



近零磁场对灰飞虱生长发育的影响^{*}

曾路影^{**} 唐庆伟 王玮彤 刘凡奇 万贵钧 陈法军^{***}

(南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095)

摘要 【目的】作为矢量场的地磁场 (Geomagnetic field, GMF) 不仅可为生物提供定向 (定位) 信息, 并可能影响生物的进化。磁场强度的变化对生物生理、代谢和行为等可产生影响, 本研究以迁飞性昆虫为模式生物, 探究 GMF 强度变化对其生长发育的影响, 进一步明确其对 GMF 强度变化的磁响应策略。

【方法】以水稻迁飞性害虫灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 为研究对象, 利用亥姆霍兹线圈模拟近乎抵消 GMF 强度的近零磁场 (Near-zero magnetic field, NZMF), 明确 GMF 强度缺失这一极端处理 (NZMF vs. GMF) 对灰飞虱生长发育的生物学效应。【结果】与 GMF 相比, NZMF 显著延长了若虫历期 (+8.23%) 及雄成虫寿命 (+35.60%) ($P < 0.05$), 显著缩短了雌成虫寿命 (-17.68%) 并显著降低了雌 (-15.82%) 雄 (-15.21%) 成虫体重 ($P < 0.05$), 但 NZMF 对灰飞虱卵的发育历期影响不显著。【结论】相对于 GMF 对照, NZMF 显著影响灰飞虱若虫和成虫的生长发育, 且对灰飞虱成虫寿命的磁生物学效应表现出雌雄二型现象。

关键词 灰飞虱; 近零磁场; 生长发育; 磁生物学效应

Effects of near-zero magnetic field on the growth and development of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus*

ZENG Lu-Ying^{**} TANG Qing-Wei WANG Wei-Tong LIU Fan-Qi WAN Gui-Jun CHEN Fa-Jun^{***}

(Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract 【Objectives】As a vector field, the geomagnetic field (GMF) can not only provide orientation (location) information for the creatures on Earth but also potentially affect their evolution. Studies showed that magnetic field intensity changes could result in bio-effects on organisms' physiology, metabolism, behavior, etc. It would help clarify these magnetic effects with insects as model organisms by exploring how the changes in GMF intensity affect their physiological development.

【Methods】In order to explore the magnetic response strategies of migratory insects to changes in the GMF intensity, we chose small brown planthopper, *Laodelphax striatellus*, which is a migratory pest on rice, as the study object and simulated the GMF intensity absence by creating the near-zero magnetic field with Helmholtz coils system, to clarify the bio-effects triggered by the extreme treatment of GMF intensity absence (NZMF versus GMF) on the growth, development and reproduction of *L. striatellus*. 【Results】Compared to the GMF control, NZMF significantly prolonged the nymphal duration (+8.23%) as well as longevity of male adults (+35.60%), while significantly shortened the longevity (-17.68%) of female adults and decreased the body weight of female (-15.82%) and male (-15.21%) adults. No significant effect on the egg duration of *L. striatellus* was found in this study. 【Conclusion】The NZMF (versus GMF) significantly affected the growth and development of *L. striatellus*, and induced a sexually dimorphic bio-effect on longevity of adult *L. striatellus*.

Key words *Laodelphax striatellus*; near-zero magnetic field; growth and development; magnetic bio-effects

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金面上项目 (32072413、31470454); 国家自然科学基金青年基金 (31701787); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20160717); 中央高校基本科研业务费 (KYZ201818、KJQN201820)

**第一作者 First author, E-mail: 2019102067@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: fajunchen@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-09-07; 接受日期 Accepted: 2020-12-01

地球上的生物时刻受到地球磁场的影响,自磁赤道向磁两极渐变的磁场强度梯度不仅为生物的远距离移动提供了定向与导航信息,也对生物的生长、发育和繁殖等产生磁生物学效应 (Able, 1991; Wiltshko and Wiltshk, 1995; Srygley *et al.*, 2006; Vidal-Gadea *et al.*, 2015)。目前,已有大量涉及磁生物学的相关研究。生物种类包括动物,如蝴蝶、蜚蠊、海龟、蜜蜂等 (Walker and Bitterman, 1989; Lohmann *et al.*, 2004; Johnsen and Lohmann, 2005; Srygley *et al.*, 2006; Vacha, 2006; Gegear *et al.*, 2010); 植物,如大豆、玉米、拟南芥等 (Galland and Pazur, 2005; Ahmad *et al.*, 2007; Flórez *et al.*, 2007; Radhakrishnan *et al.*, 2012); 微生物,如趋磁细菌、大肠杆菌等 (Kazumasa *et al.*, 2001; Ye *et al.*, 2003; Faivre *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2013)。近千年来地球磁场强度持续减弱,这势必对长期暴露其中的地球生物造成一定影响。针对近乎无地磁场强度——即近零磁场 (Near-zero magnetic field, NZMF) 的生物磁响应研究也逐渐增多。实验证实,如果长期处于近零磁场环境下,动物的中枢神经系统会产生障碍 (Bliss and Heppner, 1976; 王学斌等, 2003; Zhang *et al.*, 2004; Prato *et al.*, 2010; Mo *et al.*, 2015), 早期发育过程受到明显影响 (Fesenko *et al.*, 2010; Mo *et al.*, 2012); 而短期暴露于近零磁场环境也会影响人体健康 (Binhi *et al.*, 2009; Binhi and Sarimov, 2013)。因此,开展有关近零磁场下的磁生物学响应研究,有利于阐明地磁场强度变化对地球生物物的磁生物学效应。

