B: 长翅型雌虫 Macropterous females; C: 短翅型雄虫 Brachypterous males; D: 短翅型雌虫 Brachypterous females. 下同。The same below.

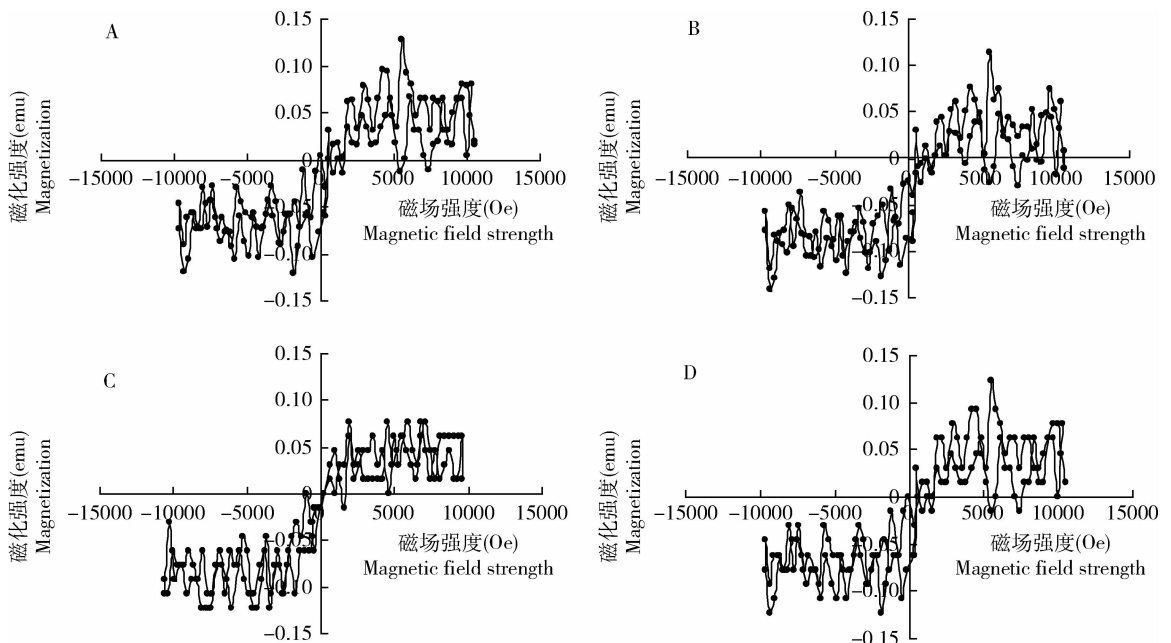


图 2 褐飞虱长(短)翅型雌雄成虫头胸部磁性物质的磁滞回线检测

Fig. 2 Detection of the hysteresis loops of magnetic materials in the cephalothorax of macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

2.2 褐飞虱长(短)翅型雌雄成虫体内磁性物质的定位

通过石蜡超薄切片的普鲁士蓝反应可有效定位含铁部位。对普鲁士蓝染色后的石蜡超薄切片的透

射电镜观察发现,褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫腹部均存在铁磁物质,且呈点簇状分布(图 3: A ~ D,方框标注部分)。

