

# 从药剂到生态,人类重觅控蚊之道

## 蚊子蚊子,不用怕

■ 本报记者 林晓晖  
通讯员 周亦颖 江歆

作为动物,蚊子十分“弱小”。它的体重不到一粒大米的十分之一,神经元数量不到人脑的百万分之一,寿命短暂、飞行能力有限,被人轻轻一拍,就结束了生命。

然而,它们却是人类最难缠的对手之一。

目前全球已知蚊子种类有3000余种,中国有300余种。浙江是蚊媒传染病的高风险省份。作为多种病原体的传播媒介,蚊子每年导致全球数亿人感染疾病。人类发明了杀虫剂、蚊香、驱蚊液、电蚊拍等各种工具,与蚊子的较量从未停歇。

面对不断进化的对手,人类的应对方式也在发生转变——精密监测、智能诱捕、生态防治……科学家、疾控专家们正探索一条更智慧、精准、可持续的控蚊之路。日前,记者跟随他们的脚步,走进实验室与监测点,记录这场跨越千年的缠斗,也寻找未来人与蚊子相处的新答案。

### 不断进化的老对手

在浙江省疾病预防控制中心病媒生物饲养室,精心饲养着约6000只蚊子。

这里的温度常年保持在26℃左右,湿度维持在65%上下。屋内架子上整齐排列着一个个饲养笼,里面装有饲养的蚊子。在浙江,白纹伊蚊是登革热、基孔肯雅热的主要传播媒介,淡色库蚊也是浙江省的优势蚊种,它们都是实验室的重点研究对象。

王金娜是实验室负责人之一。她和同事们持续监测蚊子密度、种群变化和抗性水平,以评估蚊媒传染病的传播风险。

通过诱蚊灯、双层叠帐和布雷图指数等监测方法,团队对蚊子种群密度进行长期跟踪。布雷图指数反映的是每百户居民室内外孳生伊蚊幼虫的阳性积水容器数量,数据汇总后,王金娜和同事们绘制出动态更新的“蚊险地图”,为蚊媒疾病防控提供依据。

监测结果显示,蚊子对目前市面上的部分杀虫剂已表现出不同程度的抗性。

“如果一个地区长期、大量使用同一种杀虫剂,蚊子就可能逐渐产生抗性,也就是对这种杀虫剂不再敏感,同样的剂量更难杀死蚊子。”王金娜说。因此,根据不同地区、不同蚊种的抗性水平,防控部门会动态调整化学杀虫剂的种类和使用方案,以提高效果。

20世纪中叶,人类收获了对付蚊子的第一种“神药”——DDT(有机氯类杀虫剂)。这种廉价、高效的化学杀虫剂曾在全球疟疾防控中发挥重要作用。

但它的另一面也很快显现:化学性质极其稳定,在自然环境中数十年难以降解。大量使用化学农药在一定程度上控制了蚊子密度,也给它们施加了持续的选择压力——那些能够耐受药剂的个体存活下来,并将抗性基因传递给下一代。同时,部分蚊子天敌受到影响,生态系统原有的平衡也被打破。

DDT被陆续禁用后,相对低毒、易降解的拟除虫菊酯类杀虫剂接过了接力棒,以它为主要成分的电蚊香、盘香走进千家万户。

但几十年过去,人类发现,自己面对的是一个不断进化的对手。

“蚊子的生命周期极短,繁殖速度极快。一只雌蚊一生能产成百上千枚卵,研发一种新杀虫剂需要数年甚至十几年,而蚊子形成抗药性的时间很短。”王金娜说。

半个多世纪前,美国生物学家蕾切尔·卡逊在著作《寂静的春天》写道,大规模喷洒DDT等杀虫剂不仅杀死了蚊子,也杀死了蚊子的天敌,最终可能导致新的生态问题。

今天,这个问题依然摆在人们面前:长期依赖化学杀虫剂,既可能加速蚊子抗药性的形成,也难以避免对生态环境造成影响……人类还能找到新的突破口吗?

