

秦朝伟,邵丹,邹辰卉,等.基于全纯培养基的黑水虻生长关键营养因子优化[J].华中农业大学学报,2025,44(6):305-313.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.030

基于全纯培养基的黑水虻生长关键营养因子优化

秦朝伟¹,邵丹²,邹辰卉¹,魏佳慧¹,苏磊³,龙梦君⁴,赵姗姗⁴,
戴梦红²,李庆⁴,张振宇¹

1. 华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070; 2. 华中农业大学动物科学技术学院、动物医学院,武汉 430070; 3. 华中农业大学生命科学技术学院,武汉 430070; 4. 华中农业大学化学学院,武汉 430070

摘要 为揭示黑水虻(*Hermetia illucens* L.)的营养需求特征及生长关键营养因子的条件,利用全纯培养基饲养黑水虻,并通过控制氮源、碳源、碳氮比和虫/干料比,对黑水虻的生长发育进行评估。结果显示,黑水虻饲养在全纯培养基上表现出较优的生长性能,包括幼虫存活率(84.38 ± 1.18)%、幼虫期(29.04 ± 0.43)d、虫质量峰值(119.03 ± 1.82)mg、化蛹率(60.59 ± 1.50)%、蛹期(14.70 ± 0.16)d和羽化率(80.20 ± 3.65)%。与果蝇培养基相比,全纯培养基表现出更优的性能,但富营养培养基在某些方面表现更佳。综合分析幼虫的单虫鲜质量、饲料减少率和生物转化率,发现氨基酸是最佳氮源,葡萄糖和淀粉是最佳碳源,最适宜的碳氮比为15,最佳的虫/干料比为1:0.15。结果表明,本研究开发的全纯培养基能够使黑水虻完成生命周期,以葡萄糖、淀粉和氨基酸为碳氮源,在碳氮比15、虫/干料比1:0.15为饲养条件时能够获得更优的生长性能。

关键词 黑水虻; 全纯培养基; 碳源; 氮源; 碳氮比; 虫/干料比

中图分类号 S899.9; S963.32⁺9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0305-09

黑水虻(*Hermetia illucens* L.)作为一种资源昆虫,能有效转化生物废弃物为高蛋白生物量和富含氮的有机肥料,其虫体富含多种营养物质,包括优质蛋白质、必需氨基酸、不饱和脂肪酸和微量元素,因此在畜禽和水产养殖中作为新型蛋白质源具有巨大潜力,并受到全球关注^[1-4]。培养基的开发与应用对于深入研究黑水虻的生物转化特性至关重要,不仅提供了一个清晰、可控的研究平台,还有助于解析黑水虻对不同营养成分的利用效率,进而优化其生物转化条件。

目前,针对黑水虻的培养基研究已取得一定进展,包括Gainesville培养基、鸡饲料、食物残渣以及农业副产品等^[5-6]。然而,这些培养基多为混合物,营养成分复杂且不明确,限制了研究的一致性和可比性^[7-8]。由于不同基质的营养成分差异显著,且试验结果缺乏一致性和可比性,限制了对黑水虻营养需求及其转化生物废弃物机制的深入理解,阻碍了黑水虻养殖工艺的优化和产业化发展^[9]。为解决这一

问题,近年来,众多学者已尝试开发不同类型的黑水虻人工培养基。例如,Barragan-Fonseca等^[10]使用鸡饲料和纤维素制成的培养基,明确了蛋白质、脂肪和非纤维素碳比例;Woods等^[11]则用植物蛋白、干血粉和猪脑组织制成的培养基,进一步揭示了粗纤维和特定氨基酸的含量;乔红皓等^[12]采用去离子水、葡萄糖、琼脂、酵母提取物和无机盐的配方,实现了培养基碳氮比的精确调控。尽管这些研究为黑水虻培养基的优化提供了重要参考,但培养基中部分组分(例如前述的鸡饲料、猪脑组织、酵母提取物)的营养组成仍不清晰。这限制了研究者对营养组分进行精确调控,从而影响了黑水虻营养需求研究的深入以及对生物转化过程的精细优化。因此,开发组分明确、成分纯净的全纯培养基将有助于为精确解析黑水虻的营养需求和提升其生物转化效率提供重要技术基础^[13]。为解决上述问题,本研究拟开发1种组分明确、成分纯净的全纯培养基,并筛选最优碳源、氮源种类、碳氮比以及最适虫/干料比等条件,通过单因

