



游建文, 梁自勉, 严成文, 江文锋, 韦迎阳, 奚志勇, 龚君淘. 基于沃尔巴克氏体的蚊媒控制在城市开放式公园的应用 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 617-624. YOU Jian-Wen, LIANG Zi-Mian, YAN Cheng-Wen, JIANG Wen-Feng, WEI Ying-Yang, XI Zhi-Yong, GONG Jun-Tao. Application of *Wolbachia*-based mosquito control in urban open parks [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 617-624.

## 基于沃尔巴克氏体的蚊媒控制在城市开放式公园的应用

游建文<sup>1,3</sup>, 梁自勉<sup>1,3</sup>, 严成文<sup>1,3</sup>, 江文锋<sup>4</sup>, 韦迎阳<sup>1,2</sup>, 奚志勇<sup>5</sup>, 龚君淘<sup>1,2\*</sup>

(1. 生态治蚊华南(佛山)应用联合研究中心, 广东佛山 528010; 2. 广州威佰昆生物科技有限公司, 广州 510530; 3. 佛山市疾病预防控制中心, 广东佛山 528010; 4. 广州市江氏杀虫有限公司, 广州 510880; 5. 美国密歇根州立大学微生物、遗传和免疫系, 东兰辛 48824)

**摘要:**【目的】探索沃尔巴克氏体不育蚊(白纹伊蚊 *Aedes albopictus*) 在开放性复杂城市环境中的应用, 为基于该技术的登革热防控策略提供科学依据。【方法】2023年5-11月, 以佛山市禅城区垂虹公园为释放区、周边社区为缓冲区、南浦公园为对照区开展沃尔巴克氏体不育蚊(PAB雄蚊)的释放试点。经5周本地数据收集后, 6月开始分别连续24周、22周在释放区和缓冲区释放PAB雄蚊以控制野生白纹伊蚊种群。整个研究过程中, 分别使用BG-trap法和诱蚊诱卵器法每周收集3个区域雌蚊诱捕密度和平均幼虫孵化数数据, 并统计这释放区和缓冲区这两项指标相对于对照区的下降率, 评估PAB雄蚊的种群压制效果。与此同时, 采用人诱法连续5个月随机统计释放区和对照区白纹伊蚊叮咬指数, 评估PAB雄蚊对释放区白纹伊蚊叮咬率的控制效果。【结果】2023年6月至11月, 释放区和缓冲区一共释放PAB雄蚊815.04万头, 释放区和缓冲区释放密度分别为8.69头/m<sup>2</sup>/周和1.13头/m<sup>2</sup>/周。成蚊和幼虫监测数据显示, PAB雄蚊释放后对野生白纹伊蚊种群的压制效果显著, 对释放区和缓冲区的白纹伊蚊雌蚊压制效率分别为80.83%和64.01%, 对幼虫压制效率分别为76.53%和62.74%。人诱法所得叮咬指数在释放区和对照区的比较结果显示, 释放区的白纹伊蚊叮咬率显著低于对照区, 叮咬指数相较于对照区稳定下降了88.51%。【结论】PAB雄蚊的持续释放在开放性复杂城市环境中的释放能够高效地控制野生媒介白纹伊蚊种群数量, 并大幅降低白纹伊蚊叮咬水平, 有效遏制目标控制区域登革热形成本地社区传播的潜在风险。

**关键词:** 沃尔巴克氏体; 白纹伊蚊; 开放性复杂城市环境; 登革热; 种群压制; 叮咬指数

中图分类号: Q968.1; Q969.92

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0617-08

### Application of *Wolbachia*-based mosquito control in urban open parks

YOU Jian-Wen<sup>1,3</sup>, LIANG Zi-Mian<sup>1,3</sup>, YAN Cheng-Wen<sup>1,3</sup>, JIANG Wen-Feng<sup>4</sup>, WEI Ying-Yang<sup>1,2</sup>, XI Zhi-Yong<sup>5</sup>, GONG Jun-Tao<sup>1,2\*</sup> (1. South China (Foshan) Joint Center for Ecological Mosquito Control, Foshan 528010, Guangdong Province, China; 2. Guangzhou Wolbaki Biotech Co., Ltd., Guangzhou 510535, China; 3. Foshan Center for Disease Control and Prevention, Foshan 528010, Guangdong Province, China; 4. Guangzhou Jiang's Insecticide Co., Ltd., Guangzhou 510880, China; 5. Department of Microbiology, Genetics & Immunology, Michigan State University, East Lansing 48824, USA)

**Abstract:** 【Aim】 This study aims to explore the application of *Wolbachia*-transinfected sterile mosquitos (*Aedes albopictus*) in complex urban open environment to provide scientific evidence for dengue control strategies based on this technology. 【Methods】 From May to November 2023, a pilot project for the release of *Wolbachia*-transinfected sterile mosquitoes (PAB males) was carried out with Chuihong Park, Chancheng District, Foshan City as the release site, the surrounding communities as the buffer site, and Nanpu Park as the control site. After five weeks of baseline data collection, PAB male mosquitoes were

