应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2019, 56(5): 997–1006. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2019.110

黑水虻的资源化利用研究现状*

张 杰** 温逸婷 高正辉 雷朝亮 朱 芬***

（华中农业大学植物科学技术学院，武汉 430070）

摘 要 黑水虻 *Hermetia illucens* 是最近几年昆虫资源研究领域的热点昆虫之一，其研究与利用得到了较大的发展，本文从黑水虻的分布、重要性、资源特性及转化分解有机废弃物的应用等方面进行了综述，同时对目前的研究与利用热点进行了剖析，以期为黑水虻的产业化发展提供借鉴。

关键词 昆虫资源；黑水虻；废弃物处理；昆虫饲料

Progress in research on, and the utilization of, *Hermetia illucens*

ZHANG Jie** WEN Yi-Ting GAO Zheng-Hui LEI Chao-Liang ZHU Fen***

(College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract The black soldier fly *Hermetia illucens* has recently been the focus of considerable research in the field of insect resources with rapid progress in research on, and the utilization of, this species. This review summarizes the distribution, importance, resource characteristics, and application of the black soldier fly in organic waste management, and reviews recent progress in research on, and use of, the species. We hope this review provides a reference for the commercial propagation of the black soldier fly.

Key words insect resources; black soldier fly; waste management; insect feed

黑水虻 *Hermetia illucens*，英文名称 Black soldier fly，又称亮斑扁角水虻，是双翅目水虻科扁角水虻属的一种昆虫，在全球热带和亚热带的大部分地区都有分布。

黑水虻幼虫为腐食性，在自然界中以动物粪便（鸡粪、鸭粪、猪粪、牛粪等）和腐烂的有机物（腐烂的水果、蔬菜、腐肉、腐败的海产品、动物尸体等）为食（Newton *et al.*，2005；喻国辉等，2009；刘韶娜和赵智勇，2016；马加康等，2016）。幼虫虫体含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪、矿物质等（喻国辉等，2009；许彦腾等，2014；高俏等，2016）。成虫对环境安全且不主动侵入人类的居室环境，传播疾病的概率低（安新城等，2010）。黑水虻的应用一直受到广泛关注和研究。黑水虻可作为一种昆虫资源被利用，相比于黄粉虫 *Tenebrio moliter* 等其他昆虫，黑水虻的油脂含量较高，这使我们的研究富有重大意义。同时又可以充当家禽以及鱼类等动物的饲料，此外还对资源利用和环境保护起重大作用。

1 黑水虻的分布

黑水虻曾被认为起源于美国，大约 500 年前首次被带到欧洲（Benelli *et al.*，2014），但第一次可证实的古北区物种记录是来自 1926 年的南欧（马耳他）（Lindner，1936），在意大利文艺复兴时期的公主伊莎贝拉·阿拉戈纳（Isabella d'aragona，1470-1524）的石棺中发现了一头黑水虻幼虫。这就引发了关于这种昆虫真正地理起源的问题。有人推测黑水虻应该原产于古北地区，尽管直到 1926 年才为人所知。也有人推测

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31872306）

**第一作者 First author，E-mail：740536810@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhufen@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received：2019-08-10；接受日期 Accepted：2019-08-25

黑水虻起源于美国，美洲大陆是 1492 年被发现的，1524 年去世的伊莎贝拉的石棺中发现的黑水虻幼虫是源于美国，并通过西班牙商船“加隆号”意外地从美国转移到达意大利的重要港口那不勒斯港，但这一推测无法解释新热带区的黑水虻怎样改变其生活史以适应古北区的气候（Benelli *et al.*，2014）。早在 1915 年从南非收集的标本，以及 20 世纪 40 年代从马来西亚、夏威夷、所罗门群岛、新喀里多尼亚、马里亚纳群岛、帕劳和关岛收集的标本都有黑水虻。在欧洲的传播主要是在 20 世纪五六十年代沿着地中海沿岸的西班牙、法国和意大利（Leclercq，1969；Leclercq，1997）。近年来，这个物种已经有在欧洲中部向北传播的记录。关于黑水虻的记载也见于德国的记录和捷克共和国的记录（Ssymank and Doczkal，2010；Roháček and Hora，2013）。总的来看，到了 20 世纪 60 年代，黑水虻已经扩展到了今天的大部分活动范围。这一物种沿海岸线和岛屿的明显传播表明，海洋运输可能在多次偶然引入中发挥了作用（Marshall *et al.*，2015）。

虽然人们并不知道黑水虻确切的原始分布，也不能排除它最初发生在美国东南部，但是目前其在北美的分布范围似乎反映了黑水虻历史上是从中美洲和南美洲北部的本土范围向北扩展的。它于 19 世纪末出现在美国南部。目前已知的最早的标本是 1881 年在佛罗里达州弗尔南迪纳（美国国家博物馆）发现的。1889 年研究人员从 1987 年在阿拉巴马州从蜂箱中采集的标本里记录了这一发现（Riley and Howard，1889），当时的名字还被错误拼写成 *Hermetia mucens*。随后的进一步记录来自 1897 年路易斯安那州的记载、1899 年得克萨斯州的记载、1911 年南卡罗来那州的记载、1923 年加利福利亚州南边的记载、1926 年弗吉尼亚州的记载、1931 年爱荷华州的记载、1938 年俄亥俄州的记载、1940 年在加利福利亚州北边的记载、1943 年马里兰州的记载和 1945 年纽约的记载。目前所了解到最北的记录是 1972 年 9 月 16 日在新罕布什尔州梅里马克县华纳发现的。在堪萨斯州的双翅目昆虫（Adams，1903）和俄勒冈州的昆虫（Cole and Lovett，1921）名单中没有列出该物种。1960 年，James 展示了加利福尼亚的分布图，其中最北部的标本位于中央山谷的北端。当时，他还提供了一份北美地图，并提到了俄勒冈州、华盛顿州和北达科他州的记录，他将这些记录称为“临时的分布介绍”（James，1960）。2001 年，Woodley 在进行资料整理时，没有把这些记录收入在他的目录里（Woodley，2001）。到目前为止，俄勒冈州和华盛顿州也已经有了该物种的记录，因此该物种已经有可能已经迁移到这些州，并在这些州建立了种群（Marshall *et al.*，2015）。