既然无法切断蚊子寻找人类的通道,那能不能反过来利用这条通道?蚊子没有停止进化,人类的思路也在改变——从研究如何杀死蚊子,到研究如何模仿、诱骗和改造蚊子。

浙江大学生命科学学院教授方卫国长期从事害虫生物防治,在他看来,蚊子生活在一个与人类截然不同的感知世界里。人类依赖视觉,而蚊子主要依赖嗅觉。帮助它们寻找目标的,是空气中的物理、化学信息。

人呼出的二氧化碳、汗液中的乳酸、皮肤散发的挥发性气味,甚至人体表面的热量和湿度,都可能成为蚊子追踪猎



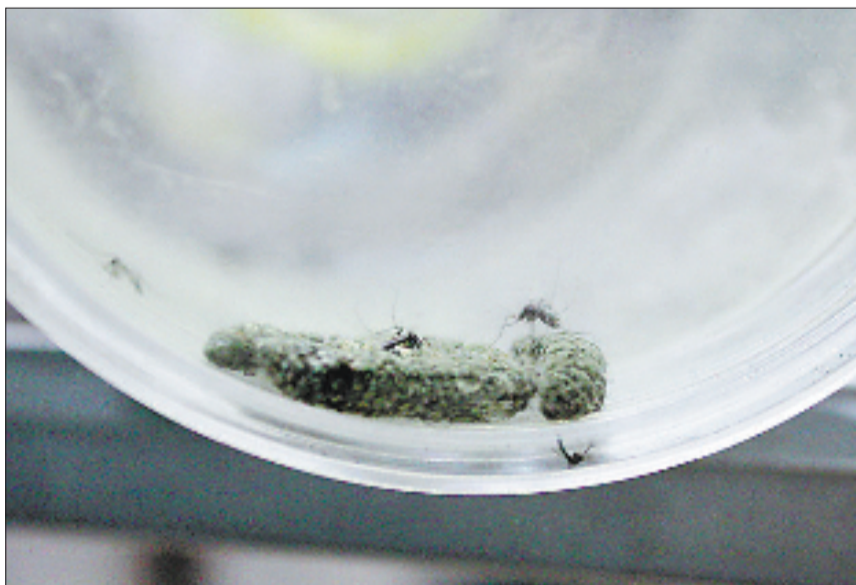
方卫国(右一)和团队成员在实验室。

受访者供图



浙江省疾病预防控制中心病媒生物饲养室内饲养的蚊虫。

受访者供图



蚊子驻留在被绿僵菌感染的昆虫尸体上。

受访者供图

物的线索。

“蚊子不是随机找人的。”方卫国说,“它其实一直在接收环境信息,并据此作出判断。”我们现在要做的,就是搞清楚这些判断背后的逻辑。

过去,人们试图用杀虫剂直接扑杀蚊子,也尝试过信息素干扰——大面积释放气味信号掩盖人体气味,想让蚊子迷失方向、“活活累死”。但这些方法都没有从根本上解决问题——堵住一条嗅觉通道,蚊子还能循着另一丝气息找上门来。

既然无法切断蚊子寻找人类的通道,那能不能反过来利用这条通道?蚊子没有停止进化,人类的思路也在改变——从研究如何杀死蚊子,到研究如何模仿、诱骗和改造蚊子。

新的较量,由此开始。

### 把蚊子的本能变成武器

如何让蚊子主动找上门来?十多年前,方卫国就开始思考这个问题。

科学家把目光投向了与昆虫关系密切的真菌。其中,绿僵菌是一类广泛存在于自然界的昆虫病原真菌,人类用它治理害虫已有上百年历史。它的孢子能穿透昆虫体壁,在宿主体内快速繁殖,最终将宿主变成一具绿色的僵尸(僵尸),科研人员称它为“绿将军”。

如何让“绿将军”接触到蚊子?

“在实验室里把蚊子迷晕再喷菌,效果很好;可在自然界,蚊子不停飞行,不会乖乖停在原地等待感染。”方卫国说,多年来,如何提高飞行蚊子与绿僵菌孢子的接触机会,即提高“接种率”,一直是全球生物防治领域的难题。

一次,方卫国的博士生偶然观察到,被绿僵菌杀死的昆虫尸体能吸引蚊子。团队通过化学分析,从僵尸挥发物中锁定了一种关键物质——长叶烯。这种带着松针清甜香气的化合物,对蚊子有极强的吸引力。

接下来要回答两个问题:绿僵菌怎么产生这种物质?蚊子怎么感知它?

