

邹鑫平,王晓丽,端正花,等.工频电磁环境对果蝇发育和节律行为的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6149-6155.

Zou X P, Wang X L, Duan Z H, et al. Effects of power frequency electromagnetic environment on development and rhythmic behavior of *Drosophila melanogaster* [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):6149-6155.

工频电磁环境对果蝇发育和节律行为的影响研究

邹鑫平¹,王晓丽¹,端正花¹,张紫燕^{2,3},孙永彦^{1,3*} (1.天津理工大学环境科学与安全工程学院,天津 300384; 2.中国科学院城市环境研究所,福建 厦门 361021; 3.中国科学院上海营养与健康研究所,上海 200031)

摘要: 比较了 PF-EMF 暴露下 W1118 野生型和 *Rye* 突变型果蝇发育、睡眠和运动节律行为的差异.连续暴露处理 3d 后去除亲本果蝇,记录子代发育过程并监测运动和睡眠节律行为.结果表明,PF-EMF 暴露后 W1118 型成蛹量、成蝇量分别显著提高 56.2%和 57.5%,*Rye* 型果蝇成蛹量无显著差异,成蝇量显著增加 85.2%,子代雌雄比例未显著变化.从行为数据看,两株系果蝇暴露后运动和睡眠节律相位未见显著差异,W1118 型表现为 24h 平均运动次数增加 37.3%,24h 睡眠片段次数减少 10.6%,*Rye* 型 24h 平均运动次数显著增加 50.0%,24h 睡眠片段次数减少 51.5%,总睡眠时长显著降低 45.7%.和 W1118 型相比,*Rye* 型果蝇发育、运动、睡眠情况改变更显著,提示 *Rye* 型果蝇电磁暴露更为敏感.总之 PF-EMF 环境对昆虫发育和节律行为均可带来影响,造成后代数量上升、显著活跃果蝇运动行为并引起睡眠障碍.本研究为进一步了解电磁暴露对昆虫类生物的影响,合理评估 PF-EMF 的生态效应提供依据.

关键词: 工频电磁场; 黑腹果蝇; 节律行为; 发育

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)11-6149-07

Effects of power frequency electromagnetic environment on development and rhythmic behavior of *Drosophila melanogaster*.

ZOU Xin-ping¹, WANG Xiao-li¹, DUAN Zheng-hua¹, ZHANG Zi-yan^{2,3}, SUN Yong-yan^{1,3*} (1.School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2.Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3.Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China). *China Environmental Science*, 2023,43(11): 6149~6155

Abstract: Differences in development, sleep and movement rhythmic behaviors between W1118 wild-type flies and *Rye* mutants were investigated under PF-EMF exposure. After continuous exposure for 3 days, the parental flies were removed. Developmental process, movement and sleep rhythmic behaviors of offspring were monitored. The results showed that, the pupal and fly population of W1118 significantly increased respectively by 56.2% and 57.5% under PF-EMF exposure. No significant changes were observed in pupal numbers of *Rye* type flies, but the fly population significantly increased by 85.2%. No significant change of sex ratio was found under PF-EMF exposure. For W1118 flies, the average number of 24-hour movements was increased by 37.3% after PF-EMF exposure, and 10.6% decrease in the number of 24-hour sleep segments was calculated. For *Rye* type flies, the average counts of 24-hour movement significantly increased by 50.0 % after exposure, and 51.5% decrease of 24-hour sleep segment counts was investigated. In the meanwhile, 45.7% decrease of the total sleep duration were also found. Compared with the W1118 type, the *Rye* mutants showed more significant changes, which suggested that *Rye* mutants were more sensitive to PF-EMF exposure. In brief, the PF-EMF environment can impact development and rhythmic behaviors of insects. Increased fly offspring numbers movement counts, and disturbed sleep were found after PF-EMF exposure. Further understandings on the entomological effects of PF-EMF exposure, and reasonable evaluations on the ecological effects of PF-EMF can be provided in this study.

Key words: PF-EMF; *Drosophila melanogaster*; behavioral rhythms; development

工频电磁场(Power frequency electromagnetic field,PF-EMF)指电力传输线路、设施产生的频率在 50Hz 的电磁场.随着我国用电量激增,大规模户外输变电工程产生的人造电磁场改变了电磁环境背景^[1],对动植物乃至生态系统产生影响.例如一些农业活动中关注的昆虫类动物如蜜蜂、蚜虫等,已有报道显示其对电磁环境敏感,一些电磁技术在害虫防治方

面得到了应用^[2].英国研究人员的一项 Meta 分析显示,WiFi、移动通信网络和电线构成的全球通讯系统所产生的电磁辐射可能会扰乱鸟类和昆虫的方向

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 自然资源部海洋生物遗传资源重点实验室开放课题项目 (HY202106);国家自然科学基金资助项目(32201017)