近年来,以昆虫为研究对象的磁生物学效应的研究主要集中于中等强度磁场 (Moderate magnetic field, MMF; 1 mT-1 T) 对其生长发育和代谢生理的影响及机制 (Todorović *et al.*, 2012; Savic *et al.*, 2011; Polidori *et al.*, 2012); 而对于弱磁场 (Weak magnetic field, WMF; < 1 mT) 特别是地磁场 (Geomagnetic field, GMF) 和 NZMF 对昆虫的生理状态变化的影响研究比较少 (Zhang *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2014; 刘瑞莹等, 2018; 贺静澜等, 2019)。灰飞虱 *Laodelphax*

striatellus 是我国水稻生产上主要的害虫之一。近年来,灰飞虱及其传播的病毒病对我国长江中下游及华北稻区的水稻生产造成严重危害,对我国粮食产量和安全造成了重大威胁 (孙志广等, 2018)。灰飞虱寄主范围广泛,具有翅二型性 (即长翅型和短翅型),并具有趋光性和迁飞性。近年来,以稻飞虱为研究对象的基于磁场强度变化的磁生物学效应研究进一步突出了该类典型迁飞性昆虫在磁生物学研究领域的潜在优势 (肖晶晶等, 2013; 贺静澜等, 2019; 张明等, 2019)。研究发现在褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 体内有铁磁性物质的存在,且随着褐飞虱的生长发育,其体内的磁性物质也在增加,表明该铁磁性物质可能为褐飞虱体内的生物内源性物质 (解春兰等, 2011; 刘宇新, 2014; 颜学宾等, 2015; Pan *et al.*, 2016)。为更深入的探究稻飞虱对非生物因素地磁场强度变化的响应及其适应策略,本研究以灰飞虱为研究对象,通过人工模拟磁场强度变化 (NZMF vs. GMF), 探究 NZMF 对水稻重大迁飞性害虫灰飞虱生长发育的影响,研究结果将有助于揭示迁飞性昆虫的磁响应模式,并为进一步明确迁飞性昆虫迁飞调控的磁响应机制提供有效借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

本试验使用采集于江苏省农业科学院的灰飞虱虫源,于实验室内使用感虫水稻品种 TN1 继代饲养。将水稻以海绵为基质种植于中转箱 (长 × 宽 × 高 = 40 cm × 30 cm × 10 cm) 中的木村 B 水稻培养液内,选用两叶期稻苗 (株高 2-3 cm) 用于接种灰飞虱供其生长和产卵,间隔 3-4 日更换一次同发育期稻苗,更换稻苗时注意避开灰飞虱雌成虫产卵期。

1.2 近零磁场 (NZMF) 发生装置

正常的地磁场平均磁场强度通常在 ~50 μT (Maeda *et al.*, 2012)。在本研究中,我们使用可发生均匀磁场强度的直流电型亥姆霍兹线圈

以人工模拟近零磁场,使用这种方式产生的磁场为静态磁场。使用自主发明的近零磁场控制系统(专利号:ZL201320004497.5,图 1:A)。图 1(A)内以 a 点为球心的直径为 30 cm 的球形范围内是近零磁场的有效处理空间(磁场强度约等于 500 nT);图 1(B)为近零磁场运行的环境控制系统,控制温度为 $(26\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 80%,光周期 14 L:10 D。在整个实验过程中一直用磁通门计监测 NZMF 发生装置内的磁场强度,以保证实验过程中精准控制 NZMF 强度。

1.3 灰飞虱在近零磁场(NZMF)中的暴露实验

GMF 对照使用与 NZMF 发生相同的一组亥姆霍兹线圈,将直流电接入,但 GMF 的发生装置不改变 GMF 的方向和强度,以保证不让电流、装置等带来的潜在误差影响试验结果。本研究中对照组(GMF 组)和处理组(NZMF 组)放置在同一房间,以使温度和湿度等其他非生物因素不干扰 NZMF 对灰飞虱的影响。试验环境控制温湿度及光周期同 1.2。灰飞虱单头单管饲养在 GMF 和 NZMF 处理的磁场控制装置的有效处理空间(即 1.2 描述的有效处理空间)。所有未接灰飞虱的水稻每隔两天在近零磁场和地磁场之

间对调一次,以避免近零磁场通过影响水稻生理性状而间接对灰飞虱的生理行为造成影响。从 F_1 代初羽化的成虫开始进行磁场暴露试验,分别于近零磁场和地磁场环境下完成雄虫和雌虫的交配,完整的一代磁场暴露试验即为 F_1 代雌虫产卵至 F_2 代成虫羽化。