2 黑水虻的重要性

经过几十年的传播，现在世界各地的许多地区都记录有黑水虻。相对于同样也是腐食性的昆虫如家蝇 *Musca domestica* 和丽蝇来说，黑水虻的个体很大，可以阻止家蝇和丽蝇产卵，幼虫还可以吃掉其他种类的低龄幼虫，这一点很重要。因为家蝇和丽蝇的栖息地更加恶臭，使得黑水虻看起来与人类更加友好。黑水虻的成虫口器退化，不像家蝇那样可以通过反刍传播疾病。它们很容易被抓住，比较清洁，也不叮咬人。对人类来说它并不是害虫。由于它们成虫阶段不取食，可消耗的能量少，所以黑水虻成虫不像家蝇那样善飞。它们也不会被人类的栖息地和食物吸引。黑水虻作为一个食腐殖质者和食粪者，怀孕的雌虫常被腐败的食物或粪便吸引。若想要控制种群，杀死预蛹或蛹，种群就会急剧下降。

黑水虻幼虫具有很高的转化蛋白能力，其蛋白含量达 42%，且富含钙和许多氨基酸。只需要 18 d，1 g 黑水虻卵即可以转化成 2.4 g 蛋白。通常 1 g 卵中含有 45 000 多粒卵。因此它们可以作为人类消费蛋白的一个来源。2013 年，奥地利设计师 Katharina Unger 发明了一款台式昆虫繁育器，称为“农场 432”。通过这种台式昆虫繁育器，人们可以在自己家里生产可食用的水虻幼虫。它是一个多室的塑料设备，看起来就像是厨具。据 Unger 说，“农场 432”能使人们通过生产自己的蛋白源转而应对当前肉类生产的机能

失调系统。该设备 1 周内能生产 500 g 幼虫或两餐膳食。黑水虻幼虫的味道非常与众不同。Unger 说："当人们烹饪的时候，闻起来有点像煮熟的土豆，外面更硬一点，里面就像是软的肉类。味道很奇特、口感香醇。"但是欧盟法律禁止将动物产品（包括昆虫）作为饲料用于食品生产，这也是进行商业化运作的障碍。2016 年 9 月，欧盟卫生与食品安全理事会（European Commission Directorate-General）发起了与欧盟成员国的讨论，关于授权使用昆虫蛋白作为水产养殖鱼类的饲料。为此，欧盟执委会制定了一系列建议，旨在修订欧洲共同体现行规定（传染性海绵状脑病和动物副产品）。在 2017 年 5 月 24 日，欧盟委员会正式通过了 2017 / 893 号决议，授权使用昆虫蛋白作为水产养殖的饲料。该决议从 2017 年 7 月 1 日起生效。这一授权仅限于包括黑水虻在内的七个物种的名单，而且这些物种必须达到"饲料级"才能被饲用。位于欧盟以外的公司，如 Enterra 饲料公司（加拿大）和 AgriProtein 有限公司（南非），已经在欧盟当地市场提供了一些昆虫产品，如完整的干幼虫、虫油（即 MagOil™）、烘干蛋白粉（即 MagMeal™）、幼虫油、肥料（即 MagSoil™和 Soil^{+}）等。

在过去的几十年里，人们对利用黑水虻幼虫来控制有机废物、堆肥产生了极大的兴趣（Lalander *et al.*，2015）。收获的幼虫经过冷冻或者干燥可以用于饲喂家畜、禽类、鸟类、鼠类、水产类等动物的食物补充或者是饲料。例如用于生物管理和转化畜禽粪便（Sheppard *et al.*，1994）、用于禽类生产中控制家蝇（Furman *et al.*，1959；Sheppard，1983），以及用作鱼类和猪等的饲料添加剂（Newton *et al.*，1977；Bondari and Sheppard，1981）。后来，人们也尝试把它作为堆肥剂。在 Newton 等（2005）描述的一个项目中，用猪粪饲喂黑水虻幼虫，这大大减少了废物。粪便被转移到一个盆里，盆里装着黑水虻幼虫。随着幼虫的发育，粪便减少了 50%。约 45 000 头幼虫在 14 d 内会消耗 24 kg 猪粪。当幼虫成熟时，它们会爬出盆外，从而自我收获，随后作为家畜的饲料。黑水虻幼虫除了是动物饲料中油脂和蛋白质的良好来源外，还具有将有机废物转化为丰富肥料的潜力。

近年来，许多公司都在尝试优化和提高黑水虻的养殖技术从而促进其商业应用。蛋白质和动物饲料的生产一直是世界各地许多从事黑水虻产业化相关公司的关注重点，例如 HermetiaBaruth 公司（德国）、AgriProtein 有限公司（南非）和 Enterra 饲料公司（加拿大）等已经实现了黑水虻的大规模养殖。根据 IlkkaTaponen 的昆虫学数据库显示，全球共有 289 家昆虫公司，其中 222 家是"活跃的"。大多数提供"黑水虻"产品的公司都位于欧洲地区，也有澳大利亚、非洲、亚洲和美国提供这些产品。