* 责任作者, 讲师, yongyansun@email.tjut.edu.cn

感和运动,并影响其代谢活动^[3].同时也有部分研究者认为 PF-EMF 暴露不会对昆虫的生活史产生显著影响^[4].鉴于电气化时代背景下 PF-EMF 环境农业生态效应评估仍不充分^[5],为应对该形势,本研究拟利用模式生物黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*,以下简称“果蝇”)来分析 PF-EMF 对昆虫类生物发育和节律行为的影响.已有报道显示昆虫作为数量庞大的生物类群对各种电磁环境变化和胁迫敏感.例如将粘虫放置于亥姆赫兹线圈产生的强磁场中时,粘虫群体共同定向行为消失^[6].关于电磁场对果蝇的影响迄今研究并不广泛深入.我们前期探索发现 PF-EMF 联合高温胁迫环境下果蝇体内热激蛋白表达水平发生响应,PF-EMF 暴露可提高果蝇对温度的耐受能力,缓解高温环境对果蝇的损伤效应^[7].对于电气化背景下输变电工程带来的 PF-EMF 电磁场的昆虫生物学效应目前来讲还未有明确定论.本文以果蝇为研究对象来探究 PF-EMF 的生物效应具有创新性.一是果蝇具备昆虫类生物的明显特征,具有繁殖快、后代数目多、发育过程性状明显等优点;二是果蝇的节律行为具有代表性,其运动和睡眠节律等行为指标可在实验室条件下进行检测,并且参与果蝇睡眠调控的生物钟基因十分保守,与哺乳动物有同源相似性,可作为开展节律行为研究的常用模型^[8].本实验利用野生型 W1118 和突变体模型果蝇 *Rye* 来研究 PF-EMF 暴露对昆虫发育、睡眠和运动节律行为的影响,*Rye* 基因又名 red eye 基因,编码烟碱乙酰胆碱受体 $\alpha 4$ (nAChR $\alpha 4$)复合物的四通道跨膜通道蛋白.已知当 *Rye* 突变后,四通道跨膜通道蛋白功能异常造成果蝇睡眠减少、睡眠碎片化^[9].本实验可为明确 PF-EMF 的昆虫生物学效应,明确和制定合理的 PF-EMF 暴露生态健康风险防控规范提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 果蝇培养

野生型黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*) W1118 品系和 *Rye* 突变型黑腹果蝇 12414R3 品系,购自中国科学院上海生命科学研究院生化细胞所果蝇资源与技术平台.以玉米粉-蔗糖-酵母为基本培养基,培养于光照周期 12L:12D(06:00 开灯,18:00 关灯),温度(25±1)℃,相对湿度(60±1)%的人工气候箱中.

1.2 工频电磁场暴露舱

PF-EMF 实验暴露舱如图 1 所示,主要利用交流变频电源、低温恒温循环器和亥姆霍兹线圈来营造一个稳定可控的极低频电磁场.亥姆霍兹线圈平放在支架上,通过电线与能够稳定调控输出电压和频率的交流变频电源相连,接通电源后,可在两线圈中间形成一个稳定的磁场.为了实现对实验的温湿度、光照等环境的控制,两个亥姆霍兹线圈放于生化培养箱中.其能够实现频率 40~499.9Hz;磁场强度:0.01~10mT 范围内的模拟.此次实验的暴露条件为:频率 50Hz、磁场强度 6mT.

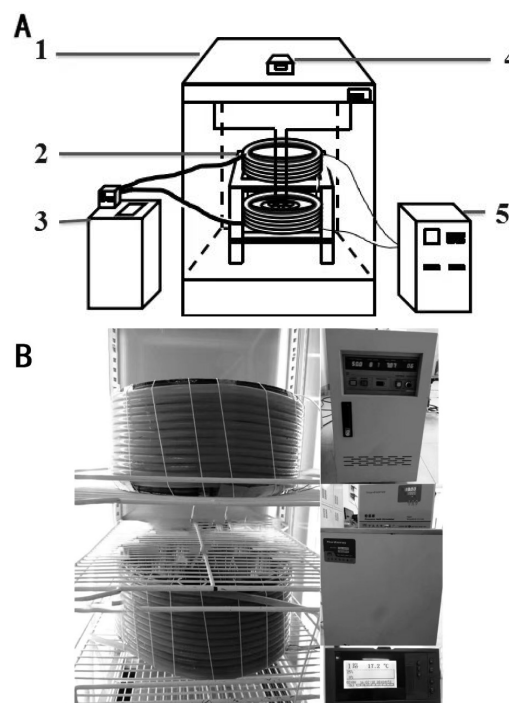


图 1 PF-EMF 实验暴露舱

Fig.1 PF-EMF experimental exposure chamber

A:示意图:1.生化培养箱 2.亥姆霍兹线圈 3. 冷凝循环器 4. 温度记录仪
5. 变频电源;B:实物图

1.3 PF-EMF 对果蝇子代的影响实验

实验在黑暗条件下进行,共设置 4 组,分别为对照-W1118 组、PF-EMF-W1118 组、对照-*Rye* 组和 PF-EMF-*Rye* 组.收集 48h 内羽化的果蝇,接种 10 对果蝇于新鲜培养基中,每组 10 管,暴露组培养于发射磁场的线圈中,对照组培养于磁场强度为 0 的人工培养箱中,连续暴露三日后去除亲本,然后将带有卵的果蝇管继续暴露,直至最后一只子代果蝇羽化出来停止实验,实验重复三次.期间统计各果蝇管中的

成蛹数、成蝇数前三天成蛹率以及雌雄比,绘制成蛹进程曲线,具体统计方法如下:

成蛹(蝇)数:统计每管中一个生活史周期内所出现的蛹或(羽化的果蝇)的数量.

