

成蚊糖餐行为及其在蚊虫防制中的应用

于保庭, 黄舒奇, 丁艳梅, 莫建初*

(浙江大学昆虫科学研究所, 农业部农业昆虫学重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 蚊虫作为重要的病媒生物, 其大多数种类在成虫阶段需要取食糖餐, 且对不同糖餐组分表现出不同偏好。同时, 糖餐行为具有特定的时辰节律。野外条件下, 不同成蚊对不同开花植物及其果实具有不同的偏好, 不同糖餐植物对成蚊的存活率、寿命、繁殖力的影响各不相同。成蚊对糖餐的定位与植物挥发物有关, 目前已有多种糖餐植物的活性挥发物被鉴定。含毒糖诱剂对多种成蚊具有良好的防治效果, 人们已将其用于多种病媒生物的防治及蚊媒病毒的检测。利用糖餐植物挥发物研发出蚊虫引诱剂, 在降低蚊媒疾病风险方面具有广阔的应用前景。本文对成蚊取食糖餐的习性、成蚊偏好的糖餐植物相关研究以及如何利用成蚊的糖餐行为来进行蚊虫防制等进行了综述。

关键词: 蚊虫; 成蚊; 糖餐行为; 糖源植物; 偏好性; 植物信息化合物; 蚊虫防制

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2015)02-0217-06

Sugar feeding behavior of adult mosquitoes and its application in mosquito management

YU Bao-Ting, HUANG Shu-Qi, DING Yan-Mei, MO Jian-Chu* (Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Entomology, Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As important disease vectors, most mosquitoes need to take sugar meals in their adult stage, and they show distinct preferences for different constituents of sugar meals. Meanwhile, specific circadian rhythms are observed in their sugar-feeding behaviors. Under field conditions, mosquitoes show preferences for different flowering plants and seed pods, which in turn have significant effects on their survival, longevity and fecundity. The volatile organic compounds produced by nectar plants play important roles in directing mosquitoes' location of their sugar hosts, and several electrophysiological active volatile compounds have been identified. Application of attractive toxic sugar baits shows a significant effect on controlling different kinds of mosquitoes. Besides, the sugar-feeding behaviors of vectors have been applied in controlling other disease vectors and detection of vector-borne pathogens successfully. Development of mosquito-specific bait traps on the basis of volatile compounds produced by nectar plants will be promising in decreasing the risk of population of vector-borne diseases. In this article, we reviewed the sugar-feeding behavior of adult mosquitoes, the research about preferred host plants of mosquitoes and the mosquito management methods by means of mosquito sugar feeding behavior.

Key words: Mosquito; adult mosquito; sugar-feeding behavior; nectar plants; preference; plant semiochemicals; mosquito management

蚊虫是重要的病媒昆虫, 它们传播疟疾、丝虫病、登革热、黄热病等多种全球流行性疾病, 在非洲每年因感染疟疾而死亡的就有上百万人 (Takken and Verhulst, 2013)。目前, 人们主要通过施用杀虫剂控制蚊虫种群数量来降低蚊媒疾病风险。但由于蚊虫抗药性和环境污染等问题, 杀虫剂的使用受到了越来越多的限制。因此, 开发高效、安全、环保的

蚊虫控制新技术便成为蚊媒疾病控制方面的研究热点。

成蚊在搜寻配偶、完成交配、叮咬宿主、觅水产卵等生命活动过程中, 需要取食糖餐来补充能量 (Foster, 1995)。糖餐不仅影响成蚊的寿命、种群数量、生殖营养和发育状况, 而且还影响成蚊的宿主搜寻能力及疾病传播能力 (Foster, 1995; Gu *et al.*,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81271873)

作者简介: 于保庭, 男, 1989 年 10 月生, 山东苍山人, 博士研究生, 研究方向为城市昆虫学, E-mail: yubaoting123@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mojianchu@zju.edu.cn