1.4 灰飞虱卵期的测定

把两头雄虫和一头初羽化雌虫放置在已经编号的玻璃试管(直径 $\times$ 高度=2 cm $\times$ 15 cm)中,让其进行交配产卵,饲养条件为温度 26 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 80%,光周期 14 L:10 D。用于配对的雌雄成虫均需要置于单独的玻璃试管中进行单头饲养。试虫配对 3 d 后,将其转移至已准备好的新的已编号的试管内,后面每隔 1 d 再转移至下一个已编号的试管中,记录每次转移日期,并将产卵的水稻苗保留于上一个试管中,试验一共需要转移 5 次试管,并在最后一次移除试虫,只保留水稻苗。每天观察记录每次转移试管时留下的水稻苗中孵化的若虫的时间和数量,直到达到需求的样本量。根据每个试管中用于配对的成虫的接入日期和其产卵孵化的若虫初孵日期计算该组雌虫所产的卵的发育历期,即卵期。近零磁场内虫卵样本量为 150 头,地磁场中虫卵样本量为 160 头。

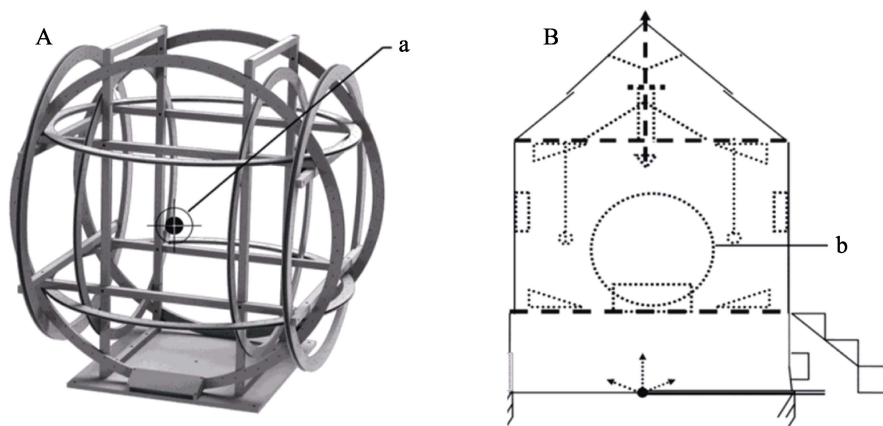


图 1 近零磁场(NZMF)及其环境控制系统(Wan et al., 2014)

Fig. 1 The NZMF and the environmental control system (Wan et al., 2014)

A. 用于 NZMF 发生的亥姆霍兹线圈; B. NZMF 运行的环境控制系统。

a: 近零磁场的有效处理空间; b: 亥姆霍兹线圈。

A. The Helmholtz coils used for to generate the NZMF; B. The environmental control system.

a: Effective processing space of NZMF; b: The Helmholtz coils.

1.5 灰飞虱若虫历期的测定

将 1.4 中的初孵化若虫进行编号,并单头单管饲养在已编号试管内,每天观察它们的生长和蜕皮情况,并将每次蜕皮时间记录下来,每进行一次蜕皮即增加一龄,每次观察后需要将刚蜕的皮剥出,以防止与下一次的蜕皮混淆。饲养若虫时,每隔 3 日添加木村 B 培养液到试管内,水稻培养液不要没过海绵,更不要沾到灰飞虱若虫,根据对稻苗取食的情况,定期对同一批水稻苗进行统一更换,直到若虫初羽化为成虫,记录每头若虫的雌雄性别,并根据每次记录日期对应的若虫龄期,计算若虫每个龄期所持续的时间。近零磁场下雌性若虫为 27 头,雄性若虫为 25 头,地磁场下雌性若虫为 29 头,雄性若虫为 26 头。

1.6 灰飞虱成虫寿命的测定

灰飞虱初羽化雌雄成虫单头单玻璃试管饲养并进行编号,每日观察其生长情况,直至个体死亡,并记录个体死亡日期。饲养过程中,每隔 3 日向玻璃试管内添加木村 B 培养液(添加方法同 1.5)。根据记录的成虫个体死亡日期计算出每个雌成虫和雄成虫的寿命长短。近零磁场下雌成虫为 50 头,雄成虫为 50 头,地磁场下雌成虫为 51 头,雄成虫为 52 头。

1.7 灰飞虱成虫体重的测定

供试灰飞虱若虫初羽化为成虫后,一部分用于成虫寿命测定(见 1.6),另一部分初羽化雌雄成虫进行称重处理,于称重前将其置于在 -20°C 环境下冻晕,之后使用十万分之一天平(电子天平型号: Mettler Toledo XP2U)将其称重,并根据编号记录每个雌雄虫从成虫的体重。近零磁场下雌成虫为 50 头,雄成虫为 50 头,地磁场下雌成虫为 51 头,雄成虫为 52 头。近零磁场和地磁场处理每组雌雄成虫均为 40 头。