前三天成蛹率:从第一个蛹出现开始计为第一天,统计前三天成蛹数量占总成蛹量比值.

雌雄比:每管中雌果蝇与雄果蝇的数量比.

1.4 PF-EMF 对果蝇节律行为的影响实验

本实验选用 DAM2 行为监测器(*Drosophila Activity Monitor*,美国 TriKinetics 公司)用于记录果蝇运动和睡眠节律,DAM2 能够一次性测量 32 只果蝇样本的运动行为,每只果蝇单独放在该系统配套玻璃管中,当果蝇穿过试管中点时就切割一次红外光束,信号自动传感计数一次,被视为果蝇运动一次.按照 1.3 所述实验条件和分组,收集 48h 内羽化的雄蝇将其装进监测管中并每五分钟记录一次数据.果蝇装进玻璃检测管中适应至少 24h 后再开展实验,实验持续处理 3d,重复 3 次.统计分析各组果蝇的运动和睡眠情况,计算指标如下:

(1)平均运动次数:统计每只果蝇的总运动次数后计算所有果蝇的总运动次数的平均值,分析白天、夜晚和 24h(整天)三个指标.白天总运动次数为从上午 06:00~18:00 时间段内总运动次数的平均值;夜晚平均运动次数表示从上午 18:00 至第二天 06:00 时段;24h 总运动次数为从下午 18:00 至第二天 18:00 全天所有果蝇总运动次数的平均值.

(2)单位时间运动量:果蝇清醒状态每分钟的平均运动次数即为单位时间运动量.由白天、夜晚或 24h 每一时间段范围内的总运动次数除以对应时间段的总运动时间.计算公式为:单位时间运动量=每个时间段的总运动次数/(每个时间段总时长-每个时间段的总睡眠时间).

(3)睡眠总时间:在监测过程中,果蝇连续 5min 没有穿越监测玻璃管中间位置,运动次数计为 0,视为果蝇处于睡眠状态状态^[10],统计果蝇白天、夜晚和 24h 的总睡眠时长.

(4)睡眠片段:果蝇在各时间段睡眠片段次数.分别出统计果蝇在白天、夜晚和 24h 内的睡眠次数.

2 结果与分析

2.1 PF-EMF 对果蝇子代发育数量的影响

由实验结果图 2A 可知,PF-EMF 暴露后 W1118 型成蛹量、成蝇量分别显著提高 56.2%和 57.5%($P < 0.05$),*Rye* 型果蝇成蛹量虽无显著差异但呈现增加趋势,成蝇量显著增加 85.2%($P < 0.01$),表明 PF-EMF 暴露可引起果蝇后代数量增加,无论是野生型还是突变型果蝇,均对其生殖有促进作用.细胞水平研究显示工频电磁场可促进细胞增殖和分裂,比如多次照射 PF-EMF 后可对正常淋巴细胞和肝细胞的增殖产生刺激作用^[11].除交变 PF-EMF 外,一些学者认为中等强度的静态磁场(1mT~1T)能加快昆虫胚后发育,增加昆虫体重^[12],这些证据提示 PF-EMF 电磁场可能对昆虫繁殖具有相同的效应.从机理层面分析,一些研究提示 PF-EMF 促进繁殖可能与细胞间隙连接有关.间隙连接是细胞通讯的一种方式,在代谢偶联、神经冲动信息传递、早期胚胎发育和细胞分化过程中具有重要作用.姜槐等^[13]发现工频磁场对间隙连接具有抑制或协同抑制作用,而间隙连接异常往往引起细胞间物质交换障碍,进而引发细胞分裂增殖异常.PF-EMF 可能通过改变果蝇细胞间隙连接通讯促进了细胞分裂,最终导致子代数目的增加.由实验结果图 2B 可知,野生型和突变型两种果蝇在 PF-EMF 暴露处理后子代性别比均未发生显著差改变(图 2B, $P > 0.05$),表明 PF-EMF 暴露处理不会造成果蝇后代性别偏离,只引起数量增加,提示 PF-EMF 可能不是影响果蝇繁殖过程中性别比例的关键因子.一些流行病学资料也证实极低频电磁场波段范围辐射因其强度偏低,可能对子代出生性别比例影响很小.如 Saadat 等^[14]发现 51 名高压架线工经 PF-EMF 暴露后也未造成其后代发生显著性别偏离,但值得注意的是这些试验虽无统计学差异,但子代中雄性比例有下降的趋势,本研究中野生型果蝇也出现类似趋势.结合下文中 PF-EMF 暴露引发了果蝇运动水平提高(图 4A),分析果蝇后代数量增加的原因可能还与 PF-EMF 提高了运动次数进而增大了果蝇交配行为发生可能性相关,从而提高了繁殖成功率,但未显著影响后代性别比例.例如已有研究发现 PF-EMF 可引发蝗虫变得活跃,飞行增加,进而增大其成功产卵概率,从而提高繁殖数量^[15],本实验研究也得出了类似的结论,这些结果启示我们应当关注 PF-EMF 对昆虫生殖过程的影响,对 PF-EMF 环境暴露的生态阈值进一步加以管理,比如要进一步