收稿日期 Received: 2014-10-11; 接受日期 Accepted: 2014-01-02

2011)。过去的 10 年中,国内外对成蚊的糖餐习性做了较为深入的研究,建立了多种利用成蚊糖餐行为防治蚊虫的方法(Müller *et al.*, 2008; Schlein and Müller, 2008; Müller *et al.*, 2010a; Xue *et al.*, 2011; Qualls *et al.*, 2012; Stewart *et al.*, 2013; Nyasembe *et al.*, 2014)。本文对成蚊取食糖餐的习性、成蚊偏好的糖餐植物相关研究以及如何利用成蚊的糖餐行为来进行蚊虫防制等方面进行综述,以期为国内相关研究提供参考。

1 成蚊的糖餐行为

1.1 成蚊糖餐需求

目前普遍认为,大多数种类的雄蚊羽化后即需取食糖餐,而雌蚊在取食血餐前也需摄取糖分以满足飞行、交配、搜寻血餐宿主等生命活动的能量需求(Foster, 1995)。自然条件下成蚊主要通过吸食植物的花蜜、半翅目昆虫(如蚜虫)分泌的蜜露、受伤或腐烂的果实以及植物伤口分泌的汁液来获取糖分(Müller *et al.*, 2010a, 2011),而在栖境恶劣、植物稀少的情况下,它们通过刺吸健康植物韧皮部的汁液来获取维持生命活动所必需的能量(Müller and Schlein, 2005)。实验表明,冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae* 雄蚊需要及时多次取食花蜜或其他糖餐以达到性成熟,在无法获取糖餐的情况下其寿命显著缩短,且阻碍其与雌蚊交配,进而导致种群数量锐减(Gary *et al.*, 2009; Stone *et al.*, 2009)。骚扰库蚊 *Culex molestus* 在无法获取糖分时,其雄蚊寿命缩短导致无法交配,此外雌蚊没有摄食糖分会使得卵筏变小(Kassim *et al.*, 2012)。在野外条件下,向白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 成蚊提供蔗糖溶液,能显著延长其寿命并促进交配(Bellini *et al.*, 2014)。

1.2 成蚊取食糖餐频率及时辰节律

成蚊取食糖餐频率与蚊虫种类、自身营养状况、糖源丰富度以及周围环境条件等因素有关(Foster, 1995)。实验室养殖条件下以 20% 蔗糖溶液喂食冈比亚按蚊,其雄蚊羽化 1 d 内即需取食,平均每晚取食 2 次,持续 17 d 以上;雌蚊平均每 4 d 取食一次糖餐,成功吸食血餐后 2 d 内并不取食糖餐,而在产卵或下次吸血前取食糖餐频率增加,当不提供血餐宿主或产卵场所时,其取食糖餐频率增加至每天一次(Gary and Foster, 2006)。野外条件下,目前认为大多数种类的雄蚊平均每 1~2 d 取食一次糖餐,而喜食人血的成熟雌蚊平均 6~9 d 取食一次糖餐,喜食

动物血的雌蚊平均每 3~4 d 取食一次糖餐(Stone and Foster, 2013)。

成蚊取食糖餐行为具有显著的时辰节律。冈比亚按蚊进食糖餐的时间多集中在午夜之前及次日清晨(Gary and Foster, 2006; Marshall *et al.*, 2013)。室内观察发现埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 雌雄蚊均多集中在黄昏摄食糖餐(Chadee *et al.*, 2014)。野外观察到白纹伊蚊和尖音库蚊 *Culex pipiens* 开始取食同种糖餐植物长角豆 *Ceratonia siliqua* 的时间以及进食时长均不相同(Müller *et al.*, 2010c)。

1.3 成蚊摄取糖餐组分的偏好性

成蚊摄取的糖餐组分主要包括糖源植物蜜腺中的蔗糖、果糖和葡萄糖等糖分及各种氨基酸、无机盐和生物碱等次生物质,以及半翅目昆虫分泌的蜜露中所含的各种寡聚糖(Ignell *et al.*, 2010; Stone and Foster, 2013)。Ignell 等(2010)研究埃及伊蚊对不同组分糖餐的取食选择时发现,埃及伊蚊对二糖的偏好性明显高于单糖,且喜好程度与糖溶液浓度呈正相关;添加氯化钠、氨基酸等组分一般情况下并不能增加其对糖的偏好性,且添加奎宁等次生物质甚至会降低埃及伊蚊对糖溶液的喜好。