1.8 数据处理与分析

使用 SPSS 20.0 对本研究中所有数据进行统

计分析。利用 Shapiro-Wilk test 检验数据的正态分布性,并使用 Levene's test 检测数据的方差齐性($P > 0.05$)。分别以磁场(近零磁场和地磁场)和性别(雌雄虫)作为两个处理因子,对灰飞虱雌雄成虫寿命和初羽化成虫体重进行双因素方差分析,并对卵期进行单因子方差分析。此外,进一步采用 LSD 检验进行处理间差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 NZMF 对灰飞虱卵期的影响

近零磁场和地磁场条件下,灰飞虱平均卵期分别是 9.02 d 和 9.05 d。且单因子方差分析表明地磁场强度变化对灰飞虱卵期的影响不显著($F = 1.077$, $P = 0.804 > 0.05$; 图 2)。

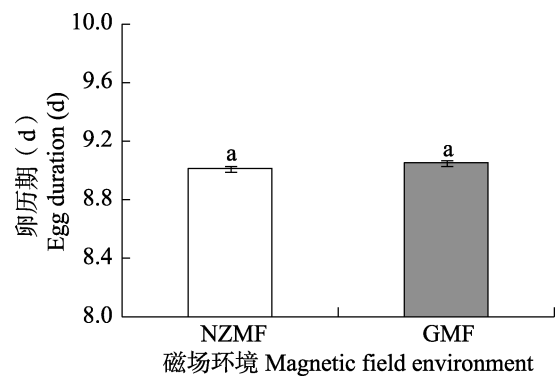


图 2 近零磁场和正常地磁场处理下灰飞虱卵期
Fig. 2 Egg duration of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* under NZMF and GMF

柱上标有相同小写字母表示 NZMF 和 GMF 处理之间经 LSD 检验差异不显著($P > 0.05$)。

Histograms with the same lowercase letters indicate no significant difference between NZMF and GMF by LSD test at $P > 0.05$.

2.2 NZMF 对灰飞虱若虫发育历期的影响

双因子方差分析表明,地磁场强度变化显著影响了灰飞虱若虫发育历期($F=6.125$, $P=0.015 < 0.05$, $df=1$),但雌雄个体间差异不显著($F=1.233$, $P=0.269 > 0.05$, $df=1$)。与 GMF 处理相比, NZMF 处理显著延长了雌若虫和雄若虫历期达 8.87% 和 7.72% ($P < 0.05$; 图 3)。

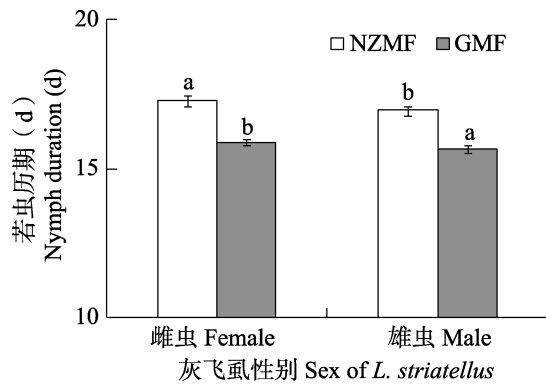


图 3 近零磁场和地磁场处理下灰飞虱雌性和雄性若虫历期

Fig. 3 The female (A) and male (B) nymphal duration of *Laodelphax striatellus* under NZMF and GMF

柱上标有不同小写字母表示 NZMF 和 GMF 处理之间雌性或雄性若虫历期经 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$)。

Histograms with the different lowercase letters indicate significant different between NZMF and GMF by LSD test at $P < 0.05$.

2.3 NZMF 对灰飞虱成虫寿命的影响

双因子方差分析表明, 性别对灰飞虱成虫寿命影响极显著 ($F = 14.992$, $P < 0.001$, $df = 1$), 地磁场强度变化和性别之间的交互作用也极显著影响了灰飞虱成虫寿命 ($F = 17.652$, $P < 0.001$, $df = 1$)。与 GMF 对照组相比, NZMF 显著缩短了雌成虫寿命, 并极显著延长了雄成虫寿命, 分别达 17.68% 和 35.60% ($P < 0.05$; 图 4), 表现了地磁场强度变化对灰飞虱成虫寿命影响的“雌雄二型性”。此外, 正常 GMF 处理下, 灰飞虱雌成虫寿命比雄成虫寿命显著延长达 63.37% ($P < 0.05$), 而 NZMF 处理下, 灰飞虱雌雄成虫寿命无显著差异 ($P > 0.05$ 图 4)。

2.4 NZMF 对灰飞虱初羽化成虫体重的影响

双因子方差分析表明, 地磁场强度变化极显著影响了灰飞虱初羽化成虫体重 ($F = 13.473$, $P < 0.001$, $df = 1$), 且雌雄成虫之间差异显著 ($F = 49.386$, $P < 0.001$, $df = 1$)。与 GMF 相比, NZMF 显著降低了灰飞虱初羽化雌雄成虫体重, 分别降低了 15.82% 和 15.21% ($P < 0.05$; 图 5)。此外, 在 GMF 和 NZMF 处理下, 灰飞虱初羽化雌成虫体重比初羽化雄成虫体重显著提高了 40.69% 和 34.64% ($P < 0.05$; 图 5)。

