



宋瑜, 叶小梅, 孔祥平, 王聪, 马秋琴, 朱飞, 杜静. 黑水虻高密度养殖料温监测预警策略研究 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1083 - 1093.
SONG Yu, YE Xiao-Mei, KONG Xiang-Ping, WANG Cong, MA Qiu-Qin, ZHU Fei, DU Jing. Research on material temperature monitoring and early warning strategy under high density breeding condition of Black Soldier Fly (BSF) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1083 - 1093.

黑水虻高密度养殖料温监测预警策略研究

宋瑜^{1,2}, 叶小梅^{1,2}, 孔祥平², 王聪², 马秋琴², 朱飞², 杜静^{1,2*}

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院畜牧研究所, 农业农村部种养殖结合重点实验室, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210014)

摘要: 采用实验室盒养方式, 在高密度投虫工况下, 考察不同深度料温、不同料温监测方式以及不同监测点位等因素对黑水虻 *Hermetia illucens* 转化鸡粪原料过程中料温监测效果的影响, 以期优选出更有效的黑水虻养殖料温监测预警策略。结果表明, 黑水虻养殖物料表面温度明显高于其余深度, 随着物料深度增加呈逐渐降低趋势, 并且各深度料温与表面料温呈正相关关系 ($P < 0.05$); 热电阻、红外传感器和红外热成像等不同测温方式均可以测量料温, 通过对非接触测温方式与热电阻实测物料表面温度进行相关性分析发现, 红外传感器测温方式具有更好的相关性, 其二次多项式拟合方程精度最高 ($R^2 = 0.952$); 从不同测温位置效果分析, 整个养殖周期中心点平均料温明显高于四周, 可作为黑水虻养殖料温高温预警的主要监测点。该研究结果为后续研究料温调控策略和黑水虻养殖环境智能控制系统提供了科学依据。

关键词: 鸡粪; 黑水虻; 高密度; 养殖料温; 预警策略

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 05-1083-11

Research on material temperature monitoring and early warning strategy under high density breeding condition of Black Soldier Fly (BSF)

SONG Yu^{1,2}, YE Xiao-Mei^{1,2}, KONG Xiang-Ping², WANG Cong², MA Qiu-Qin², ZHU Fei², DU Jing^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu Province, China; 2. Institute of Livestock Research, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210014, China)

Abstract: To identify more effective strategies for monitoring material temperature in Black Soldier Fly breeding, the study examined the impact of material temperature depth, monitoring methods, and locations on the monitoring effectiveness during the conversion of chicken manure into feedstock. This was conducted under high-density feeding conditions in a laboratory setting. The findings revealed that the surface temperature of black soldier fly breeding materials was notably higher than at other depths, decreasing as the depth increased, and there was a positive correlation between surface and depth temperatures ($P < 0.05$). Thermal resistance, infrared sensors, and thermal imaging were all effective in measuring material temperature. Correlation analysis with thermal resistance measurements showed that infrared sensors provided superior correlations, with the quadratic polynomial equation demonstrating the highest accuracy ($R^2 = 0.952$). Temperature measurements at different locations indicated that the average center temperature throughout the breeding cycle was significantly higher than at the periphery, making it a key monitoring point for high-temperature early warnings in black soldier fly breeding. These results offer a scientific foundation for further research into material temperature control strategies and an

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD17020034); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX (23) 2006)

作者简介: 宋瑜, 男, 硕士研究生, 研究方向为昆虫转化有机固废配套装备研发, E-mail: sy191111@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 杜静, 男, 副研究员, 研究方向为有机废弃物资源化与循环模式构建, E-mail: dj1982111@126.com

收稿日期 Received: 2024-07-21; 接受日期 Accepted: 2024-08-26

intelligent control system for black soldier fly breeding environments.

Key words: Chicken manure; Black Soldier Fly; high density; material temperature; early warning strategy

黑水虻 *Hermetia illucens* L., 英文名称 Black Soldier Fly, 是双翅目水虻科扁角水虻属昆虫 (喻国辉等, 2009)。黑水虻幼虫可以将动物粪便、餐厨垃圾等有机废弃物迅速转化为高质量昆虫蛋白, 用作鱼类或家禽等动物饲料 (Bosch *et al.*, 2014), 而经过黑水虻幼虫处理后的虫沙可用作有机肥, 其中的有害微生物含量显著降低 (Diener *et al.*, 2011; Osama *et al.*, 2017)。利用黑水虻处理有机废弃物, 可以充分实现有机废弃物的资源化、无害化和减量化处理的目标, 而且不会产生其余污染物 (Wang *et al.*, 2017; Rehman *et al.*, 2019)。从黑水虻幼虫中可以提取生物柴油 (Lalander *et al.*, 2018), 也可以进一步增加黑水虻幼虫的利用价值 (Zheng *et al.*, 2011)。因此, 目前黑水虻转化有机废弃物已成为国内外的研究热点, 并且由实验室小规模逐渐向规模生产发展 (Miranda *et al.*, 2020; 孟雪松等, 2023)。

在黑水虻转化有机废弃物过程中, 温度是最重要的非生物因素, 它不仅影响发育速率, 而且对成虫寿命、幼虫存活率、生长状况、性别比例和种群增长参数均有显著影响。在 27℃、30℃ 和 36℃ 3 个条件下饲养黑水虻, 虽然在 36℃ 条件下有 73% 的幼虫发育到预蛹期, 只有 0.1% 的蛹成功羽化, 表明 36℃ 是黑水虻存活的高温阈值, 但从发育时间和存活率来看, 27℃ 是最佳饲养温度 (Tomberlin *et al.*, 2009)。另一方面, 低温同样会限制幼虫生长代谢, 从而减缓摄食, 减缓生长速度 (Gligorescu *et al.*, 2018)。研究认为幼虫存活低温阈值为 16~19℃ (Holmes *et al.*, 2016)。比较了 21℃、26℃、29℃ 3 个温度下的幼虫饲养状况, 得出黑水虻幼虫在 26℃ 时干物质减量化和收获的幼虫重均最高 (Arief *et al.*, 2021)。在此基础上, 有学者缩小了温度范围, 在 26~34℃ 多个温度梯度中确定了 28℃ 是幼虫最适宜的发育温度 (姬越, 2018)。

在大规模饲养幼虫的过程中, 幼虫会逐渐活跃并大量进食, 因幼虫之间的摩擦而剧烈产热, 导致物料温度升高。研究表明养殖温度越高, 黑水虻幼虫生长周期会缩短 4 d 左右 (郭凤达, 2012)。大多数有关温度的研究都是在小批量、低密度下对黑水虻的发育情况进行研究 (Yinghui *et al.*, 2023), 而利用黑水虻工厂化转化有机废弃物时,