2 成蚊偏好的糖餐植物相关研究

2.1 成蚊偏好的糖餐植物种类

自然条件下,不同种类的成蚊对不同种类的开花植物、果实、蜜露等糖源表现出明显不同的偏好性。Müller 和 Schlein(2006)野外调查发现萨氏按蚊 *Anopheles sergentii* 偏好拉登金合欢 *Acacia raddiana*、尼罗河怪柳 *Tamarix nilotica* 以及长尾草 *Ochradenus baccatus*,而怪柳属植物 *Tamarix jordanis*、蓼属植物 *Polygonum equisetiforme* 和金合欢 *Acacia saligna* 对尖音库蚊表现出明显引诱效果(Schlein and Müller, 2008)。白纹伊蚊明显偏好怪柳 *Tamarix chinensis*、穗花牧荆 *Vitex agnuscastus*、牡豆 *Prosopis farcta* 等开花植物和损伤的长角豆,而对 3 种不同蚜虫分泌的蜜露无明显偏好性差异(Müller *et al.*, 2011a)。在非洲马里地区对冈比亚按蚊糖餐植物进行的野外调查结果表明,在 26 种供试果实中,雌雄蚊分别对 6 种果实表现出偏好性,其中番石榴 *Psidium guajava* 和香瓜 *Cucumis melo* 对雌雄蚊均有明显的引诱力;在 26 种供试的开花植物中,雌蚊对 6 种开花植物、雄蚊对 7 种开花植物表现出明显偏好,其中阿拉伯刺槐 *Acacia macrostachya* 的引诱力

最强(Müller *et al.*, 2010a)。Gouagna 等(2014)室内条件下测试阿拉伯按蚊 *Anopheles arabiensis* 雄蚊对 10 种开花植物的偏好性,结果发现其对金露花 *Duranta erecta* 和长穗木 *Stachytarpheta urticifolia* 表现出明显偏好。此外,成蚊对糖餐植物种类偏好性与其地理分布也有一定关系。冈比亚按蚊在东非国家肯尼亚偏好银胶菊 *Parthenium hysterophorus*、黄钟花 *Tecoma stans*、蓖麻 *Ricinus communis* 以及番泻叶 *Senna didymobotrya*(Manda *et al.*, 2007b),在西非国家布基纳法索则更喜好开花的芒果 *Mangifera indica*、黄花夹竹桃 *Thevetia neriifolia*、铁刀木 *Senna siamea* 等植物(Gouagna *et al.*, 2010)。

2.2 不同植物糖餐对成蚊生长发育和生殖的影响

成蚊对于不同糖餐植物的摄食频率以及摄入量具有显著区别,进而其寿命、存活率和发育情况均明显不同。研究发现,冈比亚按蚊取食不同植物的花蜜和半翅目昆虫分泌的蜜露时,它们的寿命有明显的差异,且寿命长短与糖餐植物的含糖量呈正相关(Gary and Foster, 2004; Impoinvil *et al.*, 2004)。阿拉伯按蚊雄蚊对不同糖餐植物的摄食量与其偏好程度呈正相关,且取食糖餐后的营养储备取决于糖餐植物的种类(Gouagna *et al.*, 2014)。此外,从不同的植物获取糖餐对冈比亚按蚊的生殖营养也有影响。Manda 等(2007a)采用不同开花植物作为冈比亚按蚊的糖源,结果发现冈比亚按蚊从偏好的植物上获得糖餐时寿命明显延长,且其吸血后的产卵量显著高于其他处理。蜜腺中的氨基酸虽不足以促进和支持成蚊卵的发育,但是却能延长致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus* 雌蚊的寿命(Vrzal *et al.*, 2010),而脯氨酸甚至可为埃及伊蚊的飞行提供能量(Scaraffia and Wells, 2003)。