通过实验研究明确 PF-EMF 是否会造成昆虫的性别比例发生变化,且这种变化是否可能通过世代累积效应显现,后续应当讨论和关注.

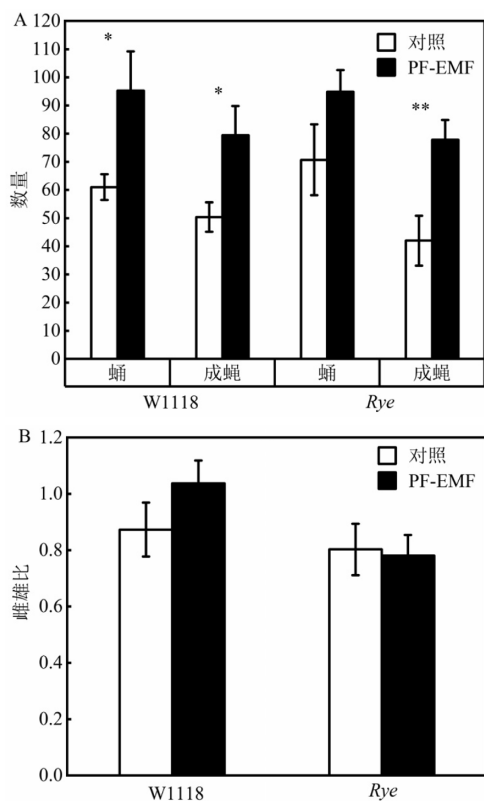


图2 PF-EMF 暴露对果蝇子代数数量的影响

Fig.2 Effect of PF-EMF exposure on the number of *D. melanogaster* sub-generations

A:成蛹量、成蝇量;B:雌雄比

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$,下同

2.2 PF-EMF 暴露对果蝇成蛹进程的影响

由图 3A 来看,PF-EMF 暴露处理后,W1118 果蝇前 3d 成蛹率显著降低($P < 0.01$),进一步结合成蛹时间曲线分析可以发现(图 3B),前 3d 的成蛹量未受 PF-EMF 处理影响,从第 11d 开始,暴露组成蛹量显著高于对照组,PF-EMF 处理导致后代蛹量显著增加,因此计算出的前三天成蛹率数值暴露组显著低于对照组.分析原因可能是 PF-EMF 的时间累积效应.随着暴露时间的延长,W1118 果蝇表现出的响应更明显.PF-EMF 的时间累积效应这一结论也有其他生物证据支持.例如范纯武等^[16]采用 50Hz, 1.5mT 工频磁场环境暴露健康人外周血细胞,培养 24~96h 后发现试验组淋巴细胞转化率随磁场作用时间的延长而递增,反映 50Hz 工频磁场能对淋巴细胞产生损伤性生

物效应,且这种效应随辐射时间的延长而加剧.已知 PF-EMF 暴露处理后昆虫胚后发育加快,细胞增殖和分裂能力异常活跃,在本实验中,果蝇成蛹进程的加速效应可能随着暴露时间推移而加剧,因而导致了 W1118 前期成蛹量不变,后期急剧增加的情况.