需要大规模、高密度饲养幼虫来增加废弃物处理效率和商品虫生产性能 (徐春笑等, 2019)。然而, 随着养殖密度的增加, 不同养殖深度下的料温也不尽相同。关于养殖料温的监测存在内部料温较难监测、监测环境恶劣、监测手段单一等诸多问题。目前主要的测温方式以接触式的热电阻温度传感器为主 (徐猛等, 2023), 但在实际养殖工况下, 随着幼虫生长发育进程增长, 幼虫之间的活跃性将逐渐增加, 容易导致传感器移位使测量结果不准确, 加上养殖环境湿度高、氨气浓度大 (叶牧等, 2023), 极易腐蚀传感器进而影响测量准确性。目前温度检测技术在畜禽养殖方面得到大力发展, 主要有接触式与非接触式两种测温方法 (谢秋菊等, 2022)。接触式测温技术因其体积小、使用方便、灵敏度高、稳定性好、过载能力强等优点广泛应用在畜禽养殖中, 如 1983 年就通过热电阻传感器测定奶牛鼓膜附近温度 (Wiersma *et al.*, 1983), 但是接触式传感器是对单一或少数的研究对象进行测温, 在大规模养殖中极易增加时间、人力和设备成本; 而非接触式测温方式包括红外传感器、激光和红外热成像技术等。红外传感器 (Infrared thermometer, IT) 以其成本低、便携、易操作的特点在畜禽体温监测中得到广泛应用 (高利波等, 2010)。然而单一的体温数据不足以支持动物的健康检测, 红外热成像测温方法逐渐应用开来。随着红外图像处理技术不断发展, 非接触式红外热成像 (Infrared thermography, IRT) 测温方法在畜禽体温监测中得到大规模应用 (Fiebig *et al.*, 2018)。

因此, 为了对黑水虻高密度养殖工况下的料温进行快速监测预警, 采用实验室盒养方式, 在高密度投虫密度工况下, 考察不同深度料温、不同料温监测方式以及不同监测点位等因素对黑水虻转化鸡粪原料过程中料温监测效果的影响, 以期为后续研究料温快速预警和响应调控策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在江苏省农业科学院昆虫转化中试基地

进行，养殖场如图 1 所示。供试干鸡粪取自南京某蛋鸡场，含水率为 66.94%±1.96%。供试餐厨垃圾取自南京某公司经粉碎匀浆和脱油脱水后的三相细渣，含水率为 73.08%±1.25%。供试黑水虻虫卵来自中试基地自繁自育生产，将虫卵置于恒温恒湿箱（30℃，80%RH）孵化 3 d 成虫苗。孵化后的虫苗在恒温恒湿箱（30℃，80%RH）使用含水率 70%左右的麦麸连续饲喂 4 d 后，备用。

1.2 试验设计

试验采取盒养模式，养殖盒尺寸为 37 cm × 26.5 cm × 14 cm，底面积约 0.1 m²，设置 3 个平行，且 3 个养殖盒全部放置于含有泡沫板的保温箱内，保温箱尺寸为 60 cm × 60 cm × 60 cm。投虫密度为 200 000 larvae/m²，初始虫苗重量规格为 8.14±0.28 mg/larvae。将鸡粪、餐厨细渣以 1 : 1 的比例混合并调节初始含水率为 75%作为黑水虻养殖饵料，总投料量为 10 kg，采取 4 次投料方式（表 1）。各平行试验下分别设置 5 个红外传感器对 5 个点测温，同时采用热电阻对物料 5 个点（包括四角和中心点）及其各点正下方 4 个不同深度料温进行监测，记录温度时间为每天 8:30 与 16:30，并且于每天 8:30，12:30，16:30，20:30 用红外热成像对养殖盒正上方全景温度和黑水虻幼虫分布进行监测记录，同时检测并记录养殖环境温度和湿度。试验第 48、96、144、192 和 240 小时随机采集 30 头幼虫样品，测定虫长虫重。

1.3 测试指标及方法

本试验采用ABSD-01A非接触式红外测温传感器测定养殖物料表面温度，温度数据由U3-A36无纸记录仪记录保存（江苏爱测仪表科技有限公司）；采用PT100温度传感器记录物料表面及其下方温度，温度数据也由无纸记录仪记录保存；采用P20Max便携式红外热像仪（杭州海康微影传感科技有限公司）获取黑水虻物料的红外热成像图片，采用微影热视（杭州海康微影传感科技有限公司）对采集到的红外热成像图片进行目标区域温度提取；采用S21AN复合温湿度传感器（徐州法拉电子科技有限公司）记录养殖环境温湿度。

平均虫重采用百分之一天平随机称取 30 头不同生长期黑水虻幼虫虫重，折算单头幼虫重量，以 mg/larvae 为单位，并计算虫重增长率；平均虫长采用游标卡尺随机测量 30 头不同生长期黑水虻幼虫的虫长，折算单头幼虫长度，以 mm/larvae 为单位，并计算虫长增长率。

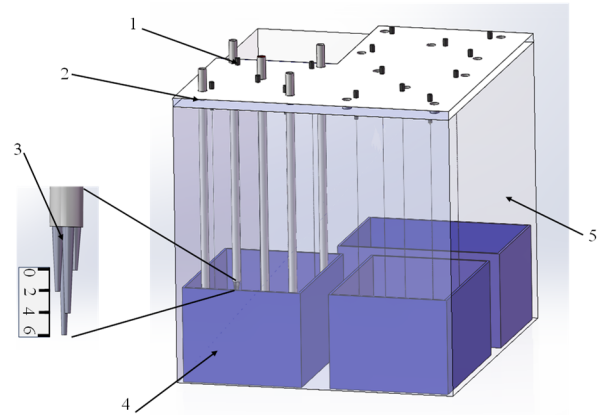


图 1 养殖场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of breeding scene

注：1，红外传感器；2，盖板；3，热电阻；4，养殖盒；5，养殖外盒。Note: 1, Infrared sensor; 2, Cover plate; 3, Thermistor; 4, Breeding box; 5, Breeding outer box.

