

黑水虻研究进展

刘宏宇¹ 喻国辉² 夏 婧^{1*}

1. 遵义医学院珠海校区 / 贵州省免疫学研究生教育创新基地, 广东珠海 519041;

2. 广东省珠海市现代农业发展中心, 广东珠海 519075

摘要 黑水虻学名亮斑扁角水虻(*Hermitia illucens* L.), 其幼虫主要用于禽畜粪便及餐厨垃圾的处理, 为目前最具应用前景的资源昆虫。本文主要从黑水虻的生物学特性、黑水虻生长发育影响研究、黑水虻的抗逆性研究及黑水虻的应用研究四个方面对其进行综述, 为黑水虻无害化处理餐厨垃圾及粪便技术推广提供文献依据。

关键词 黑水虻; 生物学特性; 生长发育; 抗逆性; 应用研究

黑水虻(*Hermitia illucens* L.), 英文名称 Black soldier fly, 是双翅目水虻科扁角水虻属研究最多的一种资源昆虫。其幼虫以动物粪便、腐烂的水果及蔬菜等为食, 食性杂, 食量大, 生活史重叠, 抗逆性强, 在化蛹前有迁徙等习性^[1]。因此, 许多国家利用黑水虻幼虫进行禽畜粪便及餐厨垃圾的无害化处理。黑水虻幼虫无害化处理后的副产品亦有极高的利用及研发价值, 可以加工制成动物饲料添加剂^[2]提取抗菌肽^[3]、提炼生物柴油^[4]等。因此, 黑水虻无害化处理粪便及餐厨垃圾具有较大的社会效益及经济效益。为了促进黑水虻无害化处理餐厨垃圾及粪便技术的推广, 本文从黑水虻生物学特性、影响黑水虻生长发育繁殖因素、抗逆性及应用研究方面对其一一进行综述。

1 黑水虻的生物学特性

1) 卵。黑水虻的卵以卵块形式产生。1 个卵块可以包含 1 062 个卵。卵的外形为长椭圆形, 光洁并呈现乳白色。大小约 1.4 mm × 0.4 mm。卵的历期因季节、地区和温度差异而变化, 一般 4 ~ 14 d。阿根廷黑水虻的卵孵化需要 4 ~ 6 d; 在新西兰的室温下, 黑水虻的卵在 2 月需要 5 d 孵化, 在 4 月需要 7 ~ 14 d 孵化; 黑水虻的卵在 24 °C 需要 4.3 d 孵化, 72 h 时出现红色眼点, 84 h 时出现胚胎的运

动。在孵化前 2 h, 卵壳变得柔软和半透明, 可以清晰地辨认出幼虫的性状, 可以看见幼虫的体节、主要的气管干和着色的头部、单眼等。孵化一般在 10 min 内完成, 幼虫使用上颌钩在卵壳上打洞, 头先从洞中出来, 并利用上颌钩帮助身体运动, 由薄膜状透明的卵壳中脱出。

2) 幼虫。幼虫有 6 个龄期, 通过腹部侧面一排排直立刚毛和牙状突起介导进行波浪状移动。刚孵化的幼虫呈乳白色, 头部栗色, 大小约 1.8 mm × 0.4 mm, 1 ~ 4 龄幼虫体色均为乳白色。实验室饲养黑水虻在卵孵化 11 d 后进入 5 龄, 蜕皮 1 ~ 2 d 后, 表皮变得粗糙, 体色黑或灰黄。卵孵化后 18 d 进入 6 龄幼虫即预蛹, 幼虫体色完全变黑, 软毛变得长而粗糙, 头部更加几丁质化, 单眼突出, 口器简化和固化, 即使长期缺乏水分, 这一龄期的幼虫仍然能够存活。在 21 ~ 28 °C 的变温环境里, 预蛹可以存活 2 周至 5 个月。