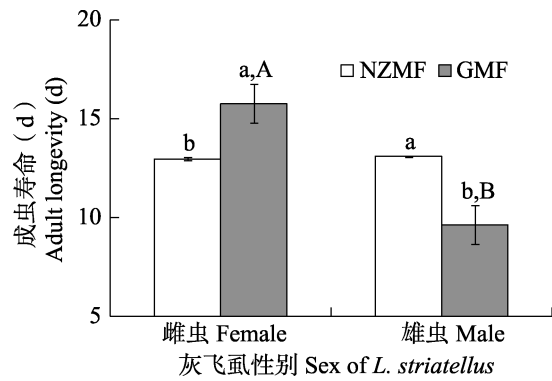


图 4 近零磁场和正常地磁场处理下灰飞虱雌雄成虫寿命

Fig. 4 The longevity of female and male adults of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* under NZMF and GMF

柱上标有不同小写字母表示经 LSD 检验, 同一性别在 NZMF 和 GMF 处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 柱上标有不同大写字母表示经 LSD 检验, 相同磁场处理下灰飞虱雌、雄成虫寿命之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Histograms with different lowercase and uppercase letters indicate significant difference between the treatments of NZMF and GMF for female or male adults, and between the females and male adults of *L. striatellus* under NZMF or GMF by LSD test at $P < 0.05$, respectively.

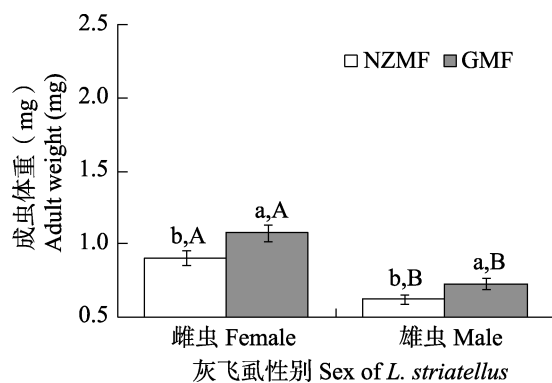


图 5 近零磁场和地磁场处理下灰飞虱初羽化成虫体重

Fig. 5 The body weight of newly emerged female and male adults of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* under near-zero magnetic field (NZMF) and geomagnetic field (GMF)

柱上标有不同大写字母表示经 LSD 检验相同磁场处理下灰飞虱雌、雄虫间差异显著; 柱上标有不同小写字母和不同大写字母分别表示同一性别处理组 NZMF 和对照组 GMF 之间, 以及相同磁场处理下灰飞虱雌雄成虫寿命之间经 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$)。

Histograms with different lowercase and uppercase letters indicate significant difference between the treatments of NZMF and GMF for female or male adults, and between the females and male adults of *L. striatellus* under NZMF or GMF by LSD test at $P < 0.05$, respectively.

3 讨论

目前,对昆虫磁生物学效应的研究主要通过人工模拟磁场环境来进行,研究的焦点主要集中于 MMF (1 m T-1 T),所研究的昆虫主要包括黄粉虫 *Tenebrio molitor*、冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae*、果蝇 *Drosophila melanogaster*、家蝇 *Musca domestica*、意大利蜜蜂 *Apis mellifera*、竹节虫 *Baculum extradentatum* 和烟芽夜蛾 *Heliothis virescens* 等 (Todorović *et al.*, 2012; Savic *et al.*, 2011; Polidori *et al.*, 2012)。研究表明,昆虫主要通过生物膜离子通道对 MMF 进行响应,从而发生表型变化 (Eckert, 1972; Rosen and Rosen, 1990)。与 GMF 相比,MMF 处理会加快昆虫的胚后发育 (Savic *et al.*, 2011)、增加昆虫的体重 (Raus *et al.*, 2009)。本研究结果表明,NZMF 对灰飞虱生长发育表型的影响与 MMF 对昆虫的生物学效应相反,即显著延长了灰飞虱若虫的发育历期,并显著降低其初羽化成虫体重,从而对灰飞虱的发育不利。已有研究报道发现,去除地磁场 (即 NZMF) 能很明显地干扰生物体生理发育,如减少胚胎发育中纤维细胞的增殖,并造成细胞凋亡的数量增加,及通过影响纺锤体的定向而作用于细胞分裂 (Fesenko *et al.*, 2010)。此外,亦有研究表明,NZMF 可延缓褐飞虱的卵和若虫发育历期,同时降低初羽化雌雄成虫的体重以及雌成虫的生殖能力 (Wan *et al.*, 2014); 与 GMF 相比,NZMF 使白背飞虱 *Sogatella furcifera* 若虫历期延长,并显著缩短了长翅型未交配成虫的寿命 (Wan *et al.*, 2015), 与本研究结果一致。