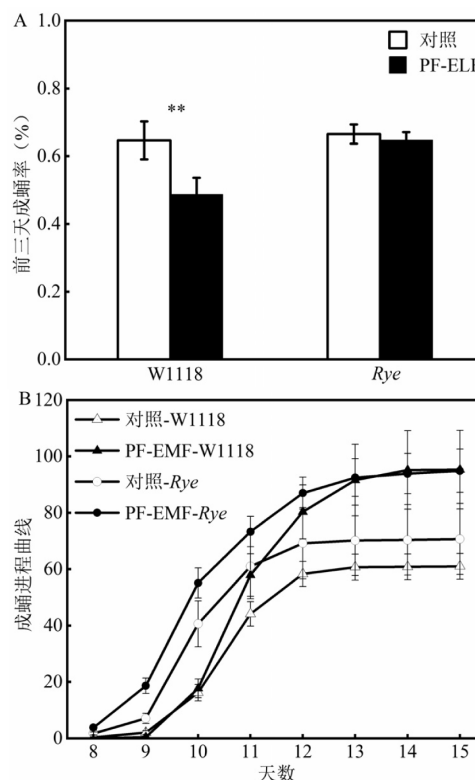


图3 PF-EMF 暴露对果蝇成蛹进程的影响

Fig.3 Effects of PF-EMF exposure on pupation process of *D. melanogaster*

A:前三天成蛹率;B:成蛹进程曲线

继续分析 Rye 果蝇成蛹过程发现,Rye 前 3d 的成蛹率和对照组相比降低,但未达到显著水平(图 3A),由图 3B 可知,PF-EMF 暴露组 Rye 的成蛹数量整体显著多于对照组,提示 PF-EMF 暴露引发了整个阶段内的蛹数量增加.PF-EMF 暴露主要影响 W1118 果蝇成蛹中后期阶段,对成蛹前期无显著作用,而 PF-EMF 可导致 Rye 果蝇整个发育进程子代数量显著上升,表明对于 PF-EMF 暴露胁迫,Rye 果蝇比 W1118 果蝇更敏感.已知突变型 Rye 生物个体存在睡眠节律障碍,睡眠比野生型水平更低,因而体质更加羸弱^[17],这可能是突变型果蝇对外界一些环境刺激比野生型更易感的原因之一,Rye 果蝇可能比野生型更难以抵御 PF-EMF 胁迫.从运动水平分析,由于 Rye 果蝇睡眠减

少,比野生型更活跃,结合下文中运动行为监测结果,发现 PF-EMF 能促进果蝇运动更加活跃(图 4A),因而 *Rye* 果蝇其交配概率比野生型高,产生的蛹数量也明显多于野生型,这也可能是在成蛹阶段早期 *Rye* 果蝇就表现出高成蛹水平的原因。

2.3 PF-EMF 对果蝇节律行为的影响

2.3.1 PF-EMF 对果蝇运动行为的影响 实验中对果蝇运动行为的监测结果显示,PF-EMF 暴露处理后无论是 W1118 还是 *Rye* 果蝇其运动水平明显提高(图 4A, $*P<0.05$, $**P<0.01$),野生型果蝇夜间运动次数显著增多,24h 全天运动次数显著提升 37.3%,白天运动次数虽升高但未出现明显差异,表明 PF-EMF 可导致野生型果蝇夜间异常活跃,提示 PF-EMF 对昆虫的运动节律存在潜在危害。已有报道表示,PF-EMF 可以显著增加蝗虫翼拍频率,蝗虫种群表现更加活跃,飞行扩散范围显著增加^[18]。蜜蜂暴露于电磁场后展现出更加积极的攻击行为^[19],这些结果与本实验中果蝇 PF-EMF 暴露后造成运动频繁十分相似。认为 PF-EMF 作为一种环境胁迫刺激,可能使昆虫产生压力应激反应。本实验中,果蝇为应对 PF-EMF 暴露环境压力进而表现活跃,具体分析分子机制可能与 PF-EMF 诱导热激蛋白(Heat Shock Proteins, HSPs)表达相关。热激蛋白又称作热休克蛋白,多以“分子伴侣”(molecular chaperones)的形式与代谢活动中蛋白酶相结合,纠正蛋白错误卷曲,从而保护酶活性,提高机体耐受能力。当机体遭受紫外线、低氧等不良胁迫环境时,机体处于应激状态,表现为 HSP 表达升高。已有报道显示运动应激能诱导骨骼肌细胞中 HSP 合成表达上升,如发现低频电短期刺激可延长大鼠游泳时间,增加其运动能力,蛋白水平检测发现大鼠此过程中增强了 HSP70 表达^[20]。本课题组前期的研究已经发现 PF-EMF 暴露可诱导果蝇 *hsp22*、*hsp26* 及 *hsp70* 的等热激蛋白基因表达水平上升^[21],由此可以推出 PF-EMF 暴露可能引发了果蝇运动行为增加。

与野生型相比,*Rye* 突变体果蝇白天和夜晚运动次数均升高,说明 PF-EMF 对 *Rye* 突变体果蝇影响更显著,这可能也是由于突变体果蝇对 PF-EMF 更易感。由图 4B 进一步分析果蝇活跃的具体表现,我们发现暴露组野生型果蝇单位时间运动次数显著提升($**P<0.01$),而突变型果蝇变化不显著,提示两株系果蝇运动活跃机制有差异。对于野生型果蝇而言,PF-EMF 暴露后表现为较明显的应激反应,单位时