关于产品的检测，有学者开发了一种实时荧光定量 PCR 检测黑水虻的方法。该方法在线粒体条形码区域（细胞色素 C 氧化酶基因，COⅠ）内扩增 89 bp 大小的序列。在商业鱼饲料复合 DNA 的背景下，该系统的 PCR 效率达到 96%。该方法检测灵敏，复合饲料中黑水虻 DNA 稀释的检测限为 0.1 个基因组拷贝，对应的绝对数量为 0.13 pg DNA。此外该方法的敏感性也较好，能可靠地检测到水产养殖饲料混合物中分离的 BSF 蛋白含量，其含量可低至 0.01%（质量百分数）。通过对干燥、加热和脱脂的影响进行的补充实验发现，即使是溶剂萃取的干燥幼虫（140 ℃，20 min 预处理），也不会对敏感性产生负面影响。该方法还可对生鲜或加工的黑水虻产品进行灵敏、可靠的检测（Zagon *et al.*，2018）。

3　黑水虻的资源特性

黑水虻具有食谱广、食量大、营养需求低、安全性高等特点，其在处理有机废弃物方面具有很好的应用潜力，幼虫处理粪便的实验研究结果显示，黑水虻对新鲜鸡粪的处理量可达到 50%，对猪粪中干物质的转化率可以达到 56%；含水量大且有丰富糖类、脂肪和蛋白质的餐厨垃圾经过黑水虻的取食后，含水量大幅减少（可从 75%

降到 15%），干物质减少率可达到 50%-60%（李武等，2014；安新城，2016）。

黑水虻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（朱建平等，2017）。黑水虻还可以替代鱼粉对锦鲤生长和健康状况的产生一系列的影响。具体表现为黑水虻替代鱼粉时，锦鲤血浆谷丙转氨酶活力显著降低，但血浆和肝胰脏超氧化物歧化酶（SOD）活力显著增强，肝胰脏丙二醛（MDA）含量显著降低，代替鱼粉可增强锦鲤抗氧化性和抗病能力（刘兴等，2017）。

黑水虻可将禽畜粪便和餐厨垃圾中的营养物质转化为自身的粗蛋白和脂肪（李志刚等，2011；李武等，2014；柴志强和朱彦光，2016；刘韶娜和赵智勇，2016；胡俊茹等，2017），作为家禽（Cutrignelli *et al.*，2018）、家畜（张放等，2017，2018）和鱼类（胡俊茹等，2014；刘世胜，2016）的良好的活体饲料或饲料添加成分（喻国辉等，2009；郭明，2015；高俏等，2016）。研究表明，黑水虻以 8%的转化率将鸡粪（干重）转化为粗蛋白和脂肪，比重分别为 42%和 35%；取食猪粪后其预蛹中含有 40%左右的干物质，其中粗蛋白占 43%左右，脂肪占 33%左右，还含有丰富的必须氨基酸和矿物质；取食餐厨垃圾后，黑水虻的粗蛋白和粗脂肪含量分别在 44%和 37%左右（柴志强等，2016；李来刚，2016a；刘韶娜和赵智勇，2016）；用作饲料时，不仅可以促进动物吸收营养加快生长且肉质更鲜美、增强动物的抗病能力，还有效降低了养殖动物的成本（郭明，2015；陈美珠，2017；代发文等，2017）。黑水虻虫粉钙含量约 0.96%，总磷含量约 0.80%。此外，黑水虻粗脂肪中，中链脂肪酸与多不饱和脂肪酸含量占脂肪酸总量的 60%以上，其中月桂酸含量占脂肪酸的 40%以上（郭明，2015）。黑水虻预蛹的营养价值很高，其氨基酸含量与鲱鱼粉相似，特别适合于鸡、猪、牛蛙及鱼类的养殖，而且较普通的骨粉和豆粉好很多，具有非常可观的经济效益。其营养成分可以被高度利用，表现在黑水虻幼虫产生的蛋白质的制备及其体外抗氧化活性（许彦腾等，2014），为进一步钻研和综合利用及开发抗氧化功能蛋白食品提供了可能和依照。

黑水虻虫体内的各类蛋白质尤其是水溶蛋白都有抗氧化活性，因此可用于天然抗氧化剂和有抗氧化功能的蛋白食品的制作（许彦腾等，2014；柴志强等，2016）；预蛹虫壳含有大量的壳聚糖和几丁质，可进行工艺化提取；幼虫含有丰富的油脂，可作为提取生物柴油的原材料（Wang *et al.*，2018）；黑水虻幼虫中含有丰富的抗菌肽、蛋白酶、水解酶、P450 水解酶等抗菌物质，因此还是药物研发的良好素材（高俏等，2016；李来刚，2016b）。

4 黑水虻转化分解有机废弃物的应用

利用黑水虻幼虫快速降解有机废弃物是一种很有前途的废物管理方法，因为它能产生多种高附加值产品（动物饲料、幼虫堆肥、生物燃料）。在哥斯达黎加进行的一项中等规模的野外实验评估了黑水虻幼虫消化和降解混合城市有机废弃物的可行性。在较适宜的条件下，平均预蛹产量达到了 252 $g/m^2/d$ （湿重），减少废弃物的幅度在 65.5%-78.9%（Diener *et al.*，2011）。黑水虻转化有机废弃物时，每天都对有机废弃物有一定程度的降解和消耗，直到幼虫发育至预蛹阶段。幼虫阶段的净消耗在第 11 天下降（1.05 mg），第 14 天时达到最大值（1.72 mg）。平均降解速率为 26.69 mg，总降解和消耗量为 1 921.52 mg（Samayoa and Hwang，2018）。可以看出，用黑水虻进行废弃物处理是一种有效的营养循环系统。研究还发现通过黑水虻转化时，可以积累 58%的脂质生物量，且该脂质富含低多不饱和脂肪酸（6%）和高 C18：1（50%），也是一种高品质的生物柴油原料。只需要 20 头黑水虻幼虫就可以使总废物减少量达到 0.019 g/d（Mohd-Noor *et al.*，2017）。