收稿日期:2025-01-27

基金项目:国家自然科学基金项目(42177100);国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2023YFE0198000);湖北洪山实验室基金项目(2021hskf011)

秦朝伟,E-mail:qincw2000@163.com

通信作者:张振宇,E-mail:zhangzhenyu@mail.hzau.edu.cn;李庆,E-mail:liqing@mail.hzau.edu.cn

素试验对比不同因素水平对黑水虻幼虫生长性能的影响,旨在精确解析黑水虻的营养需求、提升其生物转化效率,为黑水虻高效养殖提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1)黑水虻虫源及饲养。亮斑扁角水虻幼虫,武汉品系,来自华中农业大学微生物农药国家工程研究中心。整个饲养过程保持环境温度为 $(28\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度约为 $(70\pm 5)\%$ 、光周期设定12L:12D。初孵幼虫在富营养培养基^[14]中饲养6 d后用于本研究。

2)3种培养基的制备。评估全纯培养基对黑水虻生长性能的影响,并与相似的果蝇培养基及黑水虻富营养培养基进行比较。

全纯培养基:参考张振宇等^[15]报道的人工培养基并进行改进。

果蝇培养基:称取20.87 g果蝇培养基粉剂(青岛海博生物技术有限公司),加热溶解于100 mL蒸馏水中,稍冷后加入0.65 mL丙酸混匀,分装至容器中,冷却凝固后使用。

富营养培养基:将麸皮和小麦次粉以质量比1:1混合,加水搅拌,调整为相对含水率至70%^[14]。

1.2 试验处理

1)氮源单因素试验。100 g饲料饲养100头黑水虻幼虫,固定碳氮含量,调控氮的来源。选择含氮废物中常见的氮源,包括氨基酸、尿素、尿囊素、肌酐、硫酸铵和硝酸钠,进行对比试验以筛选最佳氮源。

2)碳源单因素试验。100 g饲料饲养100头黑水虻幼虫,固定碳氮含量,调控碳的来源。选择常见的单糖(葡萄糖、果糖)、双糖(蔗糖、麦芽糖、乳糖)和多糖(淀粉、纤维素、木糖)进行对比试验以筛选最佳碳源。

3)碳氮比单因素试验。100 g饲料饲养100头黑水虻幼虫,固定氮含量,调控碳源,设置碳氮比分别为5、10、15、20、25、30、35进行试验。评估碳氮比从5到35对黑水虻生长性能的影响,以确定最佳碳氮比。

4)虫/干料比单因素试验。以20头幼虫为基准,设置虫/干料比分别为1:0.1、1:0.15、1:0.21、1:0.31、1:0.52、1:1.03(对应虫料比2:1、4:3、1:1、2:3、2:5、1:5)。研究虫/干料比从1:0.1到1:1.03对幼虫生长性能的影响,通过试验确定最佳幼虫密度。

1.3 样品采集和发育测量方法

每2 d收集检测幼虫体质量变化,试验进行12 d

后,收集所有幼虫并称质量,同时称量剩余饲料。幼虫期是指从初孵幼虫至预蛹开始之间的发育阶段。化蛹率是指幼虫化蛹的数量占幼虫数量的百分比。蛹期是指蛹到羽化的时间。羽化率是羽化的数量占蛹总数的百分比。

1.4 生长及生物学性状指标计算

幼虫存活率^[16](survival rate, R_s)、饲料减少率^[17](feed reduction rate, R_{FR})和生物转化率^[17](bioconversion rate, R_{BC}),计算公式如下:

$$R_s = L_{\text{end}}/L_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{FR} = (F_0 - F_{\text{end}})/F_0 \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{BC} = (W_{\text{end}} - W_0)/F_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中, L_{end} 为收获幼虫数; L_0 为初始幼虫数; F_0 为初始时饲料质量; F_{end} 为收获时饲料质量; W_{end} 为收获时幼虫体质量; W_0 为初始时幼虫体质量。

1.5 虫体蛋白测定

将0.5 g干质量的黑水虻幼虫样品放入100 mL三角烧瓶中,在电热板(350°C)上用浓硫酸和30%过氧化氢消化,直至澄清。溶液冷却至室温后,先将体积固定为50 mL,过滤杂质,然后用半自动凯氏氮分析仪测定氮含量^[18]。通过将幼虫的凯氏氮含量乘以转换系数4.76来估算黑水虻幼虫蛋白含量^[19]。