表 1 试验投料量

Table 1 Test feeding quantity

投料时间 (h)	投料量 (kg)	物料厚度 (cm)
Feeding time	Feeding quantity	Material thickness
0	1.5	3.0
48	2.5	5.5
96	3.0	7.5
156	3.0	8.5

幼虫增长率 (%) = (本次幼虫体重 (体长) - 上次幼虫体重 (体长)) / 本次幼虫体重 (体长) × 100

单位面积虫产量 (kg/cm²) = 幼虫收获重量 / 幼虫养殖面积

物料减量率 (%) = (初始物料干重 - 结束物料干重) / 初始物料干重 × 100

1.4 试验数据处理与分析

对红外热成像图进行处理，提取出养殖料温最高值和平均值。所有温度数据采用Excel整理后，采用IBM SPSS Statistics 25软件进行统计分析和相关性分析。采用Origin 2021进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同深度平均料温变化

试验分别于 48 h、96 h 和 156 h 进行分次补料，在第 60 小时和第 108 小时开始监测 4 cm 和 6 cm 深度下的物料温度。试验周期内，养殖环境温度在

24.7~33.9℃下进行变化,且表现出来明显的昼夜差异。环境温度一般在 14:00 时因热量积累达到当日峰值,从 14:00 后开始逐渐降低,在次日 7:00 达到最低点(袁海航等,2023)。不同深度下的物料温度均随环境温度变化而变化。

试验开始至 36 h 时,表层温度剧烈上升,远远大于 2 cm 深度的物料温度,可能是黑水虻幼虫集中在表面快速取食。随后在 48 h 时表面温度有一定下降,下降幅度大于 2 cm 深度,可能是黑水虻幼虫吃完第一批料之后活跃性降低,且幼虫具有负趋光性。从 48 h 第 2 次加料到 84 h 之间,不同深度的物料温度都开始上升,其中表面温度上升最为剧烈达到 42.7℃,远高于黑水虻幼虫的正常发育温度 27~30℃,其余深度温度均有不同程度的上升,红外传感器的温度上升趋势也与表面温度大致相同。第 96 小时开始第 3 次加料,加料前料温下降可能是由于环境温度降低和饲料被取食完导致

的。在第三次加料后的 12 h 内,物料温度迅速上升,然后到逐渐下降到第四次加料的时间点。在两次加料之间,物料温度呈现出先上升后下降的情况,可能是由于加料后黑水虻幼虫在取食物料时,活动力增强,加剧幼虫之间的摩擦导致温度上升,待黑水虻幼虫取食完物料后,物料温度又会下降。第 156 小时加料之后物料温度在第 168 小时达到最高点,之后开始逐渐降低,此时已到达养殖后期,幼虫进食活力减弱,且随着物料逐渐被取食完全,幼虫活力进一步降低。在第 216 小时由于环境温度上升导致物料温度小幅度上升,表明在黑水虻幼虫活力较低的养殖前期与后期,物料温度与环境温度密切相关(图 2)。

总之,对黑水虻整个养殖周期内不同深度料温监测表明,养殖表面料温明显高于其余深度,且随着物料深度增加呈现逐渐降低趋势,该结果为快速监测预警养殖料温超温现象提供了便利。

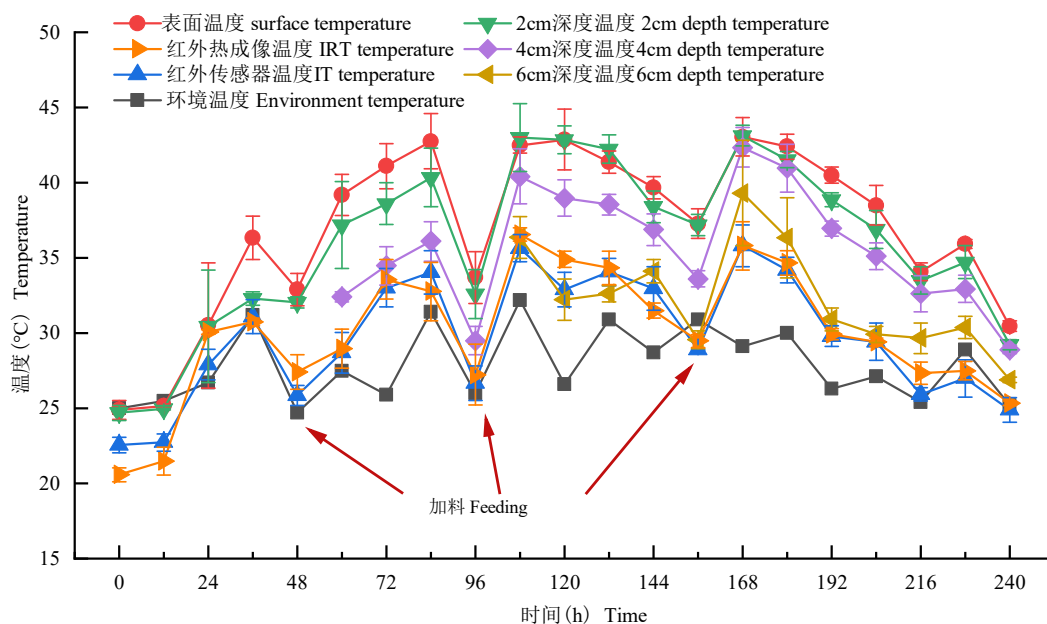


图 2 不同深度和不同测温措施温度

Fig. 2 Different depths and different temperature measurement measures

2.2 同一位置不同深度平均料温变化

采用接触式热电阻、非接触式的红外传感器和红外热成像监测物料表面温度,发现红外传感器温度和红外热成像温度明显低于热电阻实测温度数值,可能是由于在养殖过程中黑水虻幼虫喜聚集,导致局部区域温度偏高。通过对比 5 个红外传感器最高温度 (Max IT)、红外热成像最高温度 (Max IRT) 和热电阻实测表面温度 (图 3),结果表明三者具有相同的变化趋势,且红外热成像最高温度与热电阻实测表面温度数值差异较小。通

过对表面温度、红外传感器温度、深度 2 cm、深度 4 cm、深度 6 cm、环境温度、最大红外传感器温度、最大热成像温度进行 Pearson 相关分析,除环境温度和 6 cm 深度温度之间存在显著正相关关系 ($P < 0.05$) 外,其余各温度参数之间均呈现极显著正相关关系 ($P < 0.01$),并且红外传感器温度、红外热成像温度分别与热电阻实测表面温度之间最为相关,相关系数 r 分别为 0.924 和 0.925,表明采用红外传感器和红外热成像监测物料表面温度具有很好的可行性 (表 2)。

表 2 不同温度之间相关系数
Table 2 Correlation coefficient between different temperatures

	表面温度 Surface temperature	红外传感器温度 IT temperature	红外热成像温度 IRT temperature	2 cm深度温度 2 cm depth temperature	4 cm深度温度 4 cm depth temperature	6 cm深度温度 6 cm depth temperature	环境温度 Environment temperature	最大红外温度 Max IT temperature	最大热成像温度 Max IRT temperature
表面温度 Surface temperature	1								
红外传感器温度 IT temperature	0.924**	1							
红外热成像温度 IRT temperature	0.925**	0.963**	1						
2 cm深度温度 2 cm depth temperature	0.974**	0.913**	0.913**	1					
4 cm深度温度 4 cm depth temperature	0.872**	0.896**	0.894**	0.929**	1				
6 cm深度温度 6 cm depth temperature	0.746**	0.906**	0.853**	0.805**	0.920**	1			
环境温度 Environment temperature	0.598**	0.753**	0.628**	0.583**	0.631**	0.691*	1		
最大红外温度 Max IT temperature	0.912**	0.966**	0.958**	0.878**	0.884**	0.843**	0.680**	1	
最大热成像温度 Max IRT temperature	0.861**	0.900**	0.892**	0.844**	0.784**	0.772**	0.576**	0.878**	1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ）；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。Note: * indicated significant correlation ($P<0.05$); ** indicated extremely significant correlation ($P<0.01$).