另一方面,有报道称 NZMF 可以改变鼠类和鸟类的昼夜节律 (Bliss and Heppner, 1976; Zamoshchina *et al.*, 2012), 而隐花色素 (Cry) 在动物的生物钟调控方面发挥重要作用,其中动物体内的 II 型隐花色素 (Cry2) 在昼夜节律调节过程中作为反馈回路抑制子 (Zhu *et al.*, 2005)。许多研究表明生物钟可与神经内分泌系统协同作用,二者可能间接调控昆虫体内激素稳态,如蜕皮激素、保幼激素的分泌等 (Henrich *et al.*, 1998; Sandrelli *et al.*, 2008; Yamanaka *et al.*,

2013)。蜕皮激素和保幼激素共同调控昆虫的发育,这两种激素受神经肽和环境信号的调节。本试验以灰飞虱作为研究对象,在磁场强度变化下 (NZMF vs. GMF),对灰飞虱卵期、若虫发育历期、成虫寿命及初羽化成虫体重展开研究。结果显示,与 GMF 相比,NZMF 显著延长若虫发育历期,结合已有的研究分析,NZMF 可能通过隐花色素影响保幼激素和蜕皮激素的滴度变化,导致蜕皮激素分泌减少从而延长若虫的持续时间。同时本试验结果表明 NZMF 显著缩短雌虫寿命,并且显著降低雌雄成虫体重,这与 Wan 等 (2014, 2015) 对褐飞虱和白背飞虱的研究结果相似。而 NZMF 处理显著延长了初羽化雄成虫的寿命,缩短雌虫寿命,对灰飞虱成虫寿命的影响表现出雌雄二型现象,一项针对白背飞虱在 NZMF 影响下飞行能力变化的研究也证明,NZMF 对白背飞虱飞行能力的磁场效应具有“性二型性” (万贵钧等, 2016), 这可能是稻飞虱体内某些通路具有性别特异性。

综上所述,本试验通过人工模拟磁场强度变化 (NZMF vs. GMF),以灰飞虱作为研究对象,对近零磁场下其卵期、若虫历期以及雌雄成虫寿命和体重进行研究。结果表明,近零磁场对灰飞虱若虫历期影响显著,显著降低了初羽化雌雄成虫的体重,且对雌雄成虫的寿命表现出雌雄二型现象,但对卵期发育影响不显著。昆虫的发育由蜕皮激素和保幼激素共同调控,而这两种激素的产生又受神经系统的调节,因而,我们推测近零磁场可能是通过调控神经系统从而影响激素信号转导途径,进而实现对灰飞虱生长发育的影响。

参考文献 (References)

- Able KP, 1991. Common themes and variations in animal orientation systems. *American Zoologist*, 31(1): 157–167.
- Ahmad M, Galland P, Ritz T, Wiltshko R, Wiltshko W, 2007. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *arabidopsis thaliana*. *Planta*, 225(3): 615–624.
- Binhi VN, Sarimov RM, 2009. Zero magnetic field effect observed in human cognitive processes. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 28(3): 310–315.
- Binhi VN, Sarimov RM, 2013. Effect of the hypomagnetic field on