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515110884); 国家自然科学基金 (12331017)

作者简介: 游建文, 男, 主管医师/主管技师, 研究方向为消毒与病媒生物防治, E-mail: fsyjw@vip.qq.com

\*通讯作者 Author for correspondence: 龚君淘, 男, 博士, 研究方向为虫媒生物防治, E-mail: gojt@wolbaki.com

收稿日期 Received: 2024-10-18; 修回日期 Revision received: 2025-02-08; 接受日期 Accepted: 2025-02-11

released into the release site and buffer site for 24 and 22 consecutive weeks, respectively, starting in June to control the wild *A. albopictus* population. Throughout the study, BG-traps and ovitraps were used weekly to collect the data on female density and average hatched-larvae number in the three sites. The reduction rates of these two indicators in the release site and the buffer site were compared to the control site to evaluate the population suppression efficiency of PAB male release. Additionally, the human landing catch method was used to randomly assess the biting index of *A. albopictus* in the release site and control site over five consecutive months to evaluate the effect of PAB male mosquitoes in controlling the biting rate of *A. albopictus* in the release site. **【Results】** From June to November 2023, a total of 8,150,400 PAB males were released into the release and buffer sites, with weekly release dose of 8.69 males/m<sup>2</sup> and 1.13 males/m<sup>2</sup>, respectively. Monitoring data of adults and larvae showed that the release of PAB males achieved a significant suppression effect on the wild *A. albopictus* population. The suppression efficiency of female *A. albopictus* in the release and buffer sites was 80.83% and 64.01%, respectively, and the suppression efficiency of larvae was 76.53% and 62.74%, respectively. Comparison of the *A. albopictus* biting index through human landing catches between the release site and the control site showed that the biting rate of *A. albopictus* in the release site was significantly lower than that in the control site, with the biting index in the release site steadily decreasing by 88.51% compared to the control site. **【Conclusion】** The continuous release of PAB males in complex urban open environments can effectively control the population of wild *A. albopictus* and substantially reduce the mosquito biting rate, effectively mitigating the potential risk of local community transmission of dengue within the target control areas.

**Key words:** *Wolbachia*; *Aedes albopictus*; open and complex urban environment; dengue; population suppression; mosquito biting index

以登革热为首的热带蚊媒传染病长时间威胁着我国国民的生命健康和安全，并在气候变化和国际间宿主动物、人员流动等因素的综合影响下，呈现日益严重态势（孟凤霞等，2015；高强和冷培恩，2024）。白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 作为我国登革热的主要传播媒介（殷启凯等，2024），对其在人居环境中的种群进行干预对这类疾病的预防和控制至关重要。长期以来，化学消杀对这类公共卫生问题的处置起到了关键的作用，然而，由于杀虫剂长期过度施用引发的抗药性、环境污染（孟凤霞等，2015；高强和冷培恩，2024）等问题，新型有效的蚊媒防制手段一直以来备受学界和行业的关注与期待。近年来，基于一类特殊的昆虫胞内共生菌沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 的媒介伊蚊控制作为一种新型蚊媒疾病防制手段已经在包括中、美、澳、巴西、新加坡等在内的二十多国广泛应用，并取得了显著的效果（龚君淘等，2022），其中，印尼和新加坡的独立现场试验均显示沃尔巴克氏体技术可降低登革热感染率超过 70%（Utarini *et al.*, 2021；Lim *et al.*, 2024）。

2019年，奚志勇等基于沃尔巴克氏体的白纹伊蚊种群压制项目在我国取得了现场试验的成功。

研究团队在广州的 2 个独立岛屿的居民居住区域开展了开放式田间试验，通过持续释放感染沃尔巴克氏体的不育雄蚊与野生雌蚊交配诱导的胞质不亲和（Cytoplasmic incompatibility, CI），实现了控制区域内 90% 以上的野生种群清除（Zheng *et al.*, 2019；郑小英等，2020）。然而，在孤立的岛屿上进行的野生白纹伊蚊种群压制理论上相较于在高人口密度、高人员流动和高蚊媒密度的开放性复杂城市环境相对容易实现。因此，考虑到进一步验证这项技术在更为复杂的真实场景中的效果，需要更加开放和多样的现场试验来评估。2022 年报道的在湖南长沙进行的小规模现场试验中，研究人员在保证与上述现场试验中同等白纹伊蚊种群压制效果的前提下，将沃尔巴克氏体不育雄蚊的目标区域由孤立小岛转移到了城市单位中，并同时解决了远距离运输和大幅降低释放量等产业化难题（Zeng *et al.*, 2022）。随后，本团队前期报道的沃尔巴克氏体不育雄蚊在登革热高风险社区的成功现场试验显示，持续释放这种不育雄蚊可以使该社区的白纹伊蚊雌蚊和幼蚊的种群密度平均分别下降 70.00% 和 75.00%，进一步拓展了沃尔巴克氏体的技术在社区中的应用（龚君淘