3) 蛹。黑水虻在幼虫表皮蜕即围蛹壳内度过蛹期, 蛹期在室内恒温下大约需要 9 ~ 10 d。在化蛹前, 预蛹垂直排列在饲料中, 将头部突出饲料的表面。化蛹后, 表皮变得更加坚硬, 腹部的末端两节弯向腹面。羽化时, 头部和第一胸节的表皮蜕脱落, 并在第 2 和 3 节中间裂开, 便于成虫爬出, 一般产卵后 50 d 可见到第一头成虫羽化。21 ~ 23 mm 的蛹

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260528)

* 通讯作者

刘宏宇, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 研究方向: 资源昆虫学。

羽化出的雌虫较多,而 17~18 mm 蛹羽化出的雄虫较多。

4)成虫。黑水虻成虫体型较大,体长可达 13~20 mm。头部黑色,在眼的附近有数量不等的微黄色小点,头顶宽阔,具有 2 个平坦的瘤状突起。触角具有竹片状的顶端,小盾板无突起,腹部第 2 节呈微透明的乳白色,与背面、侧面和中间的黑线分离,雄虫的白色部分较窄,雌虫的白色部分较宽,并且延伸到顶部的边缘,呈三角形,是脂肪体存在的场所。翅无花斑,活成虫具有蓝色的金属光泽,死后褪色成微暗色。跗节、基节和第 3 胫节呈现出显著的乳白色。黑水虻雌雄成虫的触角形状一致,2 个复眼分开,雄虫比雌虫小,可以通过生殖器官区分雌雄。

雄虫比雌虫早羽化 1~2 d,成虫在只供水的条件下可存活 10~14 d。在野外,黑水虻成虫主要依靠体内储存的脂肪维持生命,野生成虫体内脂肪含量占干物质的 35%。雌虫羽化后 2 d 出现卵母细胞,交配后 2 d 产卵。在野外,成虫产卵后体内脂肪耗尽,即死亡。黑水虻雌虫若不能在羽化后及时交配,将影响到卵块的大小,因为卵母细胞会被重新吸收用于支撑呼吸作用。

5)成虫的交配和产卵习性。黑水虻成虫交配必须在光照条件下进行,雄虫被雌虫所吸引,交配往往发生在地上,雌虫和雄虫交配时以尾部相对,头朝相反的方向。野生的黑水虻雄虫羽化后喜欢聚集在羽化场所周围的绿色植物上,等待雌虫羽化。每头雄虫占据各自的领地,对入侵的雄虫发起攻击,但欢迎雌虫的来访,并抓住进入其领地的雌虫交配。在野外,黑水虻成虫通常于潮湿正在分解的有机物上或周围的干燥缝隙中产卵,根据这些自然爱好,用具有褶皱孔隙的包装箱纸板设计一种产卵器引诱成虫产卵,解决了黑水虻人工饲养的一个重要技术。低温条件不利于黑水虻产卵,冬季黑水虻人工繁殖时,为了提高产卵率,将人造植物放于室内供黑水虻停落交配,交配率可达 69%。

6)天敌。关于黑水虻天敌的研究开展较少。黑水虻的寄生蜂(*Trichopria* sp)属于膜翅目锤角细蜂科,首次报道于乔治亚州南部的鸡舍中,寄生于黑水虻蛹上,生活周期平均为 32 d,从每个被寄生的黑水虻蛹中羽化出来的寄生蜂大约有 96 ± 21 头。夏季(6~9 月)寄生率为 21%~32%,冬季寄生率

0%~4%。该蜂不寄生家蝇的蛹和幼虫,虽然该寄生蜂能够利用黑水虻的幼虫或蛹饲养,但室内观察结果显示,成虫仅在黑水虻的蛹上产卵。

2 黑水虻生长发育影响研究

2.1 光照对黑水虻影响

光照对于黑水虻种群的繁衍尤为重要。阳光照射强度低于 $63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,黑水虻成虫不交配;阳光照射强度达到 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上时 75% 的成虫发生交配行为。研究表明,促进植物生长的 Gro-Lux 灯及 430 W 的 Pro 超轻型灯光系统照明均不能引诱成虫产卵;成虫的交配行为多发生在上午,且当光照强度高于 $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时成虫交配活跃。为了寻找在冬季或阴雨天可替代太阳光的人工光源,选用碘钨灯及稀土灯对黑水虻成虫的交配及产卵进行了研究。研究表明,500 W 碘钨灯照射下黑水虻成虫可成功交配并产卵,产卵高峰期卵量相当于太阳光照射强度下产卵量的 61%,孵化期、幼虫期及蛹期生活周期与太阳光照下无显著性差异,但稀土灯不能达到刺激黑水虻成虫产卵的效果。