第二个问题尤其棘手。蚊子拥有极其复杂的嗅觉受体系统,触角上的受体能识别数百种挥发性化合物,要从中找

到感知长叶烯的那一个,如同大海捞针。

团队采取了一个巧妙的策略,他们先在黑腹果蝇身上寻找线索。

“黑腹果蝇的嗅觉受体研究基础好,每个受体都有突变体。”方卫国说,他们用长叶烯——去测试突变体,看哪一个对它不再反应,由此锁定果蝇的嗅觉受体,再顺藤摸瓜找到蚊子体内功能相近的同源受体基因——LOR。通过基因敲除和电生理记录等技术,最终证实它正是感知长叶烯的关键受体。

许多植物都会释放长叶烯,人类从松树中提取它来调制木质香调的香水。但天然绿僵菌在培养基上的孢子产生的长叶烯含量很低,不足以对蚊子形成有效吸引。于是,研究团队将松树中合成长叶烯的基因转入绿僵菌。

这种经过改造的绿僵菌兼具“诱饵”和“杀手”的双重身份。它持续释放长叶烯,散发出蚊子喜欢的气味;当蚊子循香而来时,又在不知不觉间沾上真菌孢子。孢子侵入体内、生长繁殖,最终导致蚊子死亡。

整个过程有点像花朵利用香味吸引蜜蜂授粉——只不过这一次,被吸引来的蚊子得到的不是花蜜,而是一场致命感染。

2025年10月,这项成果发表于《自然·微生物学》。实验数据显示,工程菌株对飞蚊蚊子的接种率接近100%,野外半现场致死率超过90%。

“绿僵菌本身是一种环境友好、温和的杀虫剂。”方卫国说。根据实验观察,被绿僵菌感染的蚊子就像得了重病,几天内就会死亡,叮咬人的意愿也会明显下降。

学界认为,这一方法为应对化学杀虫剂抗药性问题提供了新的思路,在效率、安全性和应用成本方面展现出了优势。

最近,方卫国团队进一步研发了上述改造菌株的替代技术,建立了基于天然绿僵菌菌株的蚊子诱杀技术,这项“以菌治蚊”的技术已在杭州多个小区开展野外现场试验,有望为蚊媒疾病防控提供新的工具选择。

不过,在方卫国看来,没有任何一种技术能够单独解决所有问题。

除了以菌治蚊,科学家们还在探索多条技术路线:利用辐照技术培育雄性不育蚊,通过竞争交配压低种群数量;利用沃尔巴克氏体降低病原体在蚊体内传播和扩增的能力;利用糖饵诱杀技术,把蚊子日常摄食的植物糖源变成“致命餐食”;还有基因驱动等前沿技术,尝试从种群层面干预蚊子传播疾病的能力。

“人类研发新药的速度,远远赶不上蚊子产生抗性的速度。”方卫国说,“靠一种方法完全解决所有问题是不现实的。未来更重要的,是让不同技术形成互补。”

### 城市化重塑“人蚊关系”

蚊子在地球上生存的时间,比人类长得多。今天,它们也正在适应人类为自身建造的新环境。

浙江大学昆虫科学研究所教授莫建

初长期研究城市昆虫生态学。在他看来,人与蚊子的关系,正在被城市化重新塑造。

过去几十年,高层建筑、地下管廊、景观水体、城市绿化迅速增加。许多原本不存在的微型生态环境开始出现:花盆托盘里的积水、绿化带里的落叶层、废弃容器中的雨水、活立树木枝干内的空洞、空调下方地面的积水,都可能成为白纹伊蚊理想的繁殖场所。“城市环境变好了,某种意义上,也变得更适合蚊子了。”莫建初说。

他观察到一个明显的变化:过去江南地区的优势蚊种是库蚊,主要孳生在下水道、地面排水沟和路旁积水等污水中。夏季高温时地面水分蒸发,孳生地减少,库蚊密度反而下降。

但现在,城市绿化越来越好,大量落叶沉积在绿化带中,雨水滞留其间,形成了密密麻麻的小水体。莫建初解释:“这种小水体特别有利于伊蚊孳生,孳生地变得越来越多、越来越广。而伊蚊比例的上升,意味着登革热等疾病传播风险的加剧。”