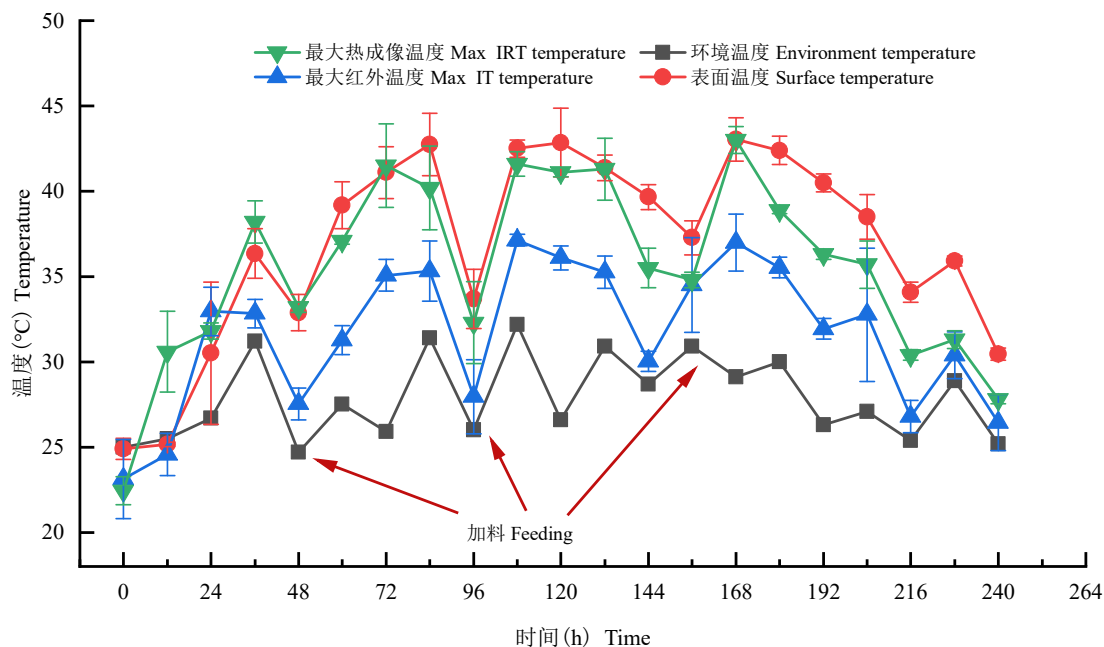


图3 红外与热成像测温最大值比较

Fig. 3 Comparison of maximum value of infrared and thermal imaging temperature measurement

2.3 不同监测点表面料温变化

因黑水虻幼虫具有扎堆、聚集的特性，会造成聚堆区域温度远高于周围区域。热电阻和红外传感器由于测温区域集中在一个点位，测得的温度难以反映整个物料表面温度。因此，表面料温监测点位选择的代表性对于快速预警的准确度具有重要意义。通过分析 5 个监测点位表面温度变化，两种测温方式所测的 5 个点温度均和物料表面

平均温度呈极显著相关 ($P<0.01$)，各个监测点之间也呈显著相关 ($P<0.05$)。从监测方式分析看，热电阻测温方式下物料表面温度与监测点 1 相关性高 ($r=0.980$)，监测点 3 次之 ($r=0.959$)，而监测点 4 相关性最差 ($r=0.914$)，而红外传感器测温方式下物料表面温度与监测点 3 相关性最强 ($r=0.942$)，与监测点 2 相关性最差 ($r=0.858$)。

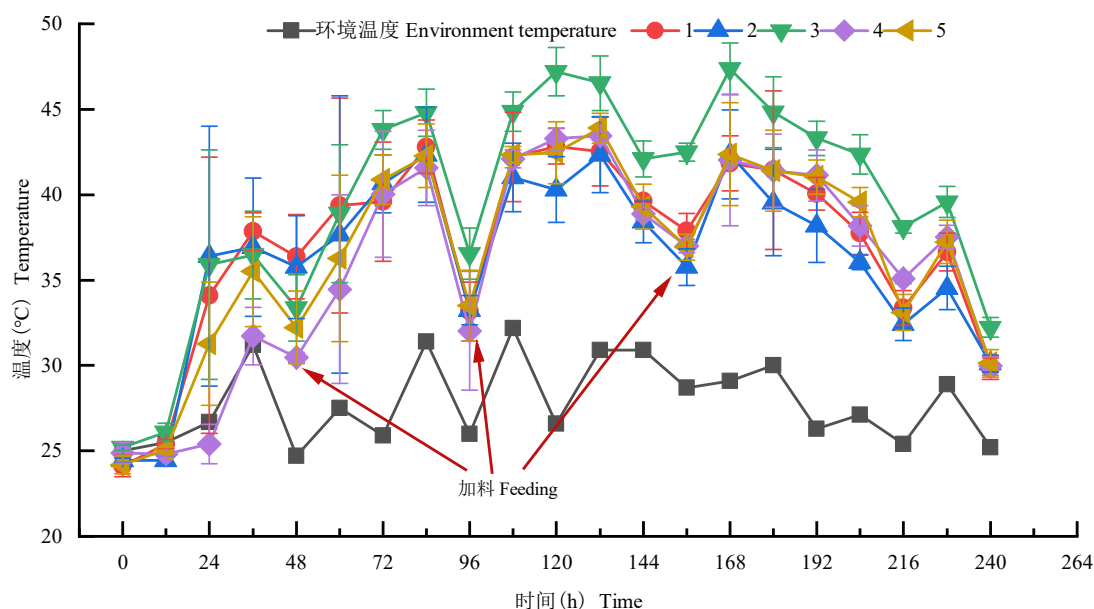


图4 不同监测点表面料温的热电阻数值变化

Fig. 4 Thermistor numerical variation of surface material temperature at different monitoring points

注：5个数字分别代表5个测温点。Note: 5 numbers represented 5 temperature measurement points respectively.