等, 2024)。以上两个城市试点案例分别属于封闭式或者半开放管理单位, 更多市区开放性应用场景的探索, 对该项技术在应对复杂多样的登革热防控场景中的经验积累和迭代具有重要的意义。

本研究以华南地区典型的城市开放式公园佛山垂虹公园为核心控制区, 在蚊媒高发季节持续释放PAB (沃尔巴克氏体 *wPip*、*wAlbA* 和 *wAlbB* 菌株三重感染) 不育雄蚊, 实现控制区域内白纹伊蚊雌蚊 80% 以上的平均压制效果 (最高 92.16%), 幼虫 75% 以上的平均压制效果 (最高 100%)。在释放区和对照区以人诱法诱集白纹伊蚊雌蚊显示, 释放区白纹伊蚊雌蚊叮咬率相较于对照区降低了 88.51%, 释放区体感显著转好。与此同时, 释放区PAB雄蚊的扩散还对垂虹公园周边缓冲区的白纹伊蚊种群起到显著干预效果, 使得以垂虹公园为核心控制区域外的近 16 hm<sup>2</sup> 的周边社区在释放密度远低于释放区时也受到较好的保护, 大大降低了该片区发生登革热社区传播疫情的风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验蚊株

供试虫源: 广州威佰昆生物科技有限公司生产的白纹伊蚊PAB (P、A和B三个字母分别取自沃尔巴克氏体 *wPip*、*wAlbA* 和 *wAlbB* 菌株) 不育雄蚊 (龚君淘等, 2024) (以下简称PAB雄蚊), 其与野生白纹伊蚊雌蚊交配无法产生可育后代 (Zheng *et al.*, 2019)。白纹伊蚊PAB品系饲养于蚊子工厂内 (温度 (27 ± 1) °C, 相对湿度 (80 ± 10) %, 光周期 12 L : 12 D)。雄蚊的分离采用自动雌雄蚊蛹分离仪 (WBK-P0001-V2) (Gong *et al.*, 2024)。

光周期 12 L : 12 D)。雄蚊的分离采用自动雌雄蚊蛹分离仪 (WBK-P0001-V2) (Gong *et al.*, 2024)。

### 1.2 实验设备与材料

成蚊诱捕器 (BG-Trap) (Biogents AG, Regensburg, Germany)、诱蚊诱卵器 (上海多捷环保科技有限公司)、生化培养箱 (上海一恒科学仪器有限公司)、计数器 (The Denominator Company, Inc.)、体视显微镜 (广州智祥生物科技有限公司)、吸蚊器 (广州中植保杀虫服务有限公司)。

### 1.3 不育蚊释放与监测方法

#### 1.3.1 试验区域设置和不育蚊释放

本研究中, PAB雄蚊释放区位于佛山市禅城区的垂虹公园, 对照区为距离垂虹公园 630 m 以外的南浦公园, 垂虹公园周边社区设为缓冲区, 均属于本研究中定义的开放性复杂城市环境。释放区和对照区所在垂虹公园和南浦公园均为当地老城区中典型的开放式公园, 绿化覆盖率极高且规划和面积相近 (均约为 2 hm<sup>2</sup>), 有利于白纹伊蚊繁殖和栖息, 且由于嵌入在高密度人口的老旧小区中央位置, 园内人员流动较大, 有利于白纹伊蚊叮咬和传病。释放区垂虹公园周边三面环绕区域设定为缓冲区, 总面积约为 16 hm<sup>2</sup>。缓冲区主要为老旧居民小区及商业园区, 释放区与缓冲区之间几乎完全开放, 仅相隔两排民房和三条双向单车道 (图 1)。缓冲区的设置一方面承接由释放区扩散外溢的PAB雄蚊对其自身白纹伊蚊野生种群的辐射控制效果, 另一方面作为次级释放区接受少量PAB雄蚊的补充释放进而形成种群屏障, 以保障释放区种群压制效果的稳定性。

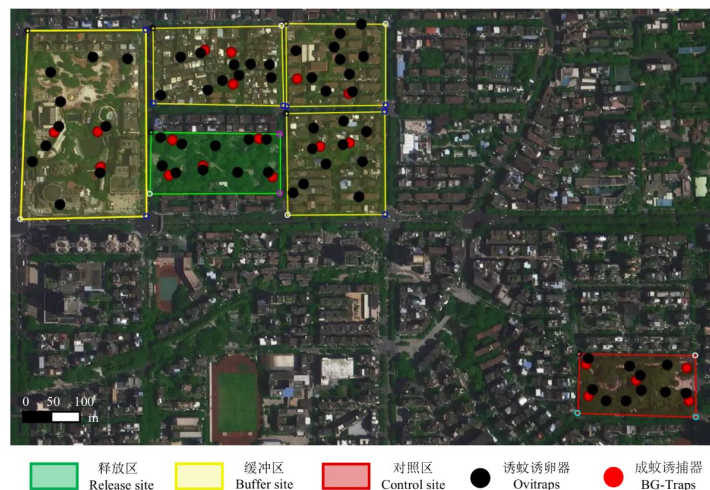


图 1 释放区、缓冲区与对照区及幼蚊及成蚊监测点分布

Fig. 1 Distribution of the release site, buffer site, control site and the monitoring points of ovitraps and BG-traps