1.6 统计学分析

试验结果以“平均值±标准误”表示。试验数据显著性差异通过SPSS 26.0软件处理,且进行ANOVA检验,经Tukey's多重比较检验差异显著, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 全纯培养基中黑水虻的生长特性

由表1可见,在全纯培养基中,黑水虻幼虫的存活率、蛹期时长、羽化率分别为 $(84.38\pm 1.18)\%$ 、 (14.70 ± 0.16) d、 $(80.20\pm 3.65)\%$,与富营养培养基和果蝇培养基无显著差异($P > 0.05$);黑水虻在全纯培养基中虫质量峰值(第8天)单虫鲜质量 (119.03 ± 1.82) mg,较果蝇培养基虫质量峰值(第12天)显著增加16.71%,较富营养培养基虫质量峰值(第8天)显著降低了40.15%;黑水虻在全纯培养基中的发育时长为 (29.04 ± 0.43) d,较果蝇培养基的 (43.84 ± 0.32) d显著缩短了33.77%,但较富营养培养基的 (12.55 ± 0.14) d显著延长了131.33%;在化蛹率方面,全纯培养基为 $(60.59\pm 1.50)\%$,与果蝇培养基无显著差异,比富营养培养基 $(98.51\pm 0.25)\%$ 显著降

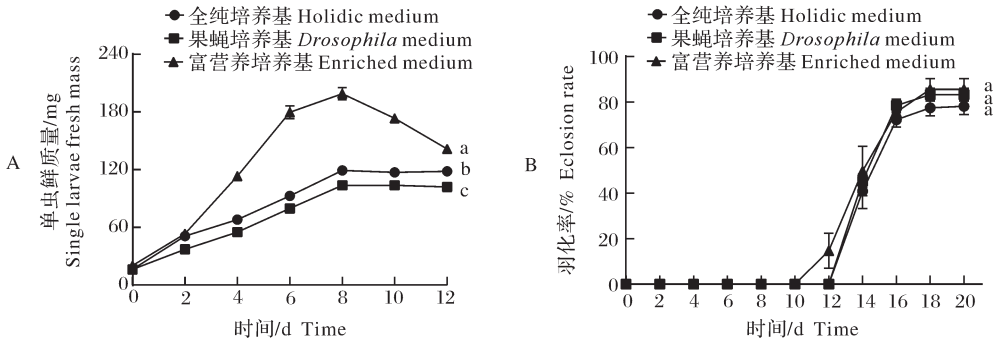
低了38.49%。

在全纯培养基中饲养12 d后,幼虫的单虫鲜质量较果蝇培养基显著增加了15.91%,较富营养培养基显著降低了16.38% ($P<0.05$);蛹的羽化走势与另外2种培养基相似(图1)。综合比较表明,全纯培养基对黑水虻的生长性能的促进作用优于果蝇培养基,与富营养培养基相比幼虫期显著延长,虫质量峰值和化蛹率显著降低。

表1 黑水虻在不同培养基中生长特性对比

培养基	虫质量峰值/mg	存活率/%	幼虫期/d	化蛹率/%	蛹期/d	羽化率/%
Culture medium	Peak larval mass	Survival rate	Larval stage	Pupal rate	Pupal stage	Eclosion rate
全纯培养基	119.03±1.82b	84.38±1.18ab	29.04±0.43b	60.59±1.50b	14.70±0.16a	80.20±3.65a
Holidic medium						
果蝇培养基	101.99±4.62c	78.25±3.76b	43.84±0.32a	63.74±2.93b	14.67±0.12a	81.45±2.88a
Drosophila medium						
富营养培养基	198.86±6.27a	93.60±1.94a	12.55±0.14c	98.51±0.25a	14.19±0.16a	85.55±4.74a
Enriched medium						

注: 同列不同字母表示经 Tukey's 多重比较检验差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) as determined by Tukey's multiple comparison test.



图中数据为“平均数±标准误”(n=4),不同字母表示经 Tukey's 多重比较检验差异显著 ($P<0.05$)。下同。Datas in the figure represent “means ± standard error”(n=4).Different letters on the bars indicate significant difference used by Tukey's multiple comparisons ($P<0.05$). The same as below.