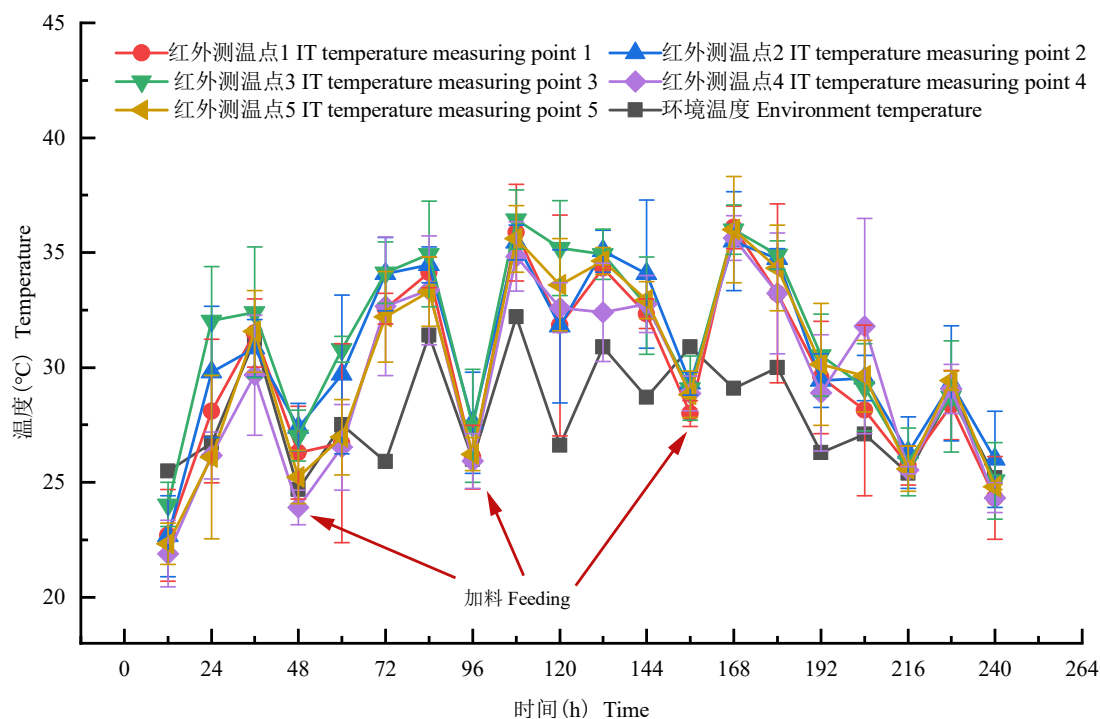


图5 不同监测点表面料温的红外数值变化

Fig. 5 Infrared numerical variation of surface materia temperatura at different monitoring points

黑水虻幼虫在养殖过程中极易发生聚堆现象,此时会造成局部温度远远大于周围温度。从统计学角度看,测温点越多,会消除更多的随机异常温度,有更好的稳定性,但是测量点多势必增加监测成本而且过程复杂、费时。对两种测温方式在5个测温位置测得温度与物料表面温度的差值进行分析。物料表面平均温度与热电阻测得5点温度的差值平均值分别为0.82、1.55、1.07、1.69,温度差值最大值分别为2.48、3.56、2.62、9.33、3.46,温度差值相对标准偏差分别为0.76、0.61、0.57、1.33、1.03,而与红外传感器温度测得5点温度的差值平均值分别为8.25、7.14、6.23、8.54、8.08,温度差值最大值分别为12.48、12.06、9.96、12.65、12.21,温度差值相对标准偏差分别为0.29、0.37、0.25、0.26、0.26(表3);同时围绕两种测温方式对5个测温位置之间进行差异显著性分析发现,无论是热电阻还是红外传感器方式,均表现为测温点3分别与测温点1、2、4、5存在显著差异($P<0.05$),而测温点1、2、4、5相互之间无显著差异($P<0.05$)。

可见,热电阻测温方式较红外传感器测温方式更接近物料表面平均温度,红外测温点3相比同类测温方式更接近物料表面平均温度,且显著高于其余测温点,因此可作为黑水虻养殖料温高温预警的主要监测点。然而,从结果也同样看到红外传感器测温方式在黑水虻养殖料温探测中尚存在一定干扰,后续需要建立与热电阻温度之间的相关性模型和校正因子来准确反映养殖料温。

2.4 黑水虻养殖IT、IRT、MIRT与物料表面平均温度的回归分析

对养殖物料表面平均温度与红外传感器温度、红外热成像温度、红外热成像最大温度分别进行线性回归和曲线拟合分析,所有回归方程的 P 均小于0.01,说明能通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验,自变量对因变量有显著影响,回归效果显著($P<0.0001$)。比较不同拟合方程的回归系数,发现红外传感器温度与物料表面温度二次多项式拟合方程精度最高($R^2=0.952$)(表4)。可见,通过建立红外传感器测温方式与热电阻实测物料表面温度之间的相关性模型具有更好的准确性。

表 3 物料表面温度与不同方式在 5 点测温差值的统计结果

Table 3 Statistical results of the difference between the surface temperature of the material and the temperature measurement at five points in different ways

测温点 Temperature measuring point	最大差值 Maximum difference	最小差值 Minimum difference	平均差值 Average difference	相对标准偏差 Relative standard deviation
热电阻测温点1 Thermal resistance temperature measuring point 1	2.48	0.13	0.82	0.76
热电阻测温点2 Thermal resistance temperature measuring point 2	3.56	0.35	1.55	0.61
热电阻测温点3 Thermal resistance temperature measuring point 3	2.62	0.03	1.07	0.57
热电阻测温点4 Thermal resistance temperature measuring point 4	9.33	0.02	1.69	1.33
热电阻测温点5 Thermal resistance temperature measuring point 5	3.46	0.09	0.87	1.03
红外传感器测温点1 IT temperature measuring point 1	12.48	2.46	8.25	0.29
红外传感器测温点2 IT temperature measuring point 2	12.06	1.13	7.14	0.37
红外传感器测温点3 IT temperature measuring point 3	9.96	2.49	7.23	0.25
红外传感器测温点4 IT temperature measuring point 4	12.65	3.26	8.54	0.26
红外传感器测温点5 IT temperature measuring point 5	12.21	2.83	8.08	0.26