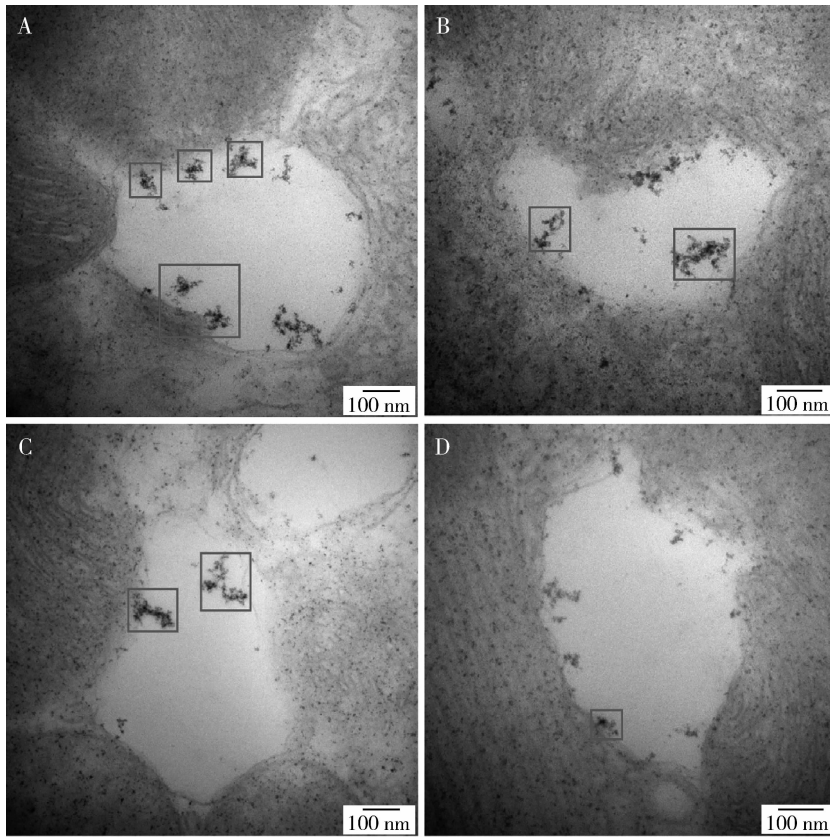


图 3 褐飞虱长(短)翅型雌雄成虫腹部铁离子的透射电镜观察

Fig. 3 Observation of Fe ions in the abdomen of macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* by using transmission electron microscope (TEM)

A: 长翅型雄虫 Macropterous males; B: 长翅型雌虫 Macropterous females; C: 短翅型雄虫 Brachypterous males; D: 短翅型雌虫 Brachypterous females. 图中方框内为磁性物质。Magnetic materials are boxed in the figure.

2.3 褐飞虱长(短)翅型雌雄成虫体内磁性物质的含量

褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内磁性物质的定量检测采用原子发射光谱(ICP)法。通过对数据进行显著性分析发现,不同翅型(绝对含量: $F = 507.49$, $P < 0.001$; 相对含量: $F = 129.56$, $P < 0.001$)和不同性别(绝对含量: $F = 1768.45$, $P < 0.001$; 相对含量: $F = 4941.01$, $P < 0.001$)褐飞虱

成虫体内铁离子绝对含量(ng/头)和相对含量(ng/mg)差异显著(表 2)。其中,同一性别褐飞虱长翅型成虫体内铁离子含量显著高于短翅型成虫体内铁离子含量($P < 0.05$)(图 4: A, B; 图 5: A, B);此外,同一翅型褐飞虱雄成虫体内铁离子含量也显著高于雌成虫体内铁离子含量($P < 0.05$)(图 4: A, B; 图 5: A, B)。

表 2 褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内铁离子含量的两因子方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on the Fe ion contents in macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

	翅型 Wing form	性别 Gender	翅型×性别 Wing form×Gender
铁离子绝对含量(ng/头) Absolute content of Fe ions (ng/adult)	507.49 (<0.001)	1768.45 (<0.001)	5.34 (0.050)
铁离子相对含量(ng/mg 体重) Relative content of Fe ions (ng/mg body weight)	129.56 (<0.001)	4941.01 (<0.001)	0.30 (0.600)

表中数据表示 $F(P)$ 值 Data in the table stand for $F(P)$ values. 翅型 Wing form: 长翅型和短翅型 Macropterous and brachypterous adults; 性别 Gender: 雌性和雄性 Female and male.

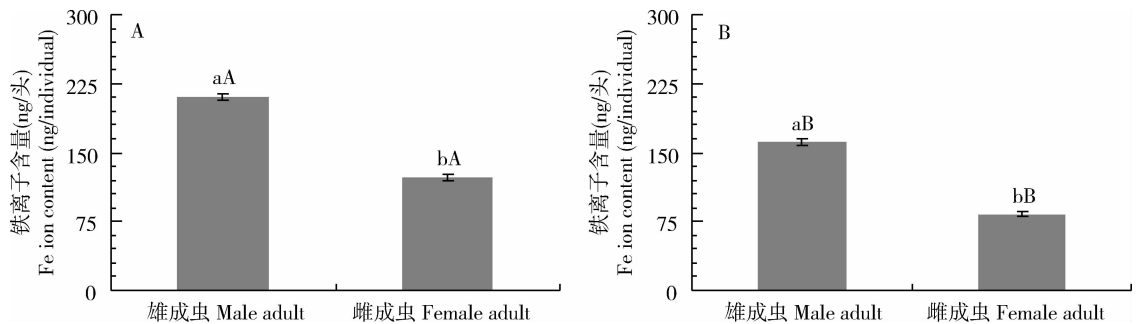


图 4 褐飞虱长翅型(A)和短翅型(B)雌雄成虫体内铁离子的绝对含量

Fig. 4 The absolute contents of Fe ions in macropterous (A) and brachypterous (B) female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

不同小写字母和不同大写字母分别表示经 LSD 检验同一翅型雌雄之间, 以及同一性别不同翅型之间差异显著 ($P < 0.05$); 图 5 同。Different lowercase and uppercase letters indicate significant differences between females and males for same wing forms, and between macropterous and brachypterous adults for the same gender, respectively, by LSD test ($P < 0.05$). The same for Fig. 5.