间内活动频繁;而对突变体果蝇来讲,PF-EMF 的影响则更体现为减少 *Rye* 果蝇的睡眠时长,运动时长随之增加,因而表现为运动总量增加而单位运动量未变。分析分子机制,推测在野生型果蝇体内,PF-EMF 暴露效应主要体现为一种类似于热应激反应,由于 HSP 表达增多伴随果蝇行为活跃,与上文探讨一致;而在 *Rye* 果蝇体内,已知 *Rye* 蛋白是编码烟碱乙酰胆碱受体 $\alpha 4$ (nAChR $\alpha 4$)复合物的四通道跨膜通道蛋白,当发生突变后,乙酰胆碱跨膜转运受阻干扰了信号传导过程,进而发生睡眠质量碎片化的现象。实验表明 nAChR $\alpha 4$ 突变会导致有机体对睡眠环境更为敏感,比如 nAChR $\alpha 4$ 突变致癫痫的患者睡眠时对温度、光环境质量要求提高^[22]。已有证据提示极低频电磁场作为干扰因子,在长期职业接触后可能会导致工人抑郁、焦虑和睡眠质量变差^[23],本研究中也发现了 PF-EMF 暴露减少果蝇睡眠时长的结果。当 *Rye* 果蝇经 PF-EMF 处理后,此时类热应激反应的表现不明显,而对于突变导致的睡眠剥夺效应的影响更为凸显。

2.3.2 PF-EMF 对果蝇睡眠行为的影响 由图 5A 可知,W1118 野生型果蝇的总睡眠时长在 PF-EMF 暴露后未发生显著变化,*Rye* 基因突变型果蝇白天、夜间和 24h 全天的睡眠时长均显著下降($P<0.01$)。该结果进一步印证了 *Rye* 基因突变型果蝇比野生型果蝇对 PF-EMF 环境胁迫更加敏感。同时 W1118 型果蝇的睡眠时长在暴露后未显著改变,这也验证了上文对 W1118 型果蝇活跃表现的原因分析,主要是由于果蝇活动频率增加,单位时间内运动次数上升,并非挤占了睡眠时间。图 5B 可以看出对照组 *Rye* 果蝇睡眠片段化次数明显多于对照组 W1118 野生型果蝇,这是由于 *Rye* 蛋白突变造成。PF-EMF 暴露后 W1118 的 24h 睡眠片段次数显著减少 10.6%,白天和夜间统计结果与对照组未出现显著差异,而 *Rye* 果蝇的夜间睡眠片段次数减少,24h 睡眠片段次数下降 51.5%($*P<0.05$, $**P<0.01$),总睡眠时间也显著减少 45.7%,表明突变型果蝇暴露后形成失眠的情况比野生型更显著,结合上文运动节律分析,*Rye* 果蝇因失眠造成运动时间延长,进而总运动量增大。

2.3.3 PF-EMF 对果蝇节律相位的影响 由图 6 分析可知无论是 W1118 野生型果蝇还是 *Rye* 基因突变型果蝇,PF-EMF 并未改变其运动和睡眠整体节律相位。两株系果蝇都呈现出明显运动节律峰(图 6A)和睡

眠节律峰(图 6B),与 W1118 相对比,*Rye* 果蝇受 PF-EMF 影响更大,运动量增加和睡眠减少更显著.图 6B 显示,W1118 果蝇与 *Rye* 果蝇均在中午 12:00 出现睡眠高峰,但 *Rye* 果蝇对照组与暴露组的高峰峰值的差距比野生型明显,*Rye* 果蝇在暴露后明显减少了高峰期睡眠时间,且随着暴露时间延长,W1118 果蝇与 *Rye* 果蝇的睡眠高峰峰值在 PF-EMF 暴露后差异均越来越明显,这可能是由于暴露的累积效应所致.