废弃物的类型不同，黑水虻对废弃物的转化

效率也不同。人们比较了黑水虻幼虫对 5 种广泛存在的有机废弃物的消耗和转化能力。废弃物类型有对照用家禽饲料、猪肝、猪粪、厨余垃圾、水果和蔬菜、处理过的鱼。厨余垃圾平均每天减少率（黑水虻消耗）最高，产生的黑水虻数量最多、个体最重。在肝脏、粪肥、水果和蔬菜以及鱼上饲养的幼虫的长度和重量与对照组喂养的幼虫大致相同（Nguyen *et al.*，2015）。近年，研究人员比较了黑水虻对两类 4 种有机废弃物的转化效果：一类是有机废弃物：蔬菜和水果的混合物（VEGFRU）和水果混合物（FRU）；另一类是农工业副产物：啤酒酿酒厂副产物（BRE）与葡萄酒酒厂副产物（WIN）。黑水虻转化时的减少废物指数在 2.4 g/d（WIN）至 5.3 g/d（BRE）之间变化（Meneguz *et al.*，2018）。

4.1　转化分解畜禽粪便

转化禽畜粪便时，黑水虻不仅可以减少粪便的积累、消除其中的臭味（Newton *et al.*，2005；Beskin *et al.*，2018），还可以有效地控制家蝇的滋生（李峰等，2016；刘良和鞠美庭，2017）；还能降低其中的有害微生物，如粪便中的大肠杆菌、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌（Erickson *et al.*，2004；Liu *et al.*，2008；Myers *et al.*，2008）；对粪便中的氮元素、磷元素和钾元素的利用率很高，可有效缓解粪便中的富集元素（安新城等，2010）；对粪便中的重金属（铜、锌、锰、镉、铬等）也有解毒作用（胡俊茹等，2017；Wang *et al.*，2018），减少了重金属对环境的污染（Cai *et al.*，2018）。处理有机废弃物后的剩余物，是具有较高肥力的生物肥料，且有实验显示尿素中添加处理猪粪后产生的残渣（虫沙）对白菜的生长有促进作用（李卫娟等，2016），因此黑水虻处理过的废弃物成为了优质的有机肥（杨树义等，2016）。

当然，不同的粪污来源本身可能干扰黑水虻的转化效果。就粪本身而言，鸡粪的氮含量高于猪粪和牛粪，分别占干重的 4.78%、2.55%和 2.74%；猪粪的磷含量最高，其次是鸡粪和牛粪，分别占干重的 2.58%、1.24%和 0.64%。氮磷比是鸡粪低于牛粪，猪粪中氮磷比最低。黑水虻幼虫对猪粪氮转化效率高于鸡粪和牛粪，而牛粪的磷转化效率最低。鸡粪基质中氮含量降低，但猪粪、牛粪氮含量稳定。各处理中磷浓度均降低。氮磷比参数，鸡粪由转化前的 3.85 变成了转化后的 0.73，猪粪由转化前的 0.99 变成了转化后的 0.66，牛粪由转化前的 4.27 变成了转化后的 3.06。另外，粪便的干燥可能会降低其营养价值，使用鲜粪的生产系统可以大大缩短开发时间，提高转化效率（Oonincx *et al.*，2015）。

4.2　转化分解餐厨垃圾

黑水虻同样能处理餐饮垃圾。人类生活中会产生数量庞大的餐厨垃圾（柴志强和朱彦光，2016），利用传统的处理方法会产生许多弊端，且易造成残留、产生其他垃圾等许多问题。利用黑水虻处理餐厨垃圾，可以充分实现餐厨垃圾的资源化、无害化和减量化处理的目标，不会产生其他污染物，也可大面积处理垃圾，所产生的虫体也可以作为饲料等用。

人们评价了食品废弃物中水分含量对幼虫生长和生存的影响。研究人员在温控转鼓反应器中将不同含水率（70%、75%和 80%）的食品废弃物分别喂给黑水虻幼虫。在 70%和 75%的含水率下，通过 2.36 mm 筛子，可有效地分离出残留中的昆虫。然而，在 80%的含水率下，对残渣进行筛选是不可行的。另一方面，减少食物废弃物的水分含量会减慢幼虫的生长。因此，残渣的筛分效率与幼虫生长速率之间存在平衡关系。此外，幼虫存活率不受食物废弃物含水率的影响，使用温控转鼓反应器，所有处理组的幼虫存活率均达到 95%以上（Cheng *et al.*，2017）。研究人员用黑水虻转化处理食品垃圾，从 10 吨的输入物中生产出了 300 kg 干幼虫和 3 346 kg 堆肥。用黑水虻处理 1 吨食品垃圾时，全球变暖潜力为 30.2 kg CO_2，土地利用为 0.661 m^2（Salomone *et al.*，2017）。与饲料或生物柴油的替代原料来源相比，这些结果表明，昆虫生产的最显著效益与土地利用有关。

4.3 转化分解病死畜禽尸体

在美国南部、中部和西部以及夏威夷，黑水虻已经被证明是一种在地表和地下动物或人类遗骸处普遍存在的昆虫居住者。马来西亚研究人员观察了一头死于肺炎的 3 月大小的猪（8.5 kg）的腐烂阶段，黑水虻成虫是在第 13 天时发现的（Heo *et al.*，2007）。他们还比较了局部烧伤的猪与自然死亡的猪的分解和昆虫种群的演替过程，这两具尸体在 9 d 后完全腐烂，出现昆虫黑水虻（Heo *et al.*，2008）。