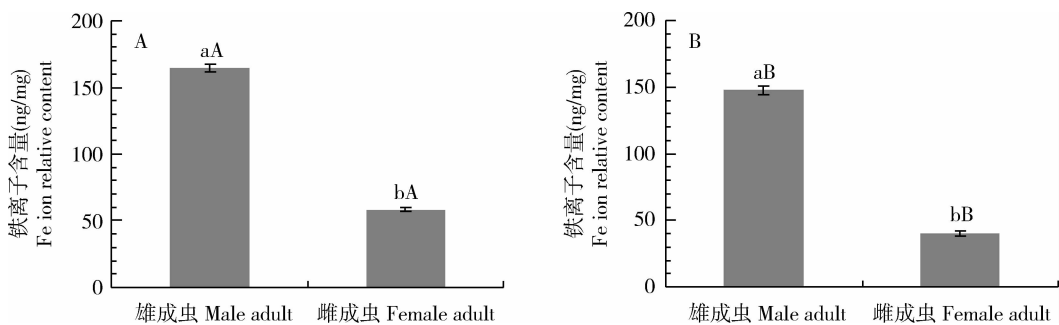


图 5 褐飞虱长翅型(A)和短翅型(B)雌雄成虫体内铁离子的相对含量

Fig. 5 The relative contents of Fe ions in macropterous (A) and brachypterous (B) female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

3 讨论

目前, 大量研究已经明确某些鸟类、两栖类动物(海龟)能够感知地磁场, 并可以利用地磁定向, 完成远距离的往返迁徙 (Etheredge *et al.*, 1999; Kirschvink *et al.*, 2001)。在昆虫飞行定向行为研究方面, 蜜蜂、蚂蚁、某些白天迁飞的蝶类(大斑蝶 *Danaus plexippus*, 黄沫粉蝶 *Aphrissa statira*)都有利用地磁定向的能力, Gould 等(1978)也发现蜜蜂的腹部有对磁敏感物质, 而且有规则地排列, 它能感知、分析磁力、磁角, 并能感知强度变化。但作为农业上的重大害虫稻飞虱的地磁定向机理研究还鲜见报道。本实验的结果说明, 褐飞虱体内确实存在磁性物质, 且该物质很可能就是内源性物质。结合生物医学方面的研究发现, 生物体内存在的磁性物质一般表现为蛋白包裹的铁氧化物或铁硫簇, 当铁氧化物或铁硫簇连接在氨基酸残基上形成铁蛋白或类似

的蛋白酶的形式时, 才能对生物的生理活动产生作用。本研究结果说明在稻飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫体内都有磁性物质存在, 这为下一步进行地磁定向机制的研究奠定了物质基础。

解春兰等(2011)的研究指出, 在褐飞虱腹部检测到磁性物质存在。本实验同样证实在褐飞虱长翅型和短翅型雌雄成虫的头胸部均未检测到磁性物质存在, 在其腹部都发现了磁性物质存在, 并通过石蜡超薄切片的普鲁士蓝染色和透射电镜观察证实了检测到的磁性物质为铁离子及其在腹部的点簇状分布。此外, 长翅型褐飞虱体内铁离子含量显著高于短翅型褐飞虱体内铁离子含量, 该结果与其以长翅型个体迁飞的生物学行为相一致。而对于同种翅型褐飞虱而言, 雄性成虫体内铁离子含量显著高于雌性成虫体内铁离子的含量。综上所述, 不同翅型和不同性别褐飞虱体内磁性物质含量差异是否与其迁飞行为及其迁飞定向的磁感知有关还有待进一步试验验证。褐飞虱长翅型成虫腹部磁性物质的定性、

定位与定量研究为其远距离迁飞过程中的地磁定向研究奠定了物质基础。如何将褐飞虱体内磁性物质和褐飞虱对地磁场的行为反应建立联系,进一步证明褐飞虱定向飞行行为与磁场变化相关,进而明确磁性物质在磁定向中的作用机制是我们下一步需要研究攻关的重点。在昆虫飞行能力测试装置的研究基础之上,我们自行设计制造了用于模拟可变磁场的多功能气室(专利授权号 ZL201310003381.4),并与昆虫飞行测试装置有机结合,为开展可变磁场条件下昆虫飞行行为学研究奠定了基础。此外,运用分子生态学方法对褐飞虱体内磁性物质进行结构组成与靶标受体等分析,对于明确褐飞虱体内磁性物质与其迁飞行为的关系也将发挥重要作用。