表 4 物料表面温度拟合方程比较

Table 4 Comparison of fitting equations for material surface temperature

回归方程 Regression equation	R^2	F
$T_{0\text{ cm}}=1.245 T_{IT} + 0.578$	0.868	92.439
$T_{0\text{ cm}}=-93.494 + 7.660 T_{IT} + -0.107T_{IT}^2$	0.952	128.953
$T_{0\text{ cm}}=1.055T_{IT}^{1.053}$	0.875	97.634
$T_{0\text{ cm}}=1.189T_{IRT} + 1.859$	0.856	107.201
$T_{0\text{ cm}}=-41.022 + 4.108T_{IRT}+ -0.049T_{IRT}^2$	0.889	67.959
$T_{0\text{ cm}}=0.948 T_{MIRT} + 3.807$	0.741	51.472
$T_{0\text{ cm}}=-27.503 + 2.721 T_{MIRT} + -0.025 T_{MIRT}^2$	0.749	25.331

注： $T_{0\text{ cm}}$ ，热电阻实测物料表面平均温度； T_{IT} ，红外传感器温度； T_{IRT} ，红外热成像温度； T_{MIRT} ，红外热成像最大温度。
Note: $T_{0\text{ cm}}$, Average temperature of the material surface measured by thermal resistance; T_{IT} , Temperature of infrared sensor; T_{IRT} , Temperature of infrared thermal imaging; T_{MIRT} , Maximum temperature of infrared thermal imaging.

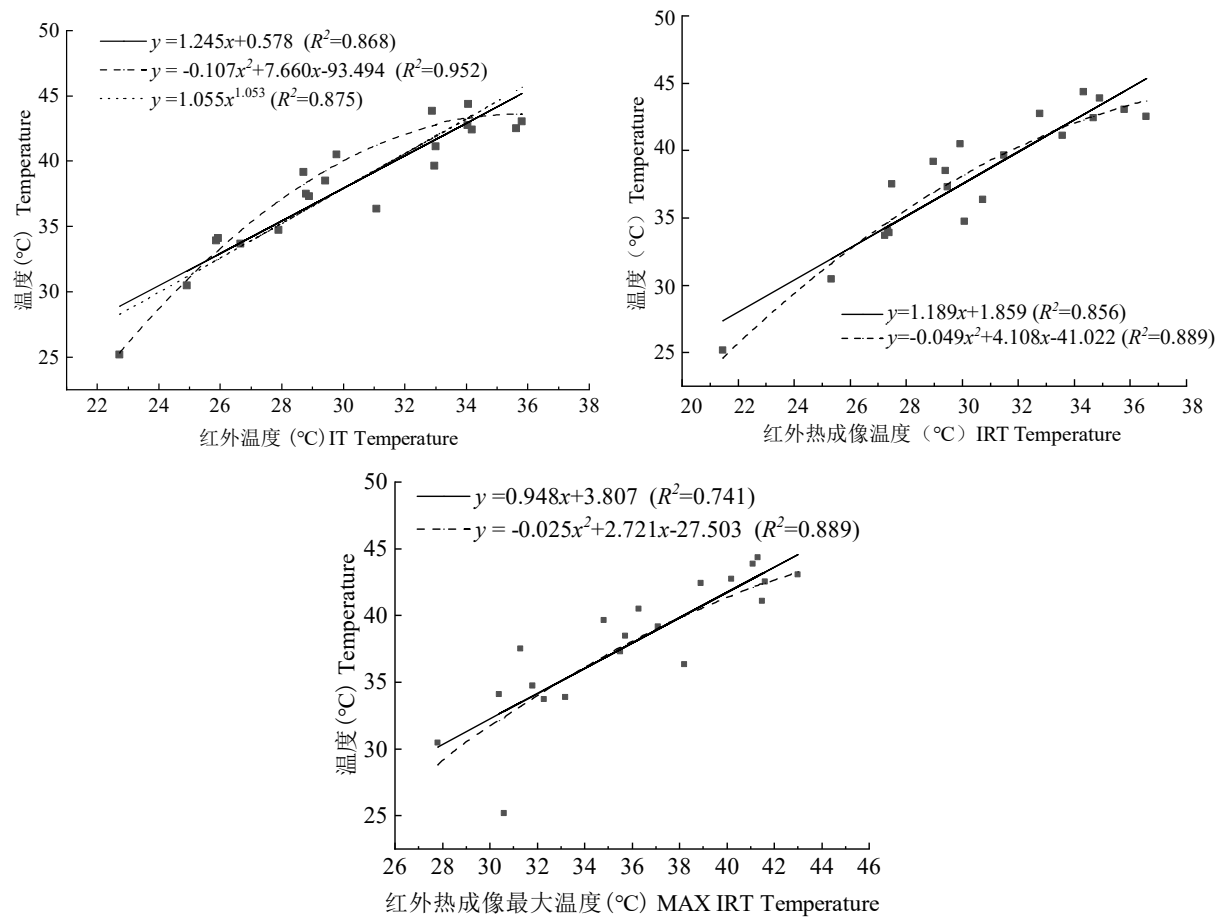


图6 红外温度、红外热成像温度、红外热成像最高温度对物料表面平均温度的回归结果
Fig. 6 Regression results of infrared temperature, infrared thermography temperature, maximum infrared thermography temperature and average surface temperature of materials

2.5 黑水虻幼虫生长发育与生产性能分析

黑水虻幼虫平均虫重与平均虫长表现为前期迅速增长随后逐渐趋缓。其中第 48 小时的虫长增长率达到最大值 188.3%，虫重增长率达到 247.4%，说明幼虫正在剧烈取食，虫长虫重迅速增加（图 7，图 8），然而在 4 次投料前后的物料温度波动较大，从而影响幼虫的生长效率，这与沈礼晨等人（2022）的研究结果相一致。也有研究表明前期高密度饲养有利于黑水虻幼虫增重，到养殖中后期因幼虫抱团习性，增加了幼虫之间的竞争关系，平均到每条幼虫的饲料量减少（李鑫，2021）。同时在高投虫密度工况下，不同的投料时间节点及投料量运筹方案会对黑水虻饲喂是否及时产生影响，从而影响幼虫生长发育。

在 高密度 养殖黑水虻 工况下，黑水虻幼虫对物料的利用率提高，从而增加了单位面积虫产量和物料减量率。同时随着投虫密度增加也会缩短养殖周期（张铭杰，2019）。本次试验下单位面积

虫产量达到 $18.37 \pm 0.32 \text{ kg/m}^2$ ，物料减量率达到 $51.40\% \pm 1.94\%$ ，养殖周期在 10 d。说明高密度养殖工艺下可实现缩短幼虫养殖周期，提高单位面积幼虫产量，从而提升效益。