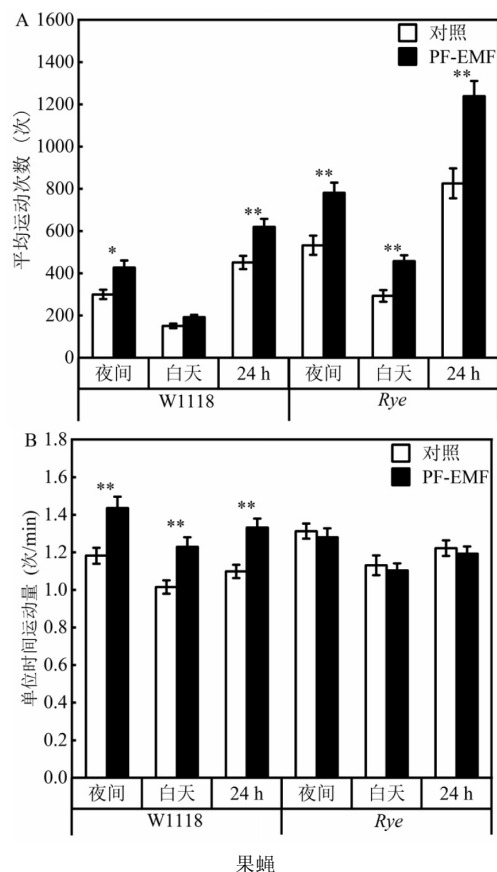


图 4 PF-EMF 暴露对果蝇运动的影响

Fig.4 Effects of PF-EMF exposure on movement of *D. melanogaster*

A: 平均运动次数; B: 单位时间运动量

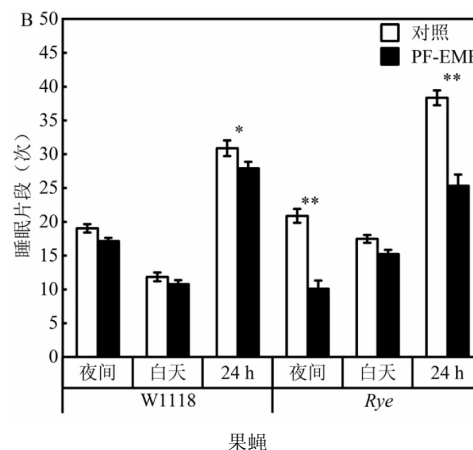
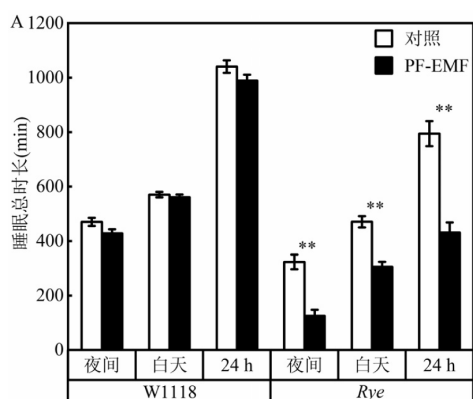


图 5 PF-EMF 暴露对果蝇睡眠的影响

Fig.5 Effects of PF-EMF exposure on sleep in *D. melanogaster*

A: 睡眠总时长; B: 睡眠片段

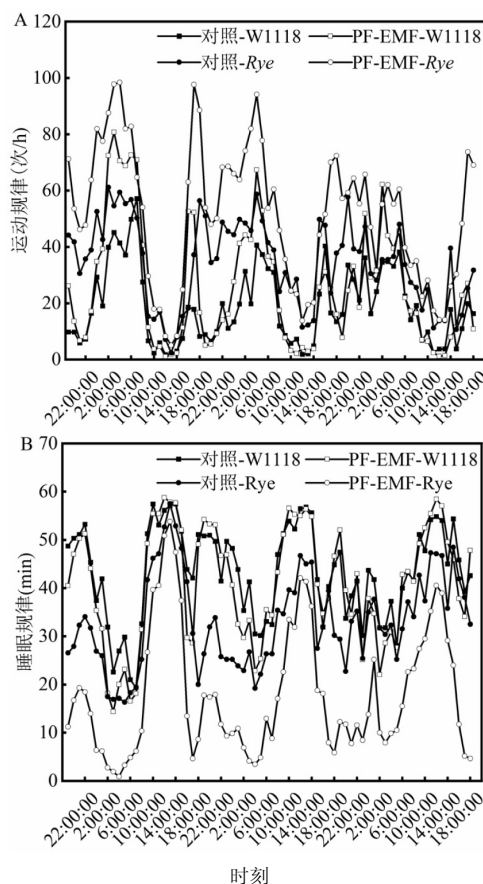


图 6 PF-EMF 暴露对果蝇节律相位影响

Fig.6 Effects of PF-EMF exposure on the rhythmic phase of *D. melanogaster*

A: 运动规律; B: 睡眠规律

3 结论

3.1 人造输变电工程产生的工频电磁环境对昆虫发育和节律行为有影响. PF-EMF 暴露对果蝇成

蛹量和成蛹速率都有促进作用,但不改变出生子代的性别比例,未发生性别偏移。

3.2 PF-EMF 暴露对果蝇运动和睡眠的节律相位未造成显著影响,但 PF-EMF 暴露后果蝇运动量明显增大,睡眠时间显著减少,睡眠片段增多,PF-EMF 暴露引起野生型果蝇运动行为增加,活动频繁,表现为一种类热应激反应效应。

3.3 Rye 突变型果蝇作为短睡眠个体与野生型相比,体质相对羸弱,因而对 PF-EMF 环境压力的感知更敏感,效应表现比野生型更显著,Rye 突变型表现为睡眠片段次数减少,运动量增大主要由于失眠所致,PF-EMF 显著降低了 Rye 突变体果蝇的睡眠水平,加剧其睡眠障碍情况。

参考文献:

- [1] 张邦俊,仇 丰,张莉,等.居住区内高压输电线路工频电磁污染分布研究 [J]. 中国环境科学, 2002,(3):81-85.
Zhang B J, Qiu F, Zhang L, et al. Studies on distribution of power frequency electromagnetic fields pollution generated by high-voltage transmission lines in uptown. China Environmental Science, 2002,(3): 81-85.
- [2] 赫 娟.电场和磁场胁迫下昆虫生物学效应及其机理初步研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
He J. The biological effects and initial mechanism of electrical field and magnetic field exposure on the insects [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [3] Zadeh H, Simon C. Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism [J]. Journal of the Royal Society Interface, 19(193):20220325.
- [4] Pereira M C, Guimarães I C, Acosta-Avalos D, et al. Can altered magnetic field affect the foraging behaviour of ants? [J]. PLoS One, 25; 14(11):e0225507.
- [5] Toribio D, Joseph W, Thielens A. Near field radio frequency electromagnetic field exposure of a western honey bee [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022,70(2):1320-1327.
- [6] 高月波,胡 高,翟保平.磁场变化对粘虫飞行定向行为的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2014,51(4):899-905.
Gao Y B, Hu G, Zhai B P. The effect of converted magnetic fields on orientation behavior of armyworm moths *Mythmna separate* (Walker) [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2014,51(4):899-905.
- [7] 张 晶,张紫燕,杨传俊,等.高温下极低频电磁场暴露对果蝇 hsp22 和 hsp26 基因影响的研究 [J]. 军事医学, 2014,38(5):321-326.
Zhang J, Zhang Z Y, Yang C J, et al. Co-effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) and temperature on hsp22 and hsp26 expression in *Drosophila melanogaster* [J]. Military Medical Sciences, 2014,38(5):321-326.
- [8] Allada R, Chung B Y. Circadian organization of behavior and physiology in *Drosophila* [J]. Annu Rev. Physiol., 2010,72:605-624.
- [9] Shi M, Yue Z, Kuryatov A, et al. Identification of redeye, a new sleep-regulating protein whose expression is modulated by sleep amount [J]. Elife, 2014,3:e01473.
- [10] Cirelli C, Bushey D. Sleep and wakefulness in *Drosophila melanogaster* [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008,1129:323-329.
- [11] 郭鸿涌.工频匀强磁场对正常细胞和肿瘤细胞凋亡与增殖影响的研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2004.
Guo H Y. The effects of power frequency homogeneous magnetic field on apoptosis and proliferation of normal and tumor cells [D]. TianJin: Hebei University of Technology, 2004.
- [12] 马幼飞,陈宁生.电磁场对昆虫的生物学效应 [J]. 昆虫知识, 1992,(1):49-52.
Ma Y F, Chen N S. Biological effects of electromagnetic fields on insects [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 1992,(1):49-52.
- [13] 姜 槐,胡根林.工频磁场影响细胞间隙连接通讯功能及其机制的研究 [J]. 自然科学进展, 2002,(4):22-25.
Jiang H, Hu G L. Study on the effect of industrial frequency magnetic field on the communication function of cell gap junctions and its mechanism [J]. Progress in Natural Science, 2002,(4):22-25.
- [14] Saadat M. Electromagnetic fields, hormonal changes, and offspring sex ratio [J]. Saudi Medical Journal, 2005,26(9):1487.
- [15] Pellacani C, Costa L G. Role of autophagy in environmental neurotoxicity [J]. Environment Pollution, 2018,235:791-805.
- [16] 范纯武,袁 铁,赵 锐,等.工频电磁场对不同增殖期淋巴细胞的生物效应 [J]. 中华现代内科学杂志, 2004,1(4):341-343.
Fan C W, Yuan T, Zhao R, et al. Biological effects of industrial frequency electromagnetic fields on lymphocytes at different proliferative stages [J]. Chinese Journal of Internal Medicine, 2004, 1(4):341-343.
- [17] Dai X, Zhou E, Yang W, et al. Molecular resolution of a behavioral paradox: sleep and arousal are regulated by distinct acetylcholine receptors in different neuronal types in *Drosophila* [J]. Sleep, 2021,44(7):zsab017.
- [18] Shepherd S, Jackson C W, Sharkh S M, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields entrain locust wingbeats [J]. Bioelectromagnetics, 2021,42(4):296-308.
- [19] Shepherd S, Hollands G, Godley V C, et al. Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields [J]. PLoS One, 2019,14(10): e0223614.
- [20] 姜洪福.低频电刺激对大鼠腓肠肌热休克蛋白 70 的诱导及对运动能力的影响 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2000,22(2):53-54.
Jiang H F. Induction of heat shock protein 70 in rat gastrocnemius muscle by low frequency electrical stimulation and its effect on locomotor performance [J]. Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2000,(2):53-54.
- [21] Zhang Z, Zhang J, Yang C, et al. Coupling mechanism of electromagnetic field and thermal stress on *Drosophila melanogaster* [J]. Plos One, 2016,11(9):e0162675.
- [22] Laikowski M, Reisdorfer F, Moura S. NACHR $\alpha 4\beta 2$ subtype and their relation with nicotine addiction, cognition, depression and hyperactivity disorder [J]. Current Medicinal Chemistry, 2018,25(20): 3792-3811.
- [23] Hosseinabadi M, Khanjani N, Ebrahimi M, et al. The effect of chronic exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on sleep quality, stress, depression and anxiety [J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2019,38(1):96-101.

作者简介: 邹鑫平(1997-),男,江西抚州人,天津理工大学硕士,主要从事物理环境与睡眠健康相关研究.发表论文 1 篇.zouxinping918@163.com.