2.3 成蚊糖餐植物活性化合物研究

目前普遍认为成蚊在搜寻糖餐植物时,在较远处主要依靠植物挥发的活性化学物质对其进行定位;到达距其 1~2 m 的范围内,则根据开花植物的颜色等视觉信息来对其进行准确定位(Stone and Foster, 2013)。植物产生的挥发性活性物质主要用于吸引传粉者、对植食者的直接和间接防御以及自身的代谢过程等(Nysembe and Torto, 2014)。当前的研究显示,在全球范围内仅有一种玉凤兰 *Habenaria obtusata* 和黄雪轮 *Silene otites* 可以通过成蚊进行有效地传粉(Jhumur *et al.*, 2006)。虽然成蚊能通过糖餐植物所释放的活性化合物来搜寻糖餐植物获取糖分,但大多数糖餐植物的挥发物活性成

分与成蚊种类之间的关联并不具有特异性(Jhumur *et al.*, 2006)。

长期以来,如何从成蚊偏好的糖餐植物中筛选出对成蚊具有特异引诱活性的化合物一直是研究的热点。随着植物挥发物收集和分析技术的不断改进以及电生理技术的广泛应用,越来越多的活性化合物被鉴定出来。Jhumur 等(2007, 2008)利用气相色谱-昆虫触角电位仪研究了骚扰库蚊和埃及伊蚊对黄雪轮花挥发物的电生理活性和行为反应,发现两种蚊子对黄雪轮的 14 种挥发物都能产生电生理反应,其中苯乙酮、芳樟醇氧化物、苯乙醛、苯乙醇、(Z)-乙酸-3-己烯酯等化合物的激发效果最强。Otienoburu 等(2012)对尖音库蚊偏好的西亚马利筋 *Asclepias syriaca* 花序戊烷提取物进行了研究,发现其中的苯甲醛、苯乙醛和(E)-2-壬烯醛是引诱尖音库蚊的活性成分。Nysembe 等(2012)研究了冈比亚按蚊对银胶菊、鬼针草 *Bidens pilosa* 和蓖麻 3 种植物的偏好性,发现冈比亚按蚊对己醛、 β -蒎烯、柠檬烯、 β -罗勒烯、芳樟醇氧化物和(E)- β -法呢烯表现出电生理活性和行为反应。这说明这些植物挥发物在成蚊定位糖餐植物的过程中发挥着十分重要的作用。

3 成蚊糖餐行为在蚊虫防制中的应用

根据成蚊在自然条件下需要取食糖餐的生活习性,国外研究者设计了一种含毒糖诱剂,这种糖类饵剂以开花植物或果实的香味作为引诱剂,以糖溶液作为诱食剂,并加入少量杀虫剂,在降低环境中成蚊的种群数量方面具有显著的效果(Müller *et al.*, 2010e)。野外条件下通过向蚊虫栖境中的糖餐植物喷洒含毒糖诱剂,可在短时间内将蚊虫种群数量降低 90% 以上,并且显著降低雌蚊的寿命和推迟其卵巢发育(Müller *et al.*, 2010a)。这种方法已成功运用在野外环境中冈比亚按蚊、尖音库蚊、萨氏按蚊、里海伊蚊 *Aedes caspius*、白纹伊蚊等成蚊防治工作中(Schlein and Müller, 2008; Müller *et al.*, 2008, 2010b, 2010d, 2010e; Xue *et al.*, 2011)。通过在城市地下排水管道以及水井和蓄水池等蚊虫孳生地悬挂含毒糖诱剂,可以消灭包括致倦库蚊、白纹伊蚊及灾难按蚊 *Anopheles crucians* 在内的蚊虫种群数量 90% 以上的个体(Müller *et al.*, 2010c; Qualls *et al.*, 2012)。在非洲通过室内通过悬挂含毒糖诱剂,结合化学药剂浸泡蚊帐,可在高效降低成蚊数量的同