- the size of the eye pupil. *Biological Physics*, <https://arxiv.org/abs/1302.2741>.
- Bliss VL, Heppner FH, 1976. Circadian activity rhythm influenced by near zero magnetic field. *Nature*, 261(5559): 411–412.
- Eckert R, 1972. Bioelectric control of ciliary activity. *Science*, 176(4034): 473–481.
- Faivre D, Fischer A, Garcia-Rubio Inés, Mastrogiacomio G, Gehring AU, 2010. Development of cellular magnetic dipoles in magnetotactic bacteria. *Biophysical Journal*, 99(4): 1268–1273.
- Fesenko EE, Mezhevnikina LM, Osipenko MA, Gordon RY, Khutuzian SS, 2010. Effect of the "zero" magnetic field on early embryogenesis in mice. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 29(1/2): 1–8.
- Flórez M, Carbonell MV, Martínez E, 2007. Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany*, 59(1): 68–75.
- Galland P, Pazur A, 2005. Magnetoreception in plants. *Journal of Plant Research*, 118(6): 371–389.
- Gegeer RJ, Foley LE, Casselman A, Reppert SM, 2010. Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism. *Nature*, 463(7282): 804–807.
- He JL, Zhang M, Liu RY, Wan GJ, Pan WD, Chen FJ, 2019. Effects of the interference of key magnetic response genes on the longevity of brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) under near-zero magnetic field. *Scientia Agricultura Sinica*, 52(1): 45–55. [贺静澜, 张明, 刘瑞莹, 万贵钧, 潘卫东, 陈法军, 2019. 近零磁场下干扰磁响应关键基因对褐飞虱寿命的影响. 中国农业科学, 52(1): 45–55.]
- Henrich VC, Rybczynski R, Gilbert LI, 1998. Peptide hormones, steroid hormones, and puffs: Mechanisms and models in insect development. *Vitamins and Hormones*, 55: 73–125.
- Jie 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.]
- Johnsen S, Lohmann KJ, 2005. The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9): 703–712.
- Kazumasa O, Ryo F, Takashi A, 2001. Disappearance of growth advantage in stationary phase phenomenon under a high magnetic field. *Bioelectrochemistry*, 53(2): 165–169.
- Liu RY, Xiao ZJ, He JL, Wan GJ, Pan WD, Chen FJ, 2018. Population fitness of the migratory brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae) in response to the change of geomagnetic field intensity. *Acta Entomologica Sinica*, 61(8): 957–967. [刘瑞莹, 肖子衿, 贺静澜, 万贵钧, 潘卫东, 陈法军, 2018. 迁飞性害虫褐飞虱对地磁强度变化的种群适合度响应. 昆虫学报, 61(8): 957–967.]
- Liu YX, 2014. Detection and identification of magnetic materials in *Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera* and *Laodelphax striatellus*. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [刘宇新, 2014. 稻飞虱体内磁性物质的定性与定量检测及其鉴定研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Lohmann KJ, Lohmann CMF, Ehrhart LM, Bagley DA, Swing T, 2004. Animal behaviour: Geomagnetic map used in sea-turtle navigation. *Nature*, 428(6986): 909.
- Maeda K, Robinson AJ, Henbest KB, Hogben HJ, Biskup J, Ahmad M, Schleicher E, Weber S, Timmel CR, Hore PJ, 2012. Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(13): 4774–4779.
- Mo WC, Fu JP, Ding HM, Liu Y, Qian H, 2015. Hypomagnetic field alters circadian rhythm and increases algesia in adult male mice. *Prog. Biochem. Biophys.*, 42(7): 639–646.
- Mo WC, Liu Y, Cooper HM, He RQ, 2012. Altered development of *Xenopus* embryos in a hypogeomagnetic field. *Bioelectromagnetics*, 33(3): 238–246.
- Pan WD, Wan GJ, Xu JJ, Li XM, Liu YX, Qi LP, Chen FJ, 2016. Evidence for the presence of biogenic magnetic particles in the nocturnal migratory brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Scientific Reports*, 6: 18771.
- Polidori E, Zeppa S, Potenza L, Martinelli C, Colombo E, Casadei L, 2012. Gene expression profile in cultured human umbilical vein endothelial cells exposed to a 300 mT static magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 33(1): 65–74.
- Prato FS, Robertson JA, Desjardins D, Hensel J, Thomas AW, 2010. Daily repeated magnetic field shielding induces analgesia in CD-1 mice. *Bioelectromagnetics*, 26(2): 109–117.
- Radhakrishnan R, Leelapriya T, Mari BD, 2012. Effects of pulsed magnetic field treatment of soybean seeds on calli growth, cell damage, and biochemical changes under salt stress. *Bioelectromagnetics*, 33(8): 670–681.
- Raus S, Todorovic D, Prolic Z, 2009. Viability of old house borer (*Hylotrupes bajulus*) larvae exposed to a constant magnetic field of 98 mT under laboratory conditions. *Archives of Biological Sciences*, 61(1): 129–134.
- Rosen MS, Rosen AD, 1990. Magnetic field influence on paramecium motility. *Life Sciences*, 46(21): 1509–1515.
- Sandrelli F, Costa R, Kyraou CP, Rosato E, 2008. Comparative analysis of circadian clock genes in insects. *Insect Molecular Biology*, 17(5): 447–463.
- Savic T, Janac B, Todorovic D, Prolic Z, 2011. The embryonic and post-embryonic development in two *Drosophila* species exposed