用黑水虻对病死畜禽尸体进行处理，需使其尽量无害。实验证明经过黑水虻幼虫食用带有病原菌的饲料后，从幼虫体中并没有检测到相应的病原微生物，从虫体排泄物中也没有检测出有此病原菌（杨燕等，2016）。这充分说明了带病的饲料经过黑水虻体内吸收后，病原物被完全杀灭。同时，将黑水虻体表浸泡洗涤后检测溶液相应病原，结果呈阴性，这说明黑水虻体表可能富含有大量抗菌肽类物质，对其接触的病原微生物可以起到抵抗或者消灭的作用。由此可以推断出，黑水虻可以减量化、无害化处理病死的畜禽尸体及其副产物并在资源化利用方面也同样具有广阔的应用前景。利用黑水虻高效处理病死猪，实施生物转化，可为畜禽养殖业病死动物尸体无害化处理开辟一个新的途径（喻国辉等，2009）。

5 目前的研究与利用热点

5.1 研究黑水虻幼虫处理粪便的潜力

黑水虻幼虫可以转化处理多种粪便，处理粪便收获的黑水虻幼虫体内可以提炼生物柴油等副产品（Green and Popa，2012）。根据有关研究，人们发现粪便经过黑水虻幼虫处理后，其所含的 N、P、K 大量元素以及其他微量元素的含量都明显减少了，同时对粪便的去臭效果也非常好，这使得粪便中的细菌大大减少，对控制人类疾病有重要意义。

5.2 研究黑水虻幼虫处理餐厨垃圾的潜力

黑水虻属于腐食性昆虫，对易腐有机废弃物的取食与消化能力非常强，可以将餐厨垃圾转化为昆虫蛋白和油脂，因此在城市的餐厨垃圾处置领域具有巨大的应用前景，但是，中国的餐厨垃圾普遍具有高油脂、高盐、重调味品的特性，这对取食餐厨垃圾的动物构成了一定的阻碍。

5.3 将黑水虻幼虫用作畜禽及水产养殖的饲料

黑水虻幼虫、预蛹和蛹的营养成分非常丰富，对发展畜禽及水产等的养殖业意义巨大，根据目前对黑水虻幼虫的干物质成分研究表明，其粗脂肪含量达到了 31%-35%，粗蛋白含量高达 42%-44%，这一含量相对于其他营养物优势明显，预蛹中其他营养成分的含量也特别丰富，种类多，含量高，例如大家熟知的氨基酸和矿物质等含量就比较高，由于黑水虻幼虫干粉与豆粕从含量和营养成分上看比较相近，因此理论上可以用来代替部分豆粕（Green and Popa，2012）作为饲料饲养家禽。

5.4 研究黑水虻的抗菌作用

根据黑水虻幼虫的腐食性特征，黑水虻幼虫取食腐烂有机物或粪便后，可以有效降低大肠杆菌 *Escherichia coli* 与沙门氏菌 *Salmonella* 的产生，还可有效减少家蝇的数量，不仅如此，还可以消除其他病原菌（赵启凤，2012；Zdybicka-Barabas *et al.*，2017）。在欧美黑水虻幼虫被用作治疗烧伤、伤口愈合等皮肤损伤的医疗资源和药用昆虫（Choi and Jiang，2014）。黑水虻幼虫表达了大量的抗菌肽（AMPs），其中许多都是通过进食高细菌含量的食物而被诱导产生的。添加磺化木质素、纤维素、甲壳素、啤酒颗粒或葵花籽油后，发现了 AMPs 在幼虫体内的表达谱具有基质饲料依赖性。以添加蛋白质或葵花籽油的饲料喂养幼虫，诱导了最高的 AMPs 数量和 AMP 表达水平。引人注目的是，AMPs 依赖于基质饲料的表达转化为依赖于基质饲料的对一系列细菌

的抑制活性谱，为营养免疫学的新兴领域提供了一个有趣的例子（Vogel *et al.*，2018）。

6　总结

黑水虻是一种腐生性昆虫，耐高密度饲养，有利于工厂化大量生产。其繁育能力强，繁殖力丝毫不逊于家蝇，成虫还不在居民区活动，易于管理。幼虫和蛹的个体较大，蛋白和油脂含量高，可以用作动物饲料的蛋白原料，开发各类动物饲料，也可开发昆虫油脂和生物柴油。黑水虻可以用于转化分解餐厨垃圾、屠宰场废弃物、秸秆、畜禽及人的粪污等有机废弃物，从而改善环境、造福人类。在转化分解有机废弃物的过程中，既可以产出昆虫原材料用于饲料，虫沙也可用作有机肥。尽管黑水虻的繁殖与利用研究在世界范围内有了长足的发展，但种虫繁育和高附加值产品缺乏仍是限制黑水虻产业化应用的瓶颈。

参考文献 (References)

Adams CF, 1903. Dipterological contributions. *The Kansas University Science Bulletin*, 11(2): 27.

An XC, 2016. Reliability analysis about technology for using black soldier fly on bioconversion from food waste to entomic protein. *Enviroment and Sustainable Development*, 41(3): 92–94. [安新城, 2016. 黑水虻生物处置餐厨废弃物的技术可行性分析. 环境与可持续发展, 41(3): 92–94.]

An XC, Li J, Lv X, 2010. Development of manure management system with *Hermetia illucens*. *Environmental Science & Technology*, 33(3): 113–116. [安新城, 李军, 吕欣, 2010. 黑水虻处理养殖废物的研究现状. 环境科学与技术, 33(3): 113–116.]

Benelli G, Canale A, Raspi A, Fornaciari G, 2014. The death scenario of an Italian Renaissance princess can shed light on a zoological dilemma: did the black soldier fly reach Europe with Columbus? *Journal of Archaeological Science*, 49(49): 203–205.

Beskin KV, Holcomb CD, Cammack JA, Crippen TL, Knap AH, Sweet ST, Tomberlin JK, 2018. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions. *Waste Management*, 74: 213–220.

Bondari K, Sheppard DC, 1981. Soldier fly larvae as feed in commercial fish production. *Aquaculture*, 24(1/2): 103–109.