2.2 温湿度对黑水虻的影响

黑水虻生长发育的适宜温度为 27~30 °C,温度过低黑水虻幼虫取食量减少,影响其生长发育,低于 26 °C 时成虫不产卵;温度过高可导致黑水虻幼虫停止取食,甚至死亡。湿度对黑水虻的生长发育亦至关重要,湿度达到 60% 以上时成虫才可产卵,人工饲料湿度在 70%~80% 之间时最适于黑水虻幼虫生长发育。研究表明,湿度降低至 50% 时将会影响幼虫体长、体重、幼虫发育时间及羽化时间等,当湿度降低至 30% 时幼虫将不能发育至蛹,饲养至第 13 天时大部分幼虫死亡^[5]。

2.3 重金属添加剂对黑水虻生长发育的影响

1)Zn 对黑水虻生长发育影响。Zn 做为生物体生长发育必需的微量元素之一,允许其在禽畜饲料中添加一定的剂量,但是由于某些人过于追求经济利益,使禽畜饲料中 Zn 含量严重超标,超标的 Zn 90%~95% 由粪便排出^[6]。当我们利用黑水虻幼虫去处理禽畜粪便时,将会对黑水虻幼虫生长发育产生一系列的影响,进而可能影响到黑水虻幼虫无害化处理禽畜粪便及餐厨垃圾的能力。研究表明,当人工饲料中 Zn^{2+} 浓度达 600 mg/kg 时即可显著降低 5

龄幼虫、预蛹及蛹的重量,延长黑水虻幼虫发育时间,且有世代累积效应^[7,8]。因此,黑水虻无害化处理粪便及餐厨垃圾系统中 Zn 浓度不可超过 600 mg/kg。但是,当 Zn²⁺ 处理浓度为 150 mg/kg 时可显著增加黑水虻幼虫、预蛹及蛹的体重;Zn²⁺ 处理浓度为 300 mg/kg 时可显著缩短幼虫发育时间^[7,8]。

2)Cu 对黑水虻生长发育影响。为了提高畜禽的免疫力,国家亦允许在畜禽饲料中添加一定量的 Cu,但饲料中超标的 Cu 亦有 90% 随粪便排出^[9],不仅对环境造成污染,而且对于处理禽畜粪便的昆虫亦产生影响。研究表明,当人工饲料中 Cu²⁺ 浓度达 600 mg/kg 时即显著影响黑水虻幼虫发育及蛹的羽化,使幼虫发育时间显著延长,羽化率与对照相比显著降低;Cu²⁺ 浓度达到 1 200 mg/kg 时可显著延长蛹发育时间,但对其存活率、化蛹率、成虫寿命及雌雄性比均无明显影响^[9],可能胁迫时间尚短,仅一个世代对这些指标的影响还未表现出来。

3 黑水虻抗逆性研究

黑水虻幼虫长期生活在腐败的有机质环境中,为了适应环境其幼虫、预蛹具备了良好抗逆特性,它可以抵抗环境中多变的有害因子的侵袭,如病原微生物、高盐、高渗透压等。研究表明,20% 的矿物油、乙醇和氯化钠溶液对黑水虻幼虫及预蛹基本无危害;且幼虫对高渗透压具有很好的抗性,在浓度为 100% 的矿物油中处理 5 h 幼虫死亡率小于 5%;预蛹可抵抗高盐的环境,在高盐环境下处理 5 h 死亡率亦小于 5%^[10]。