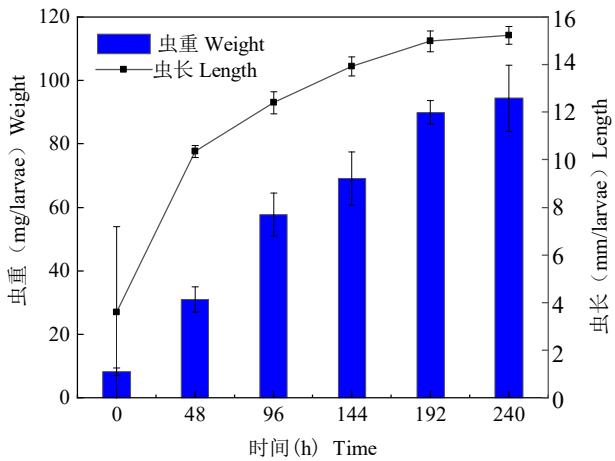


图7 黑水虻幼虫虫重与虫长变化
Fig. 7 Variation in weight and length of black soldier fly

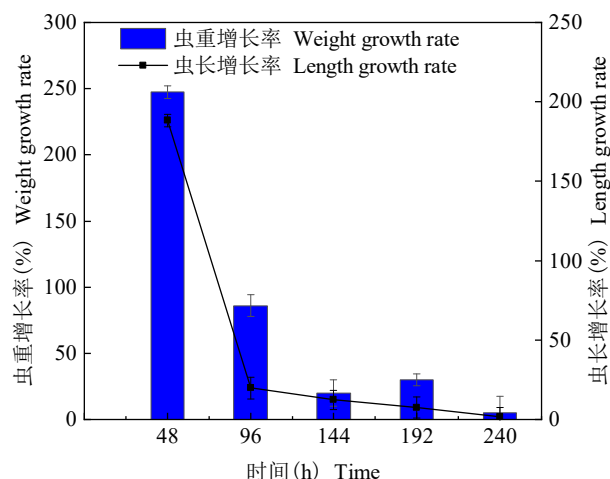


图8 黑水虻幼虫虫重与虫长增长率

Fig. 8 Growth rate of body weight and body length of black soldier fly

3 结论与讨论

3.1 讨论

黑水虻养殖过程中, 物料温度的变化能够很明显地反映黑水虻幼虫的活力状况和物料转化率, 进而影响幼虫的生长状况, 最终体现在黑水虻幼虫的产量和经济效益。研究表明, 黑水虻幼虫适宜生长的温度范围为 30~38℃, 生长温度上限为 43℃ (Tomberlin *et al.*, 2002; Murali *et al.*, 2023), 物料温度过高很容易造成幼虫外逃死亡, 温度过低又会导致幼虫活力降低, 降低废弃物转化效率 (Chia *et al.*, 2018)。工厂化养殖黑水虻中, 较高的投虫密度可以得到较高的黑水虻幼虫总产量, 提高整体经济效益 (Barragan-Fonseca *et al.*, 2018), 但势必会增加环境温度和物料温度之间的差异, 依靠环境温度监测难以真实反映黑水虻幼虫生长的微环境温度。此外, 考虑到黑水虻养殖环境湿度大、腐蚀性较强, 优选出简单、便捷、高效的料温监测方式非常必要。由显著性分析结果, 红外传感器、红外热成像、红外热成像最大值与物料表面温度的相关系数分别为 0.924、0.925、0.861。红外热成像虽然能够迅速监测到物料温度的最大值, 同时可以观察到幼虫的分布情况和异常状态, 但是红外热成像测温易受到距离、发射率、反射温度和环境参数等影响, 测温精度难以保证, 而且便捷性较低 (图 9)。而相比较热电阻和红外热成像测温方式, 红外传感测温安装便捷, 测温简单, 受干扰程度相对较低, 且

与热电阻实测表面平均料温进行回归分析时, 其拟合优度 R^2 最高, 达 0.952。因此在 3 种测温方法中, 选择红外传感器作为黑水虻养殖料温快速监测预警的方式。

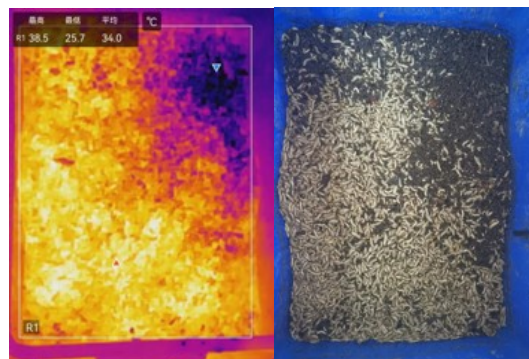


图9 黑水虻实际养殖状况与热成像对比

Fig. 9 Comparison between actual breeding status and thermal imaging of black soldier fly

3.2 结论

(1) 从养殖物料不同深度分析表明, 黑水虻养殖物料表面温度明显高于其余深度, 随着物料深度增加呈逐渐降低趋势, 并且各深度料温与表面料温呈正相关关系 ($P < 0.05$)。

(2) 从不同测温方式效果分析表明, 热电阻、红外传感器和红外热成像均可以测量料温, 其中热电阻测量精度高, 可适应测量不同深度料温, 但是便捷程度较低; 红外传感器和红外热成像仅能测量物料表面温度, 但测温比较便捷。通过对非接触测温方式与热电阻实测物料表面温度进行相关性分析发现, 红外传感器测温方式具有更好的相关性。

(3) 从不同测温位置分析表明, 整个养殖周期中监测点3 (即中心点) 平均料温明显高于四周, 因此将中心点表面作为黑水虻养殖料温高温预警的主要监测点。

参考文献 (References)

- Arief SY, Idat GP, Lia N, *et al.* Decomposition characteristics of selected solid organic wastes by black soldier fly (BSF) larvae as affected by temperature regimes [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 30 (5): 4343-4351.
- Barragan-Fonseca KB, Dicke M, van Loon JJA. Influence of larval density and dietary nutrient concentration on performance, body protein, and fat contents of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2018, 166 (9): 761-770.
- Bosch G, Zhang S, Oonincx DG, *et al.* Protein quality of insects as potential ingredients for dog and cat foods [J]. *Journal of Nutritional Science*, 2014, 3: e29.