时,有助于延缓其抗药性的形成 (Stewart *et al.*, 2013)。

糖餐植物产生的活性挥发物在成蚊定位糖源过程中发挥着重要作用,随着越来越多的活性化合物被鉴定出来,如何由此开发出高效引诱剂成为当前研究的热点。Nyasembe 等 (2014) 将芳樟醇氧化物、罗勒烯、蒎烯等化合物做成气味引诱剂在野外条件下进行冈比亚按蚊引诱试验,结果发现其引诱效果相当于动物源气味引诱剂引诱效果,而将植物源气味引诱剂与动物源气味引诱剂结合使用会降低引诱效果,此外引诱剂加入二氧化碳反而会降低对雄蚊及饱血雌蚊的引诱效果。

成蚊取食糖餐时会分泌唾液,在此过程中会释放出病毒以及疟疾孢子体等病原物,利用其糖餐行为可以在成蚊数量及蚊媒疾病暴发前对其进行有效的监测 (Stone and Foster, 2013)。Hall-Mendelin 等 (2010) 在野外条件下于成蚊诱捕装置内放置浸泡了蔗糖溶液的脱脂棉,每周对蔗糖溶液中的病毒 RNA 进行检测,可简单、有效地监测成蚊携带病毒的情况。Lothrop 等 (2012) 将糖溶液与苯乙醛结合引诱环跗库蚊 *Culex tarsalis* 雌蚊,可成功检测西尼罗河病毒传播情况。此外,研究者以糖溶液作为载体,成功将细菌转入蚊中肠 (Lindh *et al.*, 2006)。运用外来细菌可以干扰成蚊肠道微生物群落结构,进而影响成蚊的生长发育 (Stone and Foster, 2013)。这些新技术将在降低成蚊种群数量、减少蚊媒疾病发生方面将发挥重要的作用。

4 结语与展望

糖餐作为成蚊完成生命活动所需能量的重要来源,长期以来受到研究者的广泛关注,如何根据成蚊糖餐行为有效控制蚊虫种群数量、降低蚊媒疾病发生风险成为人们研究的热点。通过野外调查,研究者已鉴定出多种成蚊偏好的糖餐植物,并开发出多种利用成蚊糖餐行为进行蚊虫防制及蚊媒病毒检测的方法。然而,不同环境下的不同蚊种是否都需取食糖餐,糖餐与血餐之间是否存在拮抗作用,自然条件下雌蚊的取食选择,以及成蚊如何成功定位糖餐植物等问题都需要更深入的研究。

在蚊虫防制策略中,成蚊诱捕装置因其安全环保的特点而得到广泛应用。目前诱捕装置多根据成蚊对特定光谱的趋性、血餐宿主释放的二氧化碳和辛烯醇等化合物以及产卵场所散发的挥发性物质设

计而成,多数情况下仅能捕获特定发育阶段的雌蚊,对新羽化成蚊、成熟雄蚊、生殖营养周期内雌蚊和即将滞育的成蚊引诱效果不佳 (Foster, 2008)。利用成蚊糖餐植物活性挥发物设计诱捕装置可以在蚊虫发生季节对各时期的雌雄成蚊始终具有引诱力,因而具有更加广阔的应用前景。目前已鉴定出多种对成蚊表现出电生理活性及行为活性的化合物,但是如何筛选成蚊高效特异性信息化合物,以及如何保持糖餐引诱剂的高效性和持久性,将是开发此类诱捕装置亟需解决的难题。

研究者在野外条件下通过向成蚊偏好的草本植物喷洒混有少量杀虫剂的糖溶液,在干旱和半干旱地区成功降低了成蚊种群数量,在蚊虫孳生地悬挂含毒糖诱剂同样取得显著效果,而在植被丰富地区的防治效果则有待进一步研究。此外喷洒含毒糖溶液对环境其他有益生物的影响同样值得关注。Khallaayoune 等 (2013) 在野外条件下向非开花绿色植物喷洒混有呋虫胺的糖溶液后调查发现 3 周内可将成蚊数量降低 70%,而对授粉昆虫并无显著影响,其室内试验同样证实其对狼蛛和步甲等捕食性天敌无致死效果,显示出含毒糖溶液在蚊虫防治中的良好应用前景。