释放区、缓冲区以及对照区确定后,在所选定3个区域内同时开展本研究,整个研究过程自2023年5月中旬开始到11月底结束,覆盖华南地区几乎整个白纹伊蚊发生时间段。PAB雄蚊释放前,对上述3个区域连续监测5周,完成本底数据收集,监测开始后第6周(6月中下旬)启动PAB雄蚊对目标区域的干预。释放区先行释放PAB雄蚊2周后,缓冲区开启同步释放,以辅助释放区外溢PAB雄蚊对缓冲区野生种群的控制。两个区域的PAB雄蚊释放均至11月底与监测工作同步中止。与对照区相比,本研究中有PAB雄蚊释放的释放区和缓冲区统称为干预区,干预区干预效果均由各区域监测数据分别体现。

### 1.3.2 BG-Trap和诱蚊诱卵器法监测蚊媒种群动态变化

本研究参考之前研究中的常用方法(Zheng *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2022; 龚君淘等, 2024),分别采用BG-Trap和诱蚊诱卵器法持续监测上述3个区域中的蚊媒种群动态变化。释放区和对照区分别均匀布置5个BG-Trap和10个诱蚊诱卵器,缓冲区共布置10个BG-Trap和40个诱蚊诱卵器(图1)。BG-Trap每周布置一次,监测24 h后回收,诱蚊诱卵器持续在监测区域内布置,每周更换并回收一次。本研究中,BG-Trap监测结果主要关注雌蚊诱捕情况,诱蚊诱卵器监测结果主要关注卵的孵化情况。

### 1.3.3 白纹伊蚊密度调查与动态评估

本研究采用释放密度指标来综合体现控制区域内释放不育蚊的强度:

$$\text{释放密度}[\text{头}/(\text{m}^2 \cdot \text{周})] = \frac{\text{总释放量}(\text{头})}{[\text{释放面积}(\text{m}^2) \times \text{释放周数}(\text{周})]}$$

本研究采用之前报道的雌蚊诱捕密度(BG-Trap监测统计所得)和平均幼虫孵化数(诱蚊诱卵器监测统计所得)这两个监测指标及二者下降率(即压制效率)来评估PAB雄蚊的控制效果。雌蚊诱捕密度为BG-Trap 24 h诱捕雌蚊数平均值,平均幼虫孵化数为每周回收所得诱蚊诱卵器中孵化出幼虫数的平均值(龚君淘等, 2024)。

$$\text{压制效率}(\%) = \frac{(\text{对照区监测值} - \text{干预区监测值})}{\text{对照区监测值}} \times 100$$

为进一步了解PAB雄蚊释放后对释放区白纹伊蚊雌蚊叮咬控制情况,在登革热高发时期(7-10月),不定期在两个公园各选择靠近伊蚊栖息地

的两个固定点以人诱法结合吸蚊器的使用诱捕并统计白纹伊蚊雌蚊,每个点诱捕伊蚊15 min(Zheng *et al.*, 2019),白纹伊蚊叮咬指数取人均15 min内捕获的雌性白纹伊蚊数目的平均值。

## 1.4 数据分析

采用Excel 2016软件汇总数据,采用GraphPad Prism Software 8.00软件进行统计分析。为了在全过程的释放和对照区之间比较上述监测值,首先计算出各区域每周所有样本的平均值,然后使用Mann-Whitney *U* test分别比较PAB雄蚊释放后不同区域间相同时间段内各项监测指标的差异。Two-sided paired *t*-test比较释放后释放区和对照区蚊虫叮咬情况。

## 2. 结果与分析

### 2.1 释放量与释放密度

2023年6月19日至11月28日期间,在释放区和缓冲区中,本研究释放PAB雄蚊共计815.04万头,其中释放区共释放24周,为417.34万头,缓冲区共释放22周,为397.7万头(图2)。整个干预过程中,释放区PAB雄蚊释放密度为8.69头/ $\text{m}^2$ /周,缓冲区PAB雄蚊释放密度为1.13头/ $\text{m}^2$ /周。缓冲区雄蚊释放密度仅约为释放区雄蚊释放密度的12.99%,远低于释放区。在两个存在明显不同程度PAB雄蚊释放密度的干预区中,释放区作为核心控制区评估释放PAB雄蚊的压制效果,而缓冲区则作为释放区PAB雄蚊外溢保护区评估雄蚊扩散外溢的保护效果。