图1 全纯培养基、果蝇培养基和富营养培养基中黑水虻的生长曲线(A)和羽化率(B)
Fig.1 Growth curves (A) and eclosion rate(B) of black soldier fly in holidic medium, *Drosophila* medium and enriched medium

2.2 全纯培养基中的氮源评估

由图2可见,以不同氮源饲养12 d后,氨基酸组的幼虫单虫鲜质量为(93.39±1.03) mg,比无氮组显著提高了152.63% ($P<0.05$),而硝酸钠组比无氮组显著低8.69%,其他氮源与无氮组无显著差异。在饲料减少率方面,氨基酸组为(30.23±0.42)%,比无氮源组显著提高58.19% ($P<0.05$),而硝酸钠组较无氮组显著降低19.37%,其他氮源与无氮组相比无显著差异。在生物转化率方面,氨基酸组为(7.10±0.10)%,较无氮组显著提高396.33% ($P<0.05$),而其他氮源较无氮组无显著差异。综合比较,氨基酸作为氮源时,黑水虻幼虫单虫鲜质量、饲料减少率和生物转化率均显著优于其他氮源的效果 ($P<0.05$)。因此,在后续试验中,将采用氨基酸作为培养基的氮源。

2.3 全纯培养基中的碳源评估

由图3可见,以不同碳源饲养12 d后,葡萄糖组单虫鲜质量为(86.30±0.84) mg,较无糖组显著提高34.81% ($P<0.05$),与淀粉和蔗糖无显著差异 ($P>0.05$);而果糖和木糖组相比于无糖组分别显著降低21.04%和20.00%;其他碳源与无糖组无显著差异。在饲料减少率方面,葡萄糖组为(34.64±1.87)%,较无糖组显著提高47.63% ($P<0.05$),与淀粉组无显著差异 ($P>0.05$);蔗糖组较无糖组显著提高27.48%;木糖和纤维素组较无糖组分别显著降低34.73%和19.41%;其他碳源与无糖组无显著差异。在生物转化率方面,葡萄糖组为(6.65±0.12)%,较无糖组显著提高33.81% ($P<0.05$),与淀粉和蔗糖组无显著差异 ($P>0.05$);果糖和木糖组较无糖组分别显著降低47.40%和40.35%;其他碳源与无糖组无显著差异。

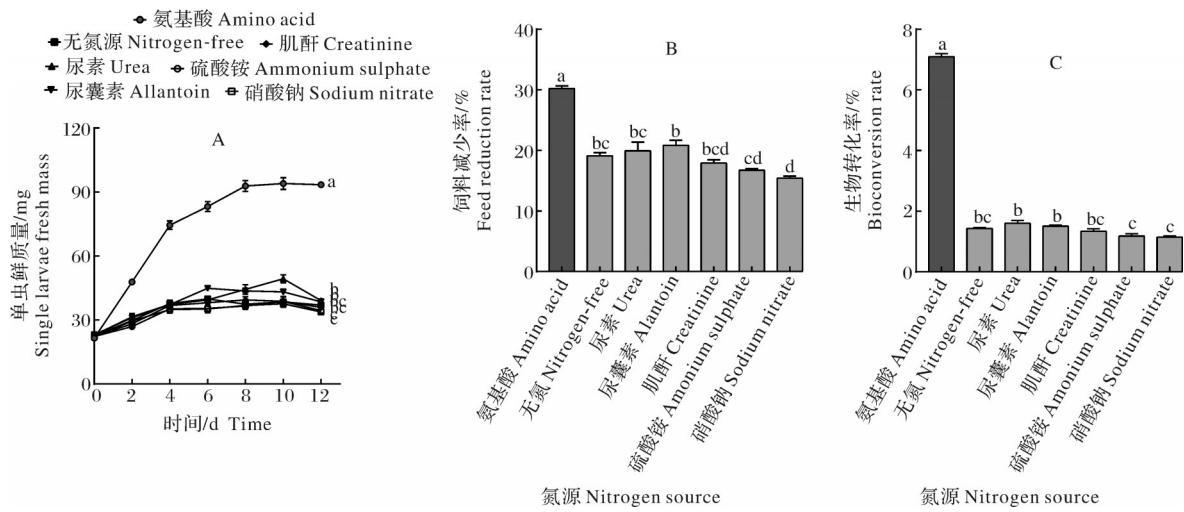


图2 全纯培养基中不同氮源对黑水虻单虫鲜质量(A)、饲料减少率(B)和生物转化率(C)的影响
Fig.2 Effects of different nitrogen sources in holidic medium on the single larvae fresh mass (A), feed reduction rate(B) and bioconversion rate(C)