4 黑水虻应用研究

1)黑水虻集约化处理粪便研究。研究表明,利用 1 200 只黑水虻幼虫处理奶牛养殖场的粪便,可在 21 d 内将 1 248.6 g 牛粪消化为 273.4 g 干渣;残留下的干渣通过水解可以获得 96.2 g 糖;用牛粪饲养后的黑水虻幼虫利用石油醚抽提又可以提取出生物柴油,提取后的黑水虻幼虫还可以制成蛋白饲料^[11]。经黑水虻幼虫处理后的粪便没有臭味、质地疏松,肥力较好,其中,猪粪中 N 含量可减少 55.1%、P 含量减少 44.1%、K 含量减少 52.8%、Ca 含量减少 56.2%、Mg 含量减少 41.2%^[2];利用黑水虻幼虫处理的粪便施肥可以明显提高牧草的产量。黑水虻在取食时不仅可以降低粪便的恶臭,还可有效控

制家蝇的滋生,并且使粪便中大肠杆菌和沙门氏菌的数量降低 2 000 倍以上。因此,在卫生设施不健全的地方黑水虻有着卓越的贡献,它可以减少病原微生物的数量,从而控制因为污水处理系统不健全而引起的腹泻等疾病的蔓延^[12]。

2)黑水虻幼虫处理餐厨垃圾研究。以腐烂蔬菜和食物的泔水喂养黑水虻幼虫,可以增加氨(NH₄⁺)的浓度。研究表明,经幼虫处理后泔水中 NH₄⁺ 含量比未经幼虫处理泔水中 NH₄⁺ 高 5~6 倍^[4]。这 5~6 倍 NH₄⁺ 可能来自于黑水虻幼虫粪便中的有机氮。浓缩硝酸盐方案中,黑水虻幼虫同样能促进异化性硝酸盐还原成氨。

3)黑水虻作为动物饲料的研究。黑水虻幼虫干物质的粗蛋白含量达到 42%~44%,粗脂肪含量为 31%~35%,灰分 11%~15%,钙质 4.8%~5.1%,磷 0.60%~0.63%,预蛹中还含有丰富的氨基酸和矿物质,黑水虻幼虫干粉与豆粕含量相近可以代替部分豆粕作为饲料或成为禽畜饲养的添加剂^[2]。Bondari 和 Sheppard 研究表明,利用黑水虻新鲜幼虫 100% 代替鱼粉饲养斑点叉尾鲷和罗非鱼时不能提供正常生长需要的足够干物质或蛋白质的摄取量,但将新鲜幼虫剁碎后饲养 2 种鱼却可以提高体重的增加幅度^[2]。胡俊茹等对黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、体组成和血清生化指标的影响进行了研究,结果表明,黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼存活率无显著影响^[13]。国内也有研究表明,对黑水虻营养进行分析有利于水产品的养殖,其必需氨基酸占氨基酸总量的 51.07%,超过 WHO/FAO 标准规定的 40%。

4)黑水虻的抗菌研究。黑水虻幼虫在自然界主要取食腐烂的有机物、动物粪便及餐厨垃圾等,取食后可减少大肠杆菌及沙门氏菌数量、减少家蝇滋生,且可消化多种病原菌。因此,其体内应具有强大的免疫功能。喻国辉等从野外收集和室内饲养的黑水虻幼虫体表和肠道分离出同时具蛋白质和有机磷分解能力的细菌 10 株,通过 16S rDNA 序列确定 10 株菌为枯草芽孢杆菌属,它对水稻黄单胞菌有很强的抑菌活性^[14];周定中等对黑水虻肠道菌进行抗植物病原菌的研究,通过活性物质的分子克隆鉴定初步推测其活性物质可为脂肽 Iturin 和 Surfactin^[15];另外,黑水虻幼虫的肠道微生物种群在消化转化有机质方面起着关键作用。Choi 等采用化学方法对黑

水虻幼虫进行浸提,分离提取出己二酸对金黄色葡萄球菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、肺炎克雷伯菌及痢疾志贺菌均有良好的抑菌效果^[16]。