Cai MM, Hu RQ, Zhang K, Ma ST, Zheng LY, Yu ZN, Zhang JB, 2018. Resistance of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to combined heavy metals and potential application in municipal sewage sludge treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2): 1559–1567.

Chai ZQ, Zhu YG, 2016. Application of black soldier fly in kitchen waste disposal. *Science and Technology*, 26(22): 321. [柴志强, 朱彦光, 2016. 黑水虻在餐厨垃圾处理中的应用. 科技展望, 26(22): 321.]

Chai ZQ, Zhu YG, Long Y, Zhang JW, Zheng YX, 2016. Ecological circular agriculture model and technology based on black soldier fly. *Agriculture and Technology*, 36(16): 34. [柴志强, 朱彦光, 龙云, 张建文, 郑远晓, 2016. 基于黑水虻的生态循环农业模式. 农业与技术, 36(16): 34.]

Chen MZ, 2017. The technical analysis and application of the black soldier fly to deal with the food waste. *Guangdong Science and Technology*, 26(11): 59–61. [陈美珠, 2017. 黑水虻处理餐饮垃圾的技术分析与应用探讨. 广东科技, 26(11): 59–61.]

Cheng JYK, Chiu SLH, Lo IMC, 2017. Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management*, 67: 315–323.

Choi WH, Jiang M, 2014. Evaluation of antibacterial activity of hexanedioic acid isolated from *Hermetia illucens* larvae. *Journal of Applied Biomedicine*, 12(3): 179–189.

Cole FR, Lovett AL, 1921. An annotated list of Diptera of Oregon. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 4: 148.

Cutrignelli MI, Messina M, Tulli F, Randazzo B, Olivotto I, Gasco L, Loponte R, Bovera F, 2018. Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute: Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens. *Research in Veterinary Science*, 117: 209–215.

Dai FW, Ge YK, Liang WC, Guan ZX, Huang YH, 2017. Study on the production performance and the growth rule of larva of black soldier fly in treating kitchen waste pulp. *Swine Production*, (6): 73–75. [代发文, 葛远凯, 梁伟才, 关则贤, 黄燕华, 2017. 黑水虻处理餐厨垃圾浆料的生产性能及其幼虫生长发育规律研究. 养猪, (6): 73–75.]

Diener S, Solano NMS, Gutierrez FR, Zurbrugg C, Tockner K, 2011. Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2(4): 357–363.

Erickson MC, Islam M, Sheppard C, Liao J, Doyle MP, 2004. Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly. *Journal of Food Protection*, 67(4): 685–690.

Furman DP, Young RD, Catts EP, 1959. *Hermetia illucens* (Linnaeus)

as a factor in the natural control of factor in the natural control of musca-domestica linnaeus. *Journal of Economic Entomology*, 52(5): 917–921.

Gao Q, Liu XH, Li K, Lei CL, Zhu F, 2016. Research progress in the development of high value-added products of *Hermetia illucens*. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 44(34): 102–104. [高俏, 刘馨桧, 李逵, 雷朝亮, 朱芬, 2016. 亮斑扁角水虻高附加值产品开发的研究进展. 安徽农业科学, 44(34): 102–104.]

Green TR, Popa R, 2012. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166(6): 1381–1387.

Guo M, 2015. Black soldier fly - a comprehensive nutritional animal health product. *Rural New Technology*, (12): 39. [郭明, 2015. 黑水虻——营养全面的动物保健品. 农村新技术, (12): 39.]

Heo CC, Mohamad AM, Ahmad Firdaus MS, Jeffery J, Baharudin O, 2007. A preliminary study of insect succession on a pig carcass in a palm oil plantation in Malaysia. *Tropical Biomedicine*, 24(2): 23–27.

Heo CC, Mohamad AM, Ahmad FM, Jeffery J, Kurahashi H, Omar B, 2008. Study of insect succession and rate of decomposition on a partially burned pig carcass in an oil palm plantation in Malaysia. *Tropical Biomedicine*, 25(3): 202–208.

Hu JR, Wang GX, Huang YH, Cao JM, Sheng GC, Lei SQ, He F, An XC, 2014. Effects of fish meal replacement by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal on growth performance, serum biovhemical indices and body composition of Juvenile Yellow Catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). The 7th China Feed Nutrition Symposium of the Animal Nutrition Society of China Animal Husbandry and Veterinary Society. Zhengzhou, Henan, China. [胡俊茹, 王国霞, 黄燕华, 曹俊明, 盛广成, 雷双毓, 何飞, 安新城, 2014. 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. 中国畜牧兽医学会动物营养学分会第七届中国饲料营养学术研讨会. 中国, 河南, 郑州.]

Hu JR, He F, Mo WY, Chen XY, Huang YH, Wang GX, Sun YP, 2017. Analysis of feed value of larvae of black soldier fly with different organic wastes. *Chinese Feed*, (15): 24–27. [胡俊茹, 何飞, 莫文艳, 陈晓瑛, 黄燕华, 王国霞, 孙育平, 2017. 采食不同有机废弃物黑水虻幼虫饲料价值分析. 中国饲料, (15): 24–27.]

James M, 1960. The soldier flies or Stratiomyidae of California. *Bulletin of the California Insect Survey*, 6(5): 79–122.

Lalander CH, Fidjeland J, Diener S, Eriksson S, Vinneras B, 2015. High waste-to-biomass conversion and efficient *Salmonella* spp. reduction using black soldier fly for waste recycling. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1): 261–271.

Leclercq M, 1969. Dispersion et transport des insectes nuisibles: *Hermetia illucens* L. (Diptera Stratiomyidae). *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 4: 5.