参考文献 (References)

- Banks AN, Srygley RB, 2003. Orientation by magnetic field in leaf-cutter ants *Atta colombica* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology*, 109(10): 835–846.
- Chapman J, Drake VA, Reynolds DR, 2011. Recent insights from radar studies of insect flight. *Annual Review of Entomology*, 56: 337–356.
- Cheng XN, Wang HK, 1996. Advances in the study of occurrence and control of rice planthopper in China. *Plant Protection Technology and Extension*, 16(4): 40–41. [程遐年, 王海扣, 1996. 我国稻飞虱研究与治理的进展. *植保技术与推广*, 16(4): 40–41]
- Etheredge JA, Perez SM, Taylor OR, Jander R, 1999. Monarch butterflies (*Danaus plexippus* L.) use a magnetic compass for navigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96(24): 13845–13846.
- Gao YB, Zhai BP, 2010. Progress in the mechanisms of insect orientation. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(6): 1055–1065. [高月波, 翟保平, 2010. 昆虫的定向机制研究进展. *昆虫知识*, 47(6): 1055–1065]
- Gould JL, Kirschvink JL, Deffeyes KS, 1978. Bees have magnetic remanence. *Science*, 201(4360): 1026–1028.
- Jiang H, Lin RH, Liu L, Qu WG, Tao CJ, 2005. Planthoppers damage to rice and the resurgence mechanism. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(6): 612–615. [姜辉, 林荣华, 刘亮, 瞿唯钢, 陶传江, 2005. 稻飞虱的危害及再猖獗机制. *昆虫知识*, 42(6): 612–615]
- Jiang XF, Luo LZ, 2008. Regulation basis and perspectives on insect migration. *Acta Ecologica Sinica*, 28(6): 2835–2842. [江幸福, 罗礼智, 2008. 昆虫迁飞的调控基础及展望. *生态学报*, 28(6): 2835–2842]
- Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE, 2001. Magnetite-based magnetoreception. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 11(4): 462–467.
- Oliveira EG, Srygley RB, Dudley R, 1998. Do neotropical migrant butterflies navigate using a solar compass? *Journal of Experimental Biology*, 201(24): 3317–3331.
- Otuka A, 2013. Migration of rice planthoppers and their vectored re-emerging and novel rice viruses in East Asia. *Frontiers in Microbiology*, 4: 1–11.
- Preiss R, Gewecke M, 1991. Compensation of visually simulated wind drift in the swarming flight of the desert locust (*Schistocerca gregaria*). *Journal of Experimental Biology*, 157(1): 461–481.
- Qu SX, Lü GY, Gao CZ, Wei XQ, Cui Y, Gao Y, 2009. Sample preparation methods of TEM using semi-thin paraffin sections. *Journal of Dalian Medical University*, 31(4): 356–360. [曲淑贤, 吕广艳, 高船舟, 魏晓晴, 崔颖, 高颖, 2009. 石蜡半薄切片制作透射电镜的方法. *大连医科大学学报*, 31(4): 356–360]
- Rössel S, Wehner R, 1986. Polarization vision in bees. *Nature*, 323: 128–131.
- Wehner R, 1984. Astronavigation in insects. *Ann. Rev. Entomol.*, 29(1): 277–298.
- Wu XF, Feng HQ, Xue FS, Wu KM, 2006. Orientation behaviors of insects in migratory process. *Plant Protection*, 32(5): 1–5. [吴先福, 封洪强, 薛芳森, 吴孔明, 2006. 昆虫迁飞过程中的定向行为. *植物保护*, 32(5): 1–5]
- Xie CL, Li ZY, Sui H, Pan WD, Chen FJ, 2011. Detection of magnetic materials in adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(10): 1189–1193. [解春兰, 李志毅, 隋贺, 潘卫东, 陈法军, 2011. 褐飞虱成虫体内磁性物质检测. *昆虫学报*, 54(10): 1189–1193]
- Zhai BP, 2005. What have we seen by entomological radar? *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(2): 217–226. [翟保平, 2005. 昆虫雷达让我们看到了什么? *昆虫知识*, 42(2): 217–226]
- Zhai BP, Cheng JA, 2006. Summary of two special emigrational insects in 2006. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(4): 585–588. [翟保平, 程家安, 2006. 2006年水稻两迁害虫研讨会纪要. *昆虫知识*, 43(4): 585–588]

(责任编辑: 袁德成)