- to the static magnetic field of 60 mT. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 30(2): 108–114.
- Srygley RB, Dudley R, Oliveira EG, Riveros AJ, 2006. Experimental evidence for a magnetic sense in neotropical migrating butterflies (Lepidoptera: Pieridae). *Animal Behaviour*, 71(1): 183–191.
- Sun ZG, Wang BX, Chen TM, Xu B, Xing YG, Dai HM, Xu DY, 2018. Advances in rice resistance to small brown planthopper. *Journal of Northern Agriculture*, 46(5): 107–112. [孙志广, 王宝祥, 陈庭木, 徐波, 邢运高, 代慧敏, 徐大勇, 2018. 水稻灰飞虱的研究进展. 北方农业学报, 46(5): 107–112.]
- Todorović D, Mircić D, Ilijin L, Mrdaković M, Vlahović M, Prolić Z, 2012. Effect of magnetic fields on antioxidative defense and fitness-related traits of *Baculum extrudentum* (Insecta, Phasmatodea). *Bioelectromagnetics*, 33(3): 265–273.
- Vacha M, 2006. Laboratory behavioural assay of insect magnetoreception: Magnetosensitivity of *Periplaneta americana*. *The Journal of Experimental Biology*, 209 (19): 3882–3886.
- Vidal-Gadea A, Ward K, Beron C, Ghorashian N, Gokce S, Russell J, Truong N, Parikh A, Gadea O, Ben-Yakar A, Pierce-Shimomura J, 2015. Magnetosensitive neurons mediate geomagnetic orientation in *Caenorhabditis elegans*. *Elife*, 4: e07493.
- Walker MM, Bitterman ME, 1989. Honeybees can be trained to respond to very small changes in geomagnetic-field intensity. *Journal of Experimental Biology*, 145: 489–494.
- Wan GJ, Jiang SL, Zhao ZC, Xu JJ, Tao XR, Sword GA, 2014. Bio-effects of near-zero magnetic fields on the growth, development and reproduction of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* and brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Journal of Insect Physiology*, 68: 7–15.
- Wan GJ, Pan WD, Chen FJ, 2016. The molecular mechanism of the influence of near-zero magnetic field on the phototaxis and flight ability phenotype of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera*. Plant Protection Technology Innovation and Agricultural Precision Poverty Alleviation-Chinese Plant Protection Society 2016 Academic Annual Conference Proceedings. 2016. 397. [万贵钧, 潘卫东, 陈法军, 2016. 近零磁场对白背飞虱趋光与飞行能力表型影响的分子机理探究. 植保科技创新与农业精准扶贫——中国植物保护学会 2016 年学术年会论文集. 2016. 397.]
- Wan GJ, Wang WJ, Xu JJ, Tao XR, Sword GA, Gao YB, Pan WD, Chen FJ, 2015. Cryptochromes and hormone signal transduction under near-zero magnetic fields: New clues to magnetic field effects in a rice planthopper. *PLoS ONE*, 10 (7): e0132966.
- Wang XB, Xu ML, Li B, Li DF, Jiang JC, 2003. One-day-old chicks hatched in submagnetic space have impaired taste avoidance and long-term memory. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2042–2045. [王学斌, 徐慕玲, 李兵, 李东风, 蒋锦昌, 2003. 亚磁空间中孵化的一日龄小鸡味觉回避长时记忆受损. 科学通报, 48(19): 2042–2045.]
- Wiltschko R, Wiltschko W, 1995. Magnetic Orientation in Animals. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 33–41.
- Xiao JJ, Jin ZF, Xu HX, Li RZ, 2013. Overview of long-distance migration of rice planthopper. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(18): 147–152. [肖晶晶, 金志凤, 徐红星, 李仁忠, 2013. 水稻飞虱迁飞的研究进展. 中国农学通报, 29(18): 147–152.]
- Xu C, Wei S, Lu Y, Zhang Y, Chen C, Song T, 2013. Removal of the local geomagnetic field affects reproductive growth in *Arabidopsis*. *Bioelectromagnetics*, 34(6): 437–442.
- Yamanaka N, Rewitz K F, O'Connor MB, 2013. Ecdysone control of developmental transitions: Lessons from *Drosophila* research. *Annual Review of Entomology*, 58: 497–516.
- Yan XB, Liu YX, Yao LY, Wang WX, Pan WD, Chen FJ, 2015. Localization and quantitative detection of magnetic materials in the macropterous and brachypterous female and male adults of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(2): 132–138. [颜学宾, 刘宇新, 姚亮宇, 王文肖, 潘卫东, 陈法军, 2015. 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. 昆虫学报, 58(2): 132–138.]
- Ye SY, He W, He MS, He QQ, Yang L, 2003. Preliminary study on technology of magnetic field non-thermal sterilization. *Transaction of Chinese Agricultural Engineering*, 19(5): 156–160.
- Zamoshchina TA, Krivova NA, Khodanovich M, Trukhanov KA, Tukhvatulin RT, Zaeva OB, Zelenskaia AE, Gul EV, 2012. Influence of simulated hypomagnetic environment in a far space flight on the rhythmic structure of rat's behavior. *Aviakosm. Ekolog. Med.*, 46(1): 17–23.
- Zhang B, Lu H, Xi W, Zhou X, Guo A, 2004. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster*. *Neuroscience Letters*, 371(2/3): 190–195.
- Zhang M, Liu RY, He JL, Yuan R, Wan GJ, Pan WD, Chen FJ, 2019. Wing-form differentiation, phototaxis and flight performance of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae) under near-zero magnetic fields. *Acta Entomologica Sinica*, 62(1): 82–90. [张明, 刘瑞莹, 贺静澜, 袁锐, 万贵钧, 潘卫东, 陈法军, 2019. 近零磁场对褐飞虱翅型分化、趋光性及飞行能力的影响. 昆虫学报, 62(1): 82–90.]
- Zhang YH, Jiang RX, Wu HS, Liu, Xie J, He Y, 2012. Next-generation sequencing-based transcriptome analysis of *Cryptolaemus montrouzieri* under insecticide stress reveals resistance-relevant genes in ladybirds. *Genomics*, 100(1): 35–41.
- Zhu H, Yuan Q, Briscoe AD, Froy O, Reppert SM, 2005. The two CRYs of the butterfly. *Current Biology*, 15(23): R953–R954.