- Chia SY, Tanga CM, Khamis FM, *et al.* Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens*: Implications for mass production [J]. *Public Library of Science One*, 2018, 13 (11): e0206097.
- Čiřková H, Newton LG, Lacy CR, *et al.* The use of fly larvae for organic waste treatment [J]. *Waste Management*, 2015, 35: 68-80.
- Diener S, Solano SMN, Gutiérrez RF, *et al.* Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2011, 2 (4): 357-363.
- Fiebig K, Jourdan T, Kock MH, *et al.* Evaluation of infrared thermography for temperature measurement in adult male NMRI Nude Mice [J]. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*, 2018, 57 (6): 715-724
- Gao LB, Duan G, Yin GF, *et al.* Trial results of infrared thermometer in the application of ante-mortem body temperature screening in the pig slaughterhouse [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 37 (9): 235-237. [高利波, 段纲, 尹革芬, 等. 红外线体温仪在生猪屠宰场体温筛查中的试用效果 [J]. 中国畜牧兽医, 2010, 37 (9): 235-237]
- Gligorescu A, Toft S, Hauggaard-Nielsen H, *et al.* Development, metabolism and nutrient composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*; Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature and diet [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2018, 4 (2): 123-133.
- Guo FD. Studies on the Biology of *Hermertia illucens* and the Intestinal Bacteria of *Hermertia illucens* Larvae [D]. Taian: Shandong Agricultural University Master Thesis, 2012. [郭凤达. 亮斑扁角水虻生物学及其幼虫肠道细菌的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学硕士论文, 2012]
- Holmes L, VanLaerhoven S, Tomberlin J. Lower temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2016, 2 (4): 255-262.
- Ji Y. Studies of Adaptation to Environment Complex for *Hermetia illucens* L. [D]. Guiyang: Guizhou Normal University Master Thesis, 2018. [姬越. 亮斑扁角水虻的环境适应性研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学硕士论文, 2018]
- Lalander C, Diener S, Zurbrügge C, *et al.* Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 208: 211-219.
- Li X. Optimization of Growth Conditions of *Hermetia Illucens* and Study on Efficiency of Food Waste Treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology Master Thesis, 2021. [李鑫. 黑水虻生长条件优化及处理餐厨垃圾的效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文, 2021]
- Meng XS, Xu M, Ye XM, *et al.* Effect of insect density on the physical and chemical characteristics and production performance of black soldier fly larvae (bsfl) and breeding materials under the combined regulation of aeration and filler [J]. *Feed Industry*, 2023, 44 (16): 17-23. [孟雪松, 徐猛, 叶小梅, 等. 曝气与填料组合调控下投虫密度对黑水虻虫料理化特性及生产性能的影响 [J]. 饲料工业, 2023, 44 (16): 17-23]
- Miranda DC, Cammack AJ, Tomberlin KJ. Mass production of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) reared on three manure types[J]. *Animals*, 2020, 10 (7) :1243.
- Murali P, Alexander K, Arne-Jens H, *et al.* Modelling and optimal control of growth, energy, and resource dynamics of *Hermetia illucens* in mass production environment [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 206: 107649.
- Osama E, Dingzhong Z, Qi S, *et al.* Screening, expression, purification and functional characterization of novel antimicrobial peptide genes from *Hermetia illucens* (L.) [J]. *Public Library of Science One*, 2017, 12 (1): e0169582.
- Rehman UK, Rehman UR, Somroo AA, *et al.* Enhanced bioconversion of dairy and chicken manure by the interaction of exogenous bacteria and black soldier fly larvae [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 75-83.
- Shen LC, Ye XM, Kong XP, *et al.* Effect of different feeding methods on the growth performance of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (5): 1271-1277. [沈礼晨, 叶小梅, 孔祥平, 等. 不同投料方式对黑水虻幼虫生长性能的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (5): 1271-1277]
- Tomberlin JK, Adler PH, Myers HM. Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature [J]. *Environmental Entomology*, 2009, 38 (3): 930-934.
- Tomberlin KJ, Sheppard CD, Joyce AJ. Selected life-history traits of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2002, 95 (3): 379-386.
- Wang YS, Shelomi M. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food [J]. *Foods*, 2017, 6 (10): 91.
- Wiersma F, Stott GH. A technique for securing a temperature probe adjacent to the tympanic membrane in bovine [J]. *Transactions of the Asae*, 1983, 26 (1): 185-187.
- Xie QJ, Liu XF, Zeng P, *et al.* Technology and application in automatic monitoring of the body temperature for livestock and poultry [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (15): 212-225. [谢秋菊, 刘学飞, 郑萍, 等. 畜禽体温自动监测技术及应用研究进展 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (15): 212-225]
- Xu CX, Lu YX, Jiang YX, *et al.* Effect of the addition amount of *Hermetia illucens* L. egg on bioconversion of food waste [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (13): 85-87, 111. [徐春笑, 吕永兴, 江亚雄, 等. 黑水虻虫卵添加量对餐厨垃圾生物转化的影响 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (13): 85-87, 111]
- Xu M, Meng XS, Ye XM, *et al.* Effects of feeding times on the performance of scale box breeding of black soldier fly [J]. *Feed Industry*, 2023, 44 (16): 36-43. [徐猛, 孟雪松, 叶小梅, 等. 投料次数对黑水虻规模化盒养生产性能的影响 [J]. 饲料工业, 2023, 44 (16): 36-43]
- Ye M, Kong XP, Ye XM, *et al.* Influences of food waste moisture content and C/N ratio on gas release during breeding of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51 (4): 220-225. [叶牧, 孔祥平, 叶小梅, 等. 餐厨垃圾含水率和碳氮比对黑水虻幼虫养殖过程中气体释放的影响 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51 (4): 220-225]
- Yinghui W, Yanan Z, Jiangfeng W, *et al.* Temperature dependent development of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) from Yangtze River Delta region of China [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2023, 26 (4): 102163.
- Yu GH, Chen YH, Yu ZN, *et al.* Research progression on the larvae and prepupae of black soldier fly *Hermetia illucens* used as animal feedstuff [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2009, 46 (1): 41-45. [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, 46 (1): 41-45]
- Yuan HH, Li HH, Yan T, *et al.* Effects of environmental factors in chicken house in winter on production performance, egg quality and blood indexes of laying hens [J]. *China Poultry*, 2023, 45 (3): 71-78. [袁海航, 李海花, 晏婷, 等. 冬季鸡舍环境因子对蛋鸡生产性能、蛋品质及血液指标的影响研究 [J]. 中国家禽, 2023, 45 (3): 71-78]
- Zhang MJ. Research on Rural Putrescible Waste Disposed by Black Soldier Fly [D]. Hangzhou: Zhejiang University Master Thesis, 2019. [张铭杰. 利用黑水虻处理农村易腐垃圾技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2019]
- Zheng L, Li Q, Zhang J, *et al.* Double the biodiesel yield: Rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production [J]. *Renewable Energy*, 2011, 41: 75-79.