夏婧等^[7-9]采用不同诱导方法、不同诱导剂量及不同诱导时间对黑水虻幼虫抗菌肽进行了研究。研究表明,黑水虻抗菌肽的最佳诱导方法是大肠杆菌菌液针刺浸泡 60 s;最佳诱导时间为浸泡后 24 h;最佳诱导龄期为 5 龄幼虫。韩国科学家亦利用免疫后黑水虻幼虫血淋巴提取抗菌肽,利用固相萃取和反相层析对提取出的防御素 4(DLP4)进行纯化,纯化后 DLP4 具有对革兰氏阳性菌,包括耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的抑菌效果,但此抑菌效果主要发生在脂肪体免疫后^[9]。

5 展 望

利用黑水虻幼虫集约化处理粪便及餐厨垃圾,不仅可以减少我国日益严重的污染问题,还可将处理粪便及餐厨垃圾的副产品转化成动物饲料、生物柴油等,做到资源最大化利用。但黑水虻幼虫处理畜禽粪便及餐厨垃圾的技术还不成熟,尚有许多问题需要解决。如黑水虻成虫交配必须在光照下进行,在南方的梅雨季节如何使其正常产卵;黑水虻幼虫生活的适宜温度为 27℃左右,在寒冷的北方如果越冬,这些都是黑水虻无害化处理系统实施时需解决的问题。针对这些问题,必需加强黑水虻的基础研究,尤其是黑水虻的生态学特性研究。

参 考 文 献

- [1] 安新城,李军,吕欣.黑水虻处理养殖废物的研究现状[J].环境科学与技术,2010(3):113-116.
- [2] 喻国辉,陈燕红,喻子牛,等.黑水虻幼虫和预蛹的饲料价值研究进展[J].昆虫知识,2009(1):41-45.
- [3] PARK S I, KIM J W, YO E S M. Purification and characterization of a novel antibacterial peptide from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae[J]. Dev Comp Immunol, 2015, 52(1): 98-106.
- [4] GREEN T R, POPA R. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2012, 166(6): 1381-1387.
- [5] 喻国辉,李一平,杨玉环,等.低含水量饲料对黑水虻生长发育的影响[J].昆虫学报,2014(8):943-950.
- [6] 郑孝成,钱仲仓,杨泉灿.规模化养猪场周边土壤重金属污染及防控[J].上海畜牧兽医通讯,2013(2):58-59.
- [7] 夏婧,但家立,朱伟,等.Zn²⁺胁迫对黑水虻生长发育的影响[J].环境昆虫学报,2013(3):294-299.
- [8] 夏婧,廖业,朱伟,等.Zn²⁺在不同世代黑水虻体内累积及分布规律[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2013(2):110-114.
- [9] 夏婧,朱伟,廖业,等.Cu²⁺在黑水虻体内迁移及其发育影响[J].遵义医学院学报,2014(3):300-303.
- [10] 沈媛,徐齐云,安新城.黑水虻幼虫及预蛹抗逆性的初步研究[J].环境昆虫学报,2012(2):240-242.
- [11] LI Q, ZHENG L, QIU N, et al. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production[J]. Waste Manag, 2011, 31(6): 1316-1320.
- [12] CHOI W H, JIANG M H. Evaluation of antibacterial activity of hexanedioic acid isolated from *Hermetia illucens* larvae[J]. Journal of Applied Biomedicine, 2014(12): 179-189.
- [13] 胡俊茹,王国霞,黄燕华,等.黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、体组成和血清生化指标的影响[C]. 郑州:中国畜牧兽医学动物营养学分会第七届中国饲料营养学术研讨会, 2014.
- [14] 喻国辉,杨紫红,夏婧,等.肠道共生细菌预发酵鸡粪对黑水虻生长发育的影响[J].昆虫知识,2010(6):1123-1127.
- [15] 周定中,曹露,王茂淋,等.黑水虻肠道细菌抗菌筛选及其活性物质分子鉴定[J].微生物学通报,2012,(11):1614-1621.
- [16] CECILIA L, STEFAN D, MARIA E M, et al. Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*)—From a hygiene aspect [J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 312-318.