同时,气候变化也在影响蚊子分布。暖冬提高了越冬雌蚊存活率,极端降雨增加了积水环境,部分蚊媒疾病的传播季节开始提前。

当蚊子越来越适应城市,人类的防控思路也在发生变化。

现代病媒生物防制的核心理念,正转向“可持续综合防制”。

王金娜介绍,城市空间里防治蚊子,更讲究“源头管控、绿色低碳、精细入微”——不再是发现蚊子就大面积喷药“一扫光”,而是优先清理小型积水,从根上断绝其繁殖温床;在成蚊控制上,优先采用物理阻隔与生物手段,尽量减少化学药剂对城市生态的干扰,防控设施悄无声息地融入公共空间与市民日常生活。

未来的防蚊技术或许更加智能。莫建初设想,将智能机器人、机器狗与诱蚊装置结合,实现24小时自动巡航监测和诱杀,实现环境中蚊子密度的持续下降。

在方卫国看来,从更大的尺度理解蚊子与环境的关系同样重要。“未来,我们希望做的是生态控制。”他说,“不仅仅是把蚊子杀死,而是把一个社区、一个村庄甚至一片农田作为整体来考虑。从农业生产到城市景观设计,都纳入统一的生态规划之中。”

在这些技术手段的上游,蚊虫的长期监测网络也正在织密。王金娜告诉记者,蚊虫监测网络已覆盖全省所有区县。在此基础上,更引入了智能监测技术,今年全省已设立36个蚊虫智能监测点。依托高清摄像头和智能识别系统,智能监测设备能够自动完成蚊子计数、种类鉴定和数据回传。一旦某地蚊子密度、种群结构出现异常变化,系统能及时预警。

人类最终能“战胜”蚊子吗?也许不能,也不该。蚊子在生态系统中扮演着传粉者和食物链一环的角色,而人类自身也是生态系统的一部分。

我们在重新定义这场“缠斗”,比起一味对抗,人类正在学着理解蚊子、利用规律、管理风险,并在不断变化的环境中,寻找一种更可持续的共存之道。

链接

### 浙江常见蚊子

在浙江,与人类“打交道”最密切的蚊子主要有以下几种:白纹伊蚊、淡色库蚊(致倦库蚊)、中华按蚊。它们长相不同、习性各异,传播疾病的“本事”也各有专攻。

白纹伊蚊——凶悍的“白天刺客”



白纹伊蚊。

图源视觉中国

中小型蚊子,大多数身体为黑色,背上有白纵条,足上有明显白环。与其他蚊子不同,白纹伊蚊白天活动,尤其喜欢在早晨和黄昏出没,攻击性强,是登革热、基孔肯雅热的主要传播媒介。人被白纹伊蚊叮咬后瘙痒感剧烈。白纹伊蚊喜欢干净的小水体,花盆托盘、废弃轮胎、树洞积水等都是它们的理想孳生地。

淡色库蚊(致倦库蚊)——烦人的“暗夜歌王”



淡色库蚊。

图源视觉中国

常见的室内蚊子,体型中等,呈淡褐色。它主要在夜间活动,趁人入睡后在耳边嗡嗡作响。淡色库蚊偏好污水环境,下水道、污水沟是其主要孳生地,在人类居住区周边的各种积水中都能繁殖。它是班氏丝虫病的重要传播媒介。

中华按蚊——潜伏的“稻田悍匪”



中华按蚊。浙江省疾病预防控制中心供图

体型较大,翅上有白斑,降落时身体与墙面呈明显的斜角,这是按蚊最典型的辨识特征。中华按蚊夜间活动,主要在稻田、池塘、溪流等清水环境中孳生,农村和郊区多见。它是疟疾的重要传播媒介。

**防蚊小提醒:**不同蚊种的活动时间和孳生环境各不相同。预防登革热,重点是清理室内外小型积水容器;预防乙脑和疟疾,需注意黄昏和夜间防护。在野外活动时穿长袖长裤、使用含避蚊胺的驱蚊剂。认清蚊子,才能更有针对性地防蚊。

(本报记者 林晓晖 整理)