Leclercq M, 1997. A propos de *Hermetia illucens* (LINNAEuS, 1758) (“soldier fly”) (Diptera: Stratiomyidae: Hermetiinae). *Bulletin et Annales de la Société Royale d’entomologie de Belgique*, 133: 8.

Li F, Zhang K, Jin X, Yu ZN, Zhang JB, Li MS, Zheng LY, 2016. Research on swine manure deodorizatio by larvae of black soldier fly Wuhan Strain. *Chemistry and Bioengineering*, 33(7): 28–33. [李峰, 张可, 金鑫, 喻子牛, 张吉斌, 李明顺, 郑龙玉, 2016. 武汉亮斑水虻对猪粪的除臭功能研究. 化学与生物工程, 33(7): 28–33.]

Li LG, 2016a. High quality living bait biological - black soldier fly. *Plant Doctor*, 29(8): 40–42. [李来刚, 2016a. 优质活体饵料生物黑水虻. 植物医生, 29(8): 40–42.]

Li LG, 2016b. High quality living bait biological - black soldier fly. *Scientific Fish Farming*, (7): 68–69. [李来刚, 2016b. 优质活体饵料生物——黑水虻. 科学养鱼, (7): 68–69.]

Li WJ, Zhou WJ, Yang SY, Liu CX, Li CJ, Hu WF, 2016. Effects of *Hermetia illucens* sandworm on the growth performance of cabbage. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(10): 111–112, 115. [李卫娟, 周文君, 杨树义, 刘春雪, 李楚君, 胡文锋, 2016. 黑水虻虫沙对白菜生长性能的影响. 安徽农业科学, 44(10): 111–112, 115.]

Li W, Zheng LY, Li Q, Liu XL, Li MS, Zhang YL, Zhang JB, Yu ZN, 2014. Conversion processs and resource utilization of restaurant waste by black soldier fly. *Chemistry and Bioengineering*, 31(11): 12–17. [李武, 郑龙玉, 李庆, 刘学林, 李明顺, 张衍林, 张吉斌, 喻子牛, 2014. 亮斑扁角水虻转化餐厨剩余物工艺及资源化利用. 化学与生物工程, 31(11): 12–17.]

Li ZG, Tan LH, Lai JX, Long YZ, Wang G, 2011. Application prospects of the tropical agricultural waste biotransformation using black soldier fly. *Journal of Tropical Organisms*, 2(3): 287–290. [李志刚, 谭乐和, 赖剑雄, 龙宇宙, 王干, 2011. 利用黑水虻生物转化热带农业废弃物的应用前景. 热带生物学报, 2(3): 287–290.]

Lindner E, 1936. Die amerikanische *Hermetia illucens* L. im Mittelmeergebiet (Stratiomyiidae, Dipt.). *Zoologischer Anzerger*, 113: 2.

Liu L, Ju MT, 2017. *Hermetia illucens* managment potential to biomass solid waste of pig farm. *Chinese Journal of Animal Science*, 53(8): 105–108. [刘良, 鞠美庭, 2017. 黑水虻治理猪场生物质固体废弃物的潜力分析. 中国畜牧杂志, 53(8): 105–108.]

Liu Q, Tomberlin JK, Brady JA, Sanford MR, Yu Z, 2008. Black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae reduce *Escherichia coli*

in dairy manure. *Environmental Entomology*, 37(6): 1525–1530.

Liu SN, Zhao ZY, 2016. Development of animal manure treatment by black soldier fly. *Swine Production*, (2): 81–83. [刘韶娜, 赵智勇, 2016. 黑水虻对畜禽废弃物治理的研究进展. 养猪, (2): 81–83.]

Liu SS, 2016. The study on replacement of fish meal with black soldier fly meal in feed for commom carp(*Cyprinus carpio*). Master thesis. Yangling: Northwest A&F University. [刘世胜, 2016. 黑水虻幼虫替代鱼粉在鲤鱼饲料中的应用研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Liu X, Sun XL, Li LX, Zhang Y, Chen JC, Zhong YN, Shang DW, Chen CX, 2017. Effects of dietary fish meal replaced by *Hermetia illucens* meal on growth and health of koi cap *Cyprinus carpio*. *Journal of Dalian Ocean University*, 32(4): 422–427. [刘兴, 孙学亮, 李连星, 张扬, 陈继楚, 仲雨浓, 尚东维, 陈成勋, 2017. 黑水虻替代鱼粉对锦鲤生长和健康状况的影响. 大连海洋大学学报, 32(4): 422–427.]

Ma JK, Guo HR, Wang LX, 2016. The influences of the fresh duck manure to blackwater fly larvae growth and rate of waste conversion. *Journal of Anhui University of Science and Technology*, 30(1): 12–18. [马加康, 郭浩然, 王立新, 2016. 新鲜鸭粪对黑水虻幼虫生长发育及粪便转化率的影响. 安徽科技学院学报, 30(1): 12–18.]

Marshall SA, Woodley NE, Hauser M, 2015. The historical spread of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera, Stratiomyidae, Hermetiinae), and its establishment in Canada. *Journal of the Entomological Society of Ontario*, 146: 51–54.

Meneguz M, Schiavone A, Gai F, Dama A, Lussiana C, Renna M, Gasco L, 2018. Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 98(15): 5776–5784.

Mohd-Noor SN, Wong CY, Lim JW, Mah-Hussin MIA, Uemura Y, Lam MK, Ramli A, Bashir MJK, Tham L, 2017. Optimization of self-fermented period of waste coconut endosperm destined to feed black soldier fly larvae in enhancing the lipid and protein yields. *Renewable Energy*, 111: 646–654.

Myers HM, Tomberlin JK, Lambert BD, Kattes D, 2008. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. *Environmental Entomology*, 37(1): 11–15.

Newton GL, Booram CV, Barker RW, Hale OM, 1977. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *Journal of Animal Science*, 44(3): 395–400.