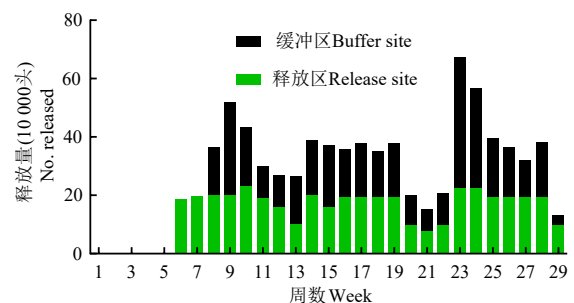


图2 PAB雄蚊周释放量

Fig. 2 Number of PAB males released weekly

### 2.2 释放PAB雄蚊对成蚊和幼蚊的压制效果

开始PAB雄蚊释放前,连续5周对3个区域(干预区:释放区和缓冲区;对照区)雌蚊诱捕密

度监测所得结果显示，对照区与释放区 ( $P = 0.222$ ) 和缓冲区 ( $P = 1.000$ ) 无显著性差异，且3个区域该监测指标的动态变化趋势基本接近 (图3-A)。另一方面，这5周中的平均幼虫孵化数监测

结果同样显示，对照区与释放区 ( $P = 0.135$ ) 和缓冲区 ( $P = 0.651$ ) 无显著性差异，且3个区域该监测指标的动态变化趋势也基本接近 (图3-B)。

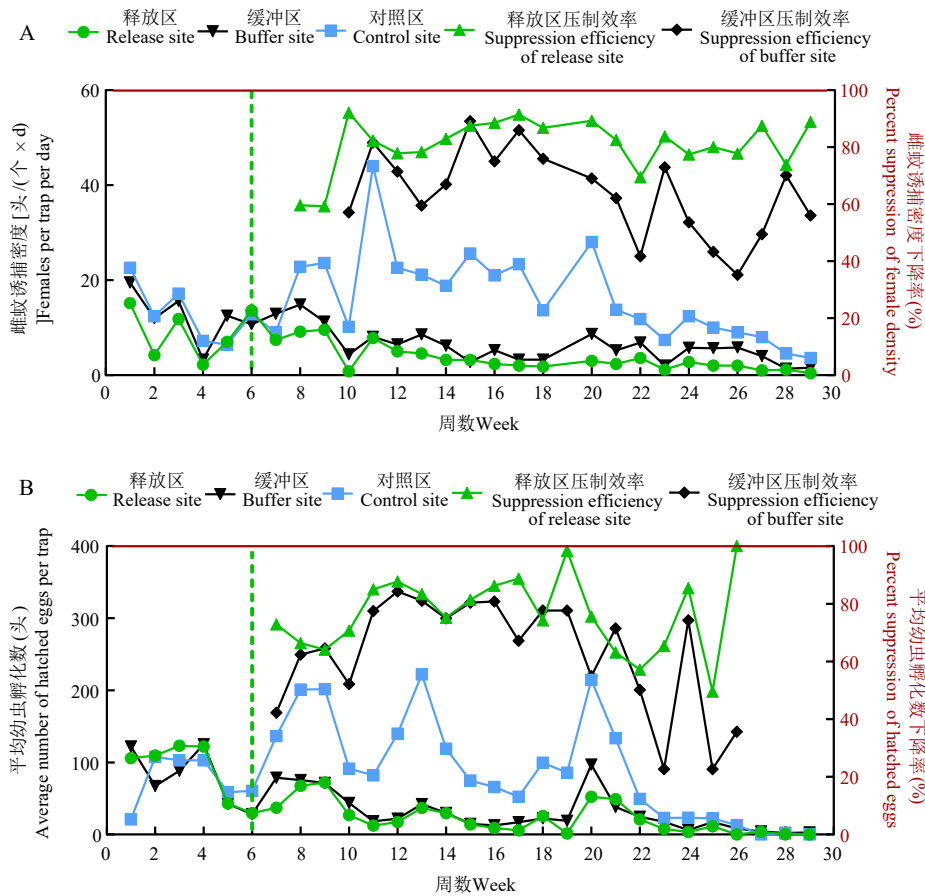


图3 白纹伊蚊PAB雄蚊在目标控制区域内对野外种群的压制效果

Fig. 3 Suppression efficiency of PAB males on wild *Aedes albopictus* populations in the target areas

注：绿色虚线代表PAB雄蚊释放起始时间点。绿色实线分别表示释放区雌蚊诱捕密度 (BG-Trap 监测所得到的平均雌蚊数)、平均幼虫孵化数 (诱蚊诱卵器监测所得平均幼虫孵化数) 及对应的压制效率；黑色实线分别表示缓冲区雌蚊诱捕密度、平均幼虫孵化数及对应的压制效率；蓝色实线分别表示对照区雌蚊诱捕密度、平均幼虫孵化数。Note: The green dashed line represented the starting point of the release of PAB males. The green solid lines represented the females mosquito trapping density (mean number of female mosquitoes per BG-trap), the average number of hatched eggs count (mean number of hatched larvae per ovitrap), and the corresponding suppression efficiency in the release site, respectively; the black solid lines represented the females mosquito trapping density, the average number of hatched eggs count, and the corresponding suppression efficiency in the buffer site, respectively; the blue solid lines represented the females mosquito trapping density and the average number of hatched eggs count in the control site, respectively.