大多数的吸血双翅目昆虫都需要摄食糖分,其中包括蚊科、蠓科、蚋科、虻科以及一些蝇科昆虫 (Stone and Foster, 2013)。因而,糖餐在蚊虫之外的其他一些重要的卫生害虫和城市昆虫生命活动中同样具有重要作用。野外条件下通过向草本植物喷洒含毒糖溶液已经对巴氏白蛉 *Phlebotomus papatasi* 表现出良好的防治效果 (Müller and Schlein, 2011),实验室条件下用糖溶液作为德国小蠊 *Blattella germanica* 的诱食剂则可显著减少杀虫剂用量 (Gore and Schal, 2004)。利用昆虫摄食糖餐的习性,在糖溶液中加入少量杀虫剂,为提升杀虫效率、减少杀虫剂用量、延缓抗药性形成提供了新思路。

参考文献 (References)

- Bellini R, Puggioli A, Balestrino F, Brunelli P, Medici A, Urbanelli S, Carrieri M, 2014. Sugar administration to newly emerged *Aedes albopictus* males increases their survival probability and mating performance. *Acta Trop.*, 132S: S116 – S123.
- Chadee DD, Sutherland JM, Gilles JRL, 2014. Diel sugar feeding and reproductive behaviours of *Aedes aegypti* mosquitoes in Trinidad: with implications for mass release of sterile mosquitoes. *Acta Trop.*, 132S: S86 – S90.
- Foster WA, 1995. Mosquito sugar feeding and reproductive energetics.