Newton L, Sheppard C, Watson DW, Burtle G, Dove R, 2005. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. *Waste Management Programes.* http://ecoport.org/storedReference/560348.pdf.

Nguyen TTX, Tomberlin JK, Vanlaerhoven S, 2015. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. *Environmental Entomology*, 44(2): 406–410.

Oonincx DGAB, van Huis A, van Loon JJA, 2015. Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(2): 131–139.

Riley CV, Howard LO, 1889. Hermetia mucens infesting bee-hives. *Insect Life*, 1: 2.

Roháček J, Hora M, 2013. A northernmost European record of the alien black soldier fly *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Stratiomyidae). *Časopis Slezské Zemské Muzeum*, Série A, 62: 6.

Salomone R, Saija G, Mondello G, Giannetto A, Fasulo S, Savastano D, 2017. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Prodution*, 140(2): 890–905.

Samayoa AC, Hwang SY, 2018. Degradation capacity and diapause effects on oviposition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Economic Entomology,* 111(4):1682–1690.

Sheppard C, 1983. House fly and lesser fly control utilizing the black soldier fly in manure management systems for caged laying hens. *Environmental Entomology*, 12(5): 1439–1442.

Sheppard DC, Newton GL, Thompson SA, Savage S, 1994. A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Technology*, 50(3): 275–279.

Ssymank A, Doczkal D, 2010. *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Stratiomyidae), a soldierfly new to the German fauna. *Studia Dipterologica*, 16: 3.

Vogel H, Muller A, Heckel DG, Gutzeit H, Vilcinskas A, 2018. Nutritional immunology: diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Developmental & Comparative Immunology*, 78: 141–148.

Wang XY, Gao Q, Liu XH, Wang XP, Lei CL, Sayed WAA, Zhu F, 2018. Metallothionein in *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) larvae (Diptera: Stratiomyidae), a potential biomarker for organic waste system. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6): 5379–5385.

Woodley NE, 2001. A world catalog of the Stratiomyidae (Diptera). *Myia*, 11: 475.

Xu YT, Zhang JX, Song ZZ, Xue JL, Sun Y, 2014. Preparation and in-vitro antioxidant activity of proteins from the larvae of black soldier fly, *Hermitia Illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 28(11): 2001–2009. [许彦腾, 张建新, 宋真真, 薛金丽, 孙勇, 2014. 黑水虻幼虫蛋白质的制

备及体外抗氧化活性. 核农学报, 28(11): 2001–2009.]

Yang SY, Li WJ, Liu CX, Hu WF, 2016. Effects of fermented swine manure on the conversion ratio of *Hermetia illucens* and nutritional components detection of *Hermetia illucens* larva and sandworm. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(21): 69–70, 73. [杨树义, 李卫娟, 刘春雪, 胡文锋, 2016. 发酵猪粪对黑水虻转化率的影响及黑水虻幼虫和虫沙营养成分测定. 安徽农业科学, 44(21): 69–70, 73.]

Yang Y, Yan H, Zhao ZY, Chen JH, Xin AG, 2016. Safety testing of two dead pigs treated with black soldier fly. *Swine Production*, (4): 85–86. [杨燕, 严欢, 赵智勇, 陈吉红, 信爱国, 2016. 以黑水虻为媒介处理两种疫病致死猪的安全性检测. 养猪, (4): 85–86.]

Yu GH, Chen YH, Yu ZN, Cheng P, 2009. Research progression on the larvae and prepupae of black soldier fly *Hermetia illucens* used as animal feedstuff. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(1): 41–45. [喻国辉, 陈燕红, 喻子牛, 程萍, 2009. 黑水虻幼虫和预蛹的饲料价值研究进展. 昆虫知识, 46(1): 41–45.]

Zagon J, di Rienzo V, Potkura J, Lampen A, Braeuning A, 2018. A real-time PCR method for the detection of black soldier fly (*Hermetia illucens*) in feedstuff. *Food Control*, 91: 440–448.

Zdybicka-Barabas A, Bulak P, Polakowski C, Bieganowski A, Wasko A, Cytrynska M, 2017. Immune response in the larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*. *ISJ-Invertebrate Survival Journal*, 14(1): 9–17.

Zhang F, Zhu JP, Zhang Z, Yang SY, Yu Z, Liu CX, Hong P, 2017. Effects of black soldier fly meal on growth performance, serum indices and nutrient apparent digestibility in growing-finishing pigs. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 46(6): 130–133, 146. [张放, 朱建平, 张政, 杨树义, 于震, 刘春雪, 洪平, 2017. 黑水虻虫粉对育肥猪生长性能、血清指标和养分消化率的影响. 河南农业科学, 46(6): 130–133,146.]

Zhang F, Yang WL, Yang SY, Yu Z, Liu CX, Hong P, 2018. Effects of black soldier fly meal on growth performance and serum biochemical parameters of growing pigs. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 30(6): 2346–2351. [张放, 杨伟丽, 杨树义, 于震, 刘春雪, 洪平, 2018. 黑水虻虫粉对生长猪生长性能和血清生化指标的影响. 动物营养学报, 30(6): 2346–2351.]

Zhao QF, 2012. Preliminary research on functional roles in antimicrobial peptides from crude extracting in black soldier fly. Master thesis. Zunyi: Zunyi Medical University. [赵启凤, 2012. 黑水虻抗菌肽诱导及粗提物活性研究. 硕士学位论文. 遵义: 遵义医学院.]

Zhu JP, Liu CX, Yang SY, Wu BC, Hong YF, 2017. Research progress of insect (black soldier fly) resources in feeds. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, (13): 61–63. [朱建平, 刘春雪, 杨树义, 邬本成, 洪翊棻, 2017. 昆虫(黑水虻)资源在饲料中的研究进展. 黑龙江畜牧兽医, (13): 61–63.]