PAB雄蚊释放开始后，从第8周到第29周监测结果显示，释放区 ( $P < 0.001$ ) 与缓冲区 ( $P < 0.001$ ) 的雌蚊诱捕密度显著低于对照区，分别为  $(3.30 \pm 0.57)$ 、 $(5.78 \pm 0.71)$  和  $(16.92 \pm 2.10)$  头/ (个 $\times$ d)。与此同时，第8周到第29周释放区与缓冲区的雌蚊诱捕密度下降率分别为  $(80.83 \pm$

$2.02)$  % 和  $(64.01 \pm 3.46)$  %，且存在显著性差异 ( $P < 0.001$ )。其中，释放区雌蚊压制效率有8周在85%以上，最高可达92.16%；而缓冲区雌蚊压制效率则有8周在70%以上，最高可达89.10%。PAB雄蚊释放中后期 (18~29周)，释放区雌蚊诱捕密度均值仅为2.15头/ (个 $\times$ d)，而对照区为

14.07头/(个×d)(图3-A)。PAB雄蚊释放开始后,从第7周到第26周监测结果显示(27~29周因气候变化已经几乎监测不到蚊卵),释放区( $P < 0.001$ )与缓冲区( $P < 0.001$ )的平均幼虫孵化数显著低于对照区,分别为( $25.04 \pm 4.81$ )头、( $33.82 \pm 5.90$ )头和( $102.50 \pm 15.00$ )头。与此同时,第7周到第26周释放区与缓冲区的平均幼虫孵化数下降率分别为( $76.53 \pm 2.96$ )%和( $62.74 \pm 4.35$ )%,且存在显著性差异( $P = 0.026$ )。其中,释放区幼虫压制效率有9周在80%以上,最高可达100%;而缓冲区幼虫压制效率则有10周在70%以上,最高可达84.26%(图3-B)。此外,释放区雌蚊诱捕密度显著低于缓冲区( $P = 0.004$ ),而平均幼虫孵化数在二者之间无显著性差异( $P = 0.192$ )。

### 2.3 释放PAB雄蚊对白纹伊蚊叮咬水平的降低

在PAB雄蚊释放并达到压制效果后,分别在7月21日、8月17日、8月30日、9月13日、10月11日及11月6日在释放区和对照区采用人诱法引诱并捕获白纹伊蚊雌蚊的方式来比较两个区域的蚊虫叮咬率。所得白纹伊蚊叮咬指数显示,释放区白纹伊蚊叮咬率显著低于对照区( $P = 0.017$ )。释放区白纹伊蚊叮咬指数为( $0.67 \pm 0.21$ ),对照区为( $5.83 \pm 1.48$ ),释放区白纹伊蚊叮咬率相较于对照区降低了88.51%(图4)。

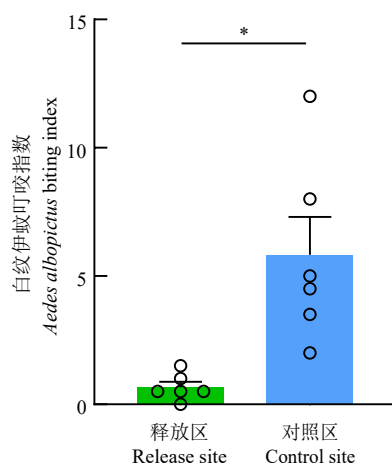


图4 释放区与对照区白纹伊蚊人诱情况比较

Fig. 4 Comparison of *Aedes albopictus* human landing catches between the release and control sites

注:图中的数据为平均数±标准误,图中\*表示 $P < 0.05$ (双侧配对 $t$ 检验)。Note: Data in the figure were Mean ± SE, and \* indicated  $P < 0.05$  (Two-sided paired  $t$ -test).

## 3 结论与讨论

基于沃尔巴克氏体在宿主雄蚊中诱导的与野生雌蚊交配不育表型发展出的种群压制策略,已经作为一种新型有效的蚊媒疾病控制手段在多国的现场试验或防控应用中被验证成功(Mains *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2019; Beebe *et al.*, 2021; Lim *et al.*, 2024)。除大规模生产此类不育雄蚊外,这类技术进一步推广的另一大挑战则是适用于开放性复杂城市环境(高人口密度、高人员流动和高蚊媒密度)的应用经验积累。与之前选择在有河流和高速公路(宽30~60 m)多面环绕作为阻隔屏障的小区(龚君淘等, 2024)不同,本研究选择在我国华南地区的登革热疫情常发时段,以城市开放式公园为释放区,持续释放沃尔巴克氏体感染的不育白纹伊蚊雄蚊(PAB雄蚊),并综合释放区、释放区外围缓冲区及对照区监测结果,评估其对野生白纹伊蚊种群的干预效果。释放区和缓冲区及其周边环境均没有能够明显限制人员流动和白纹伊蚊飞行扩散的阻隔(图1),因此,在这两个干预区(释放区和缓冲区)内开展释放不育雄蚊控制野生种群的理论难度大大增加。