- Annu. Rev. Entomol.*, 40(1): 443–474.
- Foster WA, 2008. Phytochemicals as population sampling lures. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 24(1): 138–146.
- Gary RE Jr, Cannon JW III, Foster WA, 2009. Effect of sugar on male *Anopheles gambiae* mating performance, as modified by temperature, space, and body size. *Parasit. Vectors*, 2: 19.
- Gary RE Jr, Foster WA, 2004. *Anopheles gambiae* feeding and survival on honeydew and extra-floral nectar of peridomestic plants. *Met. Vet. Entomol.*, 18(2): 102–107.
- Gary RE Jr, Foster WA, 2006. Diel timing and frequency of sugar feeding in the mosquito *Anopheles gambiae*, depending on sex, gonotrophic state and resource availability. *Med. Vet. Entomol.*, 20(3): 308–316.
- Gore JC, Schal C, 2004. Laboratory evaluation of boric acid-sugar solutions as baits for management of German cockroach infestations. *J. Econ. Entomol.*, 97(2): 581–587.
- Gouagna LC, Kerampran R, Lebon C, Brengues C, Toty C, Wilkinson DA, Boyer S, Fontenille D, 2014. Sugar-source preference, sugar intake and relative nutritional benefits in *Anopheles arabiensis* males. *Acta Trop.*, 132: S70–S79.
- Gouagna LC, Poueme RS, Dabiré KR, Ouédraogo JB, Fontenille D, Simard F, 2010. Patterns of sugar feeding and host plant preferences in adult males of *An. gambiae* (Diptera: Culicidae). *J. Vector Ecol.*, 35(2): 267–276.
- Gu W, Müller G, Schlein Y, Novak RJ, Beier JC, 2011. Natural plant sugar sources of *Anopheles* mosquitoes strongly impact malaria transmission potential. *PLoS ONE*, 6(1): e15996.
- Hall-Mendelin S, Ritchie SA, Johansen CA, Zborowski P, Cortis G, Dandridge S, Hall RA, van den Hurk AF, 2010. Exploiting mosquito sugar feeding to detect mosquito-borne pathogens. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107(25): 11255–11259.
- Ignell R, Okawa S, Englund JE, Hill SR, 2010. Assessment of diet choice by the yellow fever mosquito *Aedes aegypti*. *Physiol. Entomol.*, 35(3): 274–286.
- Impoinvil DE, Kongere JO, Foster WA, Njiru BN, Killeen GF, Githure JI, Beier JC, Hassanali A, Knols BGJ, 2004. Feeding and survival of the malaria vector *Anopheles gambiae* on plants growing in Kenya. *Med. Vet. Entomol.*, 18(2): 108–115.
- Jhumur US, Dötterl S, Jürgens A, 2006. Naïve and conditioned responses of *Culex pipiens pipiens* biotype *molestus* (Diptera: Culicidae) to flower odors. *J. Med. Entomol.*, 43(6): 1164–1170.
- Jhumur US, Dötterl S, Jürgens A, 2007. Electrophysiological and behavioural responses of mosquitoes to volatiles of *Silene otites* (Caryophyllaceae). *Anthropod-Plant Interact.*, 1(4): 245–254.
- Jhumur US, Dötterl S, Jürgens A, 2008. Floral odors of *Silene otites*: their variability and attractiveness to mosquitoes. *J. Chem. Ecol.*, 34(1): 14–25.
- Kassim NFA, Webb CE, Russell RC, 2012. The importance of males: larval diet and adult sugar feeding influences reproduction in *Culex molestus*. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 28(4): 312–316.
- Khallaayoune K, Qualls WA, Revay EE, Allan SA, Arheart KL, Kravchenko VD, Xue RD, Schlein Y, Beier JC, Müller GC, 2013. Attractive toxic sugar baits: control of mosquitoes with the low-risk active ingredient dinotefuran and potential impacts on nontarget organisms in Morocco. *Environ. Entomol.*, 42(5): 1040–1045.
- Lindh JM, Terenius O, Eriksson-Gonzales K, Knols BGJ, Faye I, 2006. Re-introducing bacteria in mosquitoes – a method for determination of mosquito feeding preferences based on coloured sugar solutions. *Acta Trop.*, 99(2): 173–183.
- Lothrop HD, Wheeler SS, Fang Y, Reisen WK, 2012. Use of scented sugar bait stations to track mosquito-borne arbovirus transmission in California. *J. Med. Entomol.*, 49(6): 1466–1472.
- Manda H, Gouagna LC, Foster WA, Jackson RR, Beier JC, Githure JI, Hassanali A, 2007a. Effect of discriminative plant-sugar feeding on the survival and fecundity of *Anopheles gambiae*. *Malaria J.*, 6(1): 113.
- Manda H, Gouagna LC, Nyandat E, Kabiru EW, Jackson RR, Foster WA, Githure JI, Beier JC, Hassanali A, 2007b. Discriminative feeding behaviour of *Anopheles gambiae* s. s. on endemic plants in western Kenya. *Med. Vet. Entomol.*, 21(1): 103–111.
- Marshall JM, White MT, Ghani AC, Schlein Y, Muller GC, Beier JC, 2013. Quantifying the mosquito's sweet tooth: modelling the effectiveness of attractive toxic sugar baits (ATSB) for malaria vector control. *Malaria J.*, 12(1): 291.
- Müller G, Schlein Y, 2005. Plant tissues: the frugal diet of mosquitoes in adverse conditions. *Med. Vet. Entomol.*, 19(4): 413–422.
- Müller G, Schlein Y, 2006. Sugar questing mosquitoes in arid areas gather on scarce blossoms that can be used for control. *Int. J. Parasitol.*, 36(10): 1077–1080.
- Müller GC, Beier JC, Traore SF, Toure MB, Toure MM, Bah S, Doumbia S, Schlein Y, 2010a. Field experiments of *Anopheles gambiae* attraction to local fruits/seedpods and flowering plants in Mali to optimize strategies for malaria vector control in Africa using attractive toxic sugar bait methods. *Malaria J.*, 9: 262.
- Müller GC, Beier JC, Traore SF, Toure MB, Traore MM, Bah S, Doumbia S, Schlein Y, 2010b. Successful field trial of attractive toxic sugar bait (ATSB) plant-spraying methods against malaria vectors in the *Anopheles gambiae* complex in Mali, West Africa. *Malaria J.*, 9(1): 210.
- Müller GC, Junnila A, Qualls W, Revay EE, Kline DL, Allan S, Schlein Y, Xue RD, 2010c. Control of *Culex quinquefasciatus* in a storm drain system in Florida using attractive toxic sugar baits. *Med. Vet. Entomol.*, 24(4): 346–351.
- Müller GC, Junnila A, Schlein Y, 2010d. Effective control of adult *Culex pipiens* by spraying an attractive toxic sugar bait solution in the vegetation near larval habitats. *J. Med. Entomol.*, 47(1): 63–66.
- Müller GC, Kravchenko VD, Schlein Y, 2008. Decline of *Anopheles sergentii* and *Aedes caspius* populations following presentation of attractive toxic (spinosad) sugar bait stations in an oasis. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 24(1): 147–149.
- Müller GC, Schlein Y, 2011. Different methods of using attractive sugar baits (ATSB) for the control of *Phlebotomus papatasi*. *J. Vector Ecol.*, 36: S64–S70.