PAB雄蚊释放前连续5周的本底调查结果显示,两个干预区(释放区和缓冲区)白纹伊蚊野生种群发生情况与对照区相比均无显著差异,且变化趋势基本接近。整个种群干预过程中,释放区与缓冲区释放时间和释放量基本相当,但由于释放面积上释放区远小于缓冲区,二者释放密度相差极大,释放区的释放密度几乎是缓冲区的7~8倍(图2)。因此,由于两个区域之间彼此接近且几乎完全开放,释放区中超高密度的PAB雄蚊向缓冲区自行扩散可能性极高。

监测结果表明,在开启PAB雄蚊释放后,释放区和缓冲区的白纹伊蚊野生种群均出现了显著的下降,雌蚊诱捕密度下降率均值分别为80.83%和64.01%,平均幼虫孵化数下降率均值分别为76.53%和62.74%。其中,在对照区蚊媒密度持续走高的8~20周中,PAB雄蚊的释放效果在释放区和缓冲区均为最佳水平(图3)。基于上述结果,尽管PAB雄蚊对缓冲区中雌蚊和幼虫的压制效果分别为释放区的79.19%和81.89%,且缓冲区雌蚊数仍然显著高于释放区,但缓冲区PAB雄蚊释放

密度仅为释放区的12.99%，基本可以确认缓冲区中野生白纹伊蚊种群受到了来自释放区外溢PAB雄蚊的影响。因此，缓冲区的种群压制效果是由释放区外溢PAB雄蚊和本区域内释放PAB雄蚊共同决定的。另一方面，缓冲区监测结果也显示，在开放性复杂城市环境中通过释放PAB雄蚊进行野生蚊媒种群控制时，需要综合考虑雄蚊释放密度、控制效果以及雄蚊外溢效应之间的关系，以实现限定释放区域面积内控制效果达标前提下最高的PAB雄蚊释放效率。

释放PAB雄蚊后，连续5个月随机使用人诱法对比释放区和对照区白纹伊蚊叮咬指数的结果表明，释放区白纹伊蚊叮咬率降低到对照区的88.51%，比雌蚊诱捕密度下降率更为显著。更为值得注意的是，释放区的白纹伊蚊叮咬指数数据离散程度相较于对照区也极低（图4），说明在此期间释放区的白纹伊蚊叮咬率下降是稳定且可持续的。以往的研究表明，即使在我国登革热常年发生区域野生蚊媒种群的带毒率也处于极低水平，为3%~4%（游建文等，2019；郭晓芳等，2023）。自然状态下，登革热的成功传播需要基于单位时间内暴露人员被带毒伊蚊尽可能多次数的叮咬来实现（Zahid *et al.*, 2023）。因此，本研究中释放PAB雄蚊后导致释放区白纹伊蚊叮咬率的大幅降低对登革热传播风险的控制起到至关重要的作用。

在该新技术取得理想控制效果后，其成本问题同样值得重点关注和深入探讨。根据之前的研究，以13~175美元生产约1.16~15.81万头不育雄蚊/hm<sup>2</sup>/周，目前在广东地区已具有一定经济性（Zheng *et al.*, 2019；龚君淘等，2022）。因此，本研究中815.04万头的不育雄蚊的生产和释放成本可控。此外，在该技术最大的成本优势表现在长期大面积的区域控制项目中，技术进步、野生种群持续降低和规模经济均能大幅降低后续干预成本（Zheng *et al.*, 2019）。基于成本效益相关的评估研究还表明，若该技术在新加坡的2010至2020年间被用于登革热控制，即使在40%的干预效果下，也可节省约3.294亿美元的经济成本（Soh *et al.*, 2021）。近期新加坡沃尔巴克氏体项目已经能够在控制区域取得77.28%的登革热干预效果（Lim *et al.*, 2024），进一步促进了政府逐步扩大该技术部署的进程。

综上所述，本研究成功验证了PAB雄蚊在开

放性复杂城市环境中的精准施用，为我国华南地区以白纹伊蚊为主要登革传播媒介的城市提供了一种新型有效的生态控制方案。与此同时，也为在我国本土条件下基于沃尔巴克氏体的蚊媒控制技术的应用和发展提供了更加成熟的参考范例。