Müller GC, Xue RD, Schlein Y, 2010e. Seed pods of the carob tree *Ceratonia siliqua* are a favored sugar source for the mosquito *Aedes albopictus* in coastal Israel. *Acta Trop.*, 116(3): 235 – 239.

Müller GC, Xue RD, Schlein Y, 2011. Differential attraction of *Aedes albopictus* in the field to flowers, fruits and honeydew. *Acta Trop.*, 118(1): 45 – 49.

Nyasembe VO, Tchouassi DP, Kirwa HK, Foster WA, Teal PEA, Borgemeister C, Torto B, 2014. Development and assessment of plant-based synthetic odor baits for surveillance and control of malaria vectors. *PLoS ONE*, 9(2): e89818.

Nyasembe VO, Teal PEA, Mukabana WR, Tumlinson JH, Torto B, 2012. Behavioural response of the malaria vector *Anopheles gambiae* to host plant volatiles and synthetic blends. *Parasit. Vectors*, 5: 234.

Nyasembe VO, Torto B, 2014. Volatile phytochemicals as mosquito semiochemicals. *Phytochem. Lett.*, 8: 196 – 201.

Otienoburu PE, Ebrahimi B, Phelan PL, Foster WA, 2012. Analysis and optimization of a synthetic milkweed floral attractant for mosquitoes. *J. Chem. Ecol.*, 38(7): 873 – 881.

Qualls WA, Xue R, Revay EE, Allan SA, Müller GC, 2012. Implications for operational control of adult mosquito production in cisterns and wells in St. Augustine, FL using attractive sugar baits. *Acta Trop.*, 124(2): 158 – 161.

Scaraffia PY, Wells MA, 2003. Proline can be utilized as an energy substrate during flight of *Aedes aegypti* females. *J. Insect Physiol.*, 49(6): 591 – 601.

Schlein Y, Müller GC, 2008. An approach to mosquito control: using the dominant attraction of flowering *Tamarix jordanis* trees against *Culex pipiens*. *J. Med. Entomol.*, 45(3): 384 – 390.

Stewart ZP, Oxborough RM, Tungu PK, Kirby MJ, Rowland MW, Irish SR, 2013. Indoor application of attractive toxic sugar bait (ATSB) in combination with mosquito nets for control of pyrethroid-resistant mosquitoes. *PLoS ONE*, 8(12): e84168.

Stone CM, Foster WA, 2013. Plant-sugar feeding and vectorial capacity. In: Takken W, Koenraadt CJM eds. *Ecology of Parasite-vector Interactions*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen. 35 – 79.

Stone CM, Taylor RM, Roitberg BD, Foster WA, 2009. Sugar deprivation reduces insemination of *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae), despite daily recruitment of adults, and predicts decline in model populations. *J. Med. Entomol.*, 46(6): 1327 – 1337.

Takken W, Verhulst NO, 2013. Host preferences of blood-feeding mosquitoes. *Annu. Rev. Entomol.*, 58: 433 – 453.

Vrzal EM, Allan SA, Hahn DA, 2010. Amino acids in nectar enhance longevity of female *Culex quinquefasciatus* mosquitoes. *J. Insect Physiol.*, 56(11): 1659 – 1664.

Xue RD, Müller GC, Kline DL, Barnard DR, 2011. Effect of application rate and persistence of boric acid sugar baits applied to plants for control of *Aedes albopictus*. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 27(1): 56 – 60.

(责任编辑: 袁德成)