## 参考文献（References）

- Beebe NW, Pagendam D, Trewin BJ, *et al.* Releasing incompatible males drives strong suppression across populations of wild and *Wolbachia*-carrying *Aedes aegypti* in Australia [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118 (41): e2106828118.
- Gao Q, Leng PE. Current state and prospect of dengue prevention and control [J]. *China Tropical Medicine*, 2024, 24 (1): 40-48. [高强, 冷培恩. 登革热防控的现状与展望 [J]. 中国热带医学, 2024, 24 (1): 40-48]
- Gong JT, Liang ZM, Wei YY, *et al.* Field application of *Wolbachia*-infected incompatible mosquitoes in communities at high risk for dengue fever [J]. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 2024, 35 (3): 287-292. [龚君淘, 梁自勉, 韦迎阳, 等. 沃尔巴克氏体不育蚊在登革热高风险社区的现场应用 [J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2024, 35 (3): 287-292]
- Gong JT, Liu QY, Wang YY, *et al.* Application and prospect of *Wolbachia* for *Aedes* for mosquito vector control [J]. *Pesticide Science and Administration*, 2022, 43 (10): 20-29. [龚君淘, 刘起勇, 王以燕, 等. 沃尔巴克氏体控制媒介伊蚊的应用及前景 [J]. 农药科学与管理, 2022, 43 (10): 20-29]
- Gong JT, Mamai W, Wang X, *et al.* Upscaling the production of sterile male mosquitoes with an automated pupa sex sorter [J]. *Science Robotics*, 2024, 9 (92): eadj6261.
- Guo XF, Zhou KM, Chen ZL, *et al.* Investigation of arboviruses carried by vector *Aedes* mosquitoes in the urban areas of Xishuangbanna prefecture, Yunnan Province during the dengue fever epidemic season of 2018 [J]. *Acta Parasitology et Medica Entomologica Sinica*, 2023, 30 (4): 202-209. [郭晓芳, 周克梅, 陈子龙, 等. 2018年登革热流行季节云南西双版纳州城区媒介伊蚊携带虫媒病毒调查 [J]. 寄生虫与医学昆虫学报, 2023, 30 (4): 202-209]
- Lim JT, Bansal S, Chong CS, *et al.* Efficacy of *Wolbachia*-mediated sterility to reduce the incidence of dengue: a synthetic control study in Singapore [J]. *Lancet Microbe*, 2024, 5 (5): e422-e432.
- Mains JW, Kelly PH, Dobson KL, *et al.* Localized control of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in Miami, FL, via inundative releases of *Wolbachia*-infected male mosquitoes [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2019, 56 (5): 1296-1303.
- Meng FX, Wang YG, Feng L, *et al.* Review on dengue prevention and control and integrated mosquito management in China [J]. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 2015, 26 (1): 4-10. [孟凤霞, 王义冠, 冯磊, 等. 我国登革热疫情防控与媒介伊蚊的综合治理 [J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2015, 26 (1): 4-10]
- Soh S, Ho SH, Seah A, *et al.* Economic impact of dengue in Singapore

- from 2010 to 2020 and the cost-effectiveness of *Wolbachia* interventions [J]. *PLoS Global Public Health*, 2021, 1 (10): e0000024.
- Utarini A, Indriani C, Ahmad RA, *et al.* Efficacy of *Wolbachia*-infected mosquito deployments for the control of dengue [J]. *New England Journal of Medicine*, 2021, 384 (23): 2177-2186.
- Yin QK, Fu SH, Wang HY, *et al.* Current situation and prospect of mosquito-borne arboviruses and mosquito-borne arbovirus diseases in China [J]. *China Tropical Medicine*, 2024, 24 (4): 478-485. [殷启凯, 付士红, 王环宇, 等. 我国蚊传虫媒病毒及蚊传虫媒病毒病现状及展望 [J]. 中国热带医学, 2024, 24 (4): 478-485]
- You JW, Xie Y, Liang ZM, *et al.* Survey on the density of *Aedes albopictus* and dengue virus infection in Foshan City from 2015 to 2017 [J]. *Journal of Applied Preventive Medicine*, 2019, 25 (4): 331-332. [游建文, 谢翊, 梁自勉, 等. 2015—2017年佛山市白纹伊蚊密度及携带登革病毒调查 [J]. 应用预防医学, 2019, 25 (4): 331-332]
- Zahid MH, Van Wyk H, Morrison AC, *et al.* The biting rate of *Aedes aegypti* and its variability: a systematic review (1970-2022) [J]. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2023, 17 (8): e0010831.
- Zeng Q, She L, Yuan H, *et al.* A standalone incompatible insect technique enables mosquito suppression in the urban subtropics [J]. *Communication Biology*, 2022, 5 (1): 1419.
- Zheng X, Zhang D, Li Y, *et al.* Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes [J]. *Nature*, 2019, 572 (7767): 56-61.
- Zheng XY, Wu Y, Zhang DJ, *et al.* *Wolbachia*-based approach and sterile insect techniques eliminate *Aedes albopictus* population in field Combining [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43 (3): 387-391. [郑小英, 吴瑜, 张东京, 等. 沃尔巴克氏体(*Wolbachia*)结合昆虫绝育技术控制白纹伊蚊种群 [J]. 南京农业大学学报, 2020, 43 (3): 387-391]