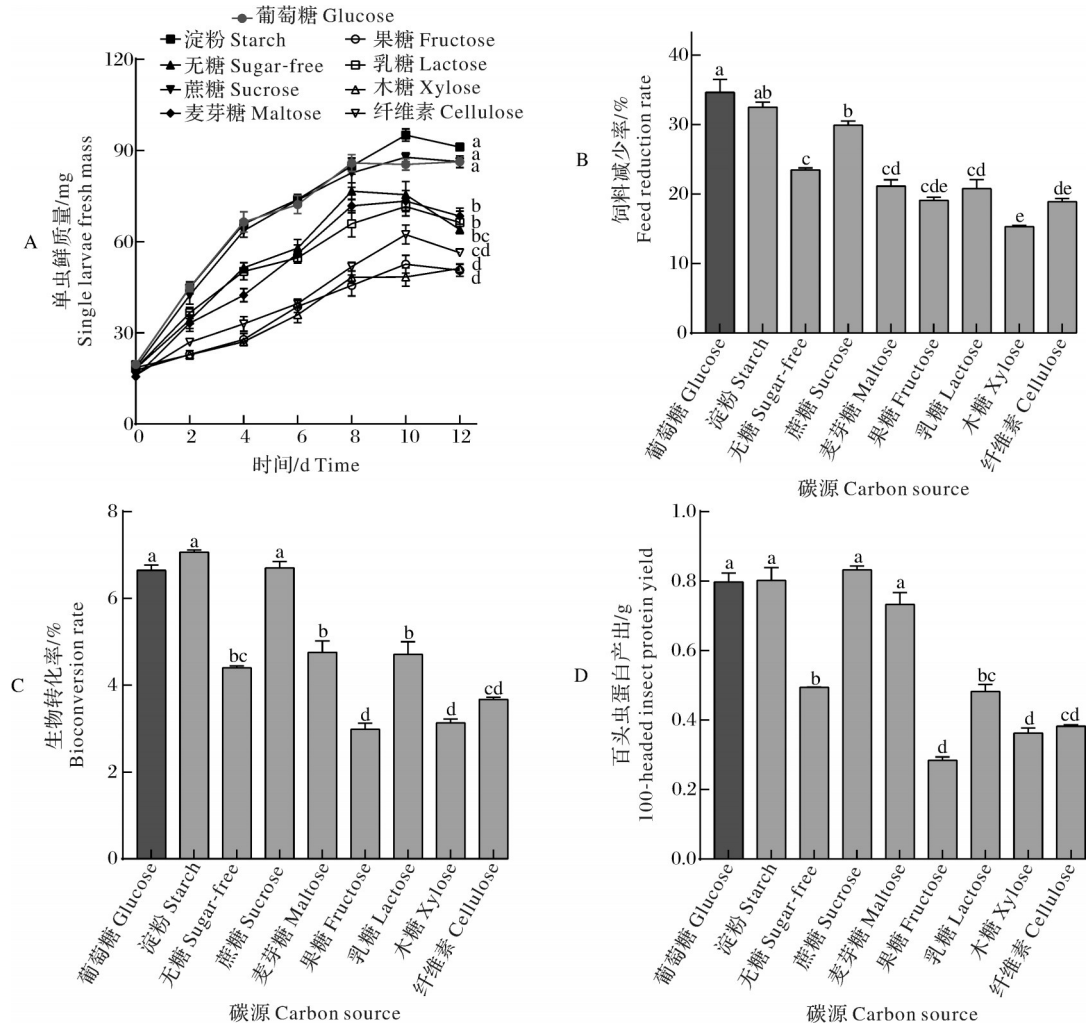


图3 全纯培养基中不同碳源对单虫鲜质量(A)、饲料减少率(B)、生物转化率(C)和百头虫蛋白产出(D)的影响
Fig.3 Effects of different carbon sources in holidic medium on the single larvae fresh mass (A), feed reduction rate(B), bioconversion rate(C) and 100-headed insect protein yield (D)

在百头虫蛋白产出上,葡萄糖组为 (0.80 ± 0.03) g,较无糖组显著提高 61.38% ($P < 0.05$),与淀粉、蔗糖、麦芽糖组无显著差异 ($P > 0.05$);果糖、木糖、纤维素组较无糖组分别显著降低 42.53% 、 26.69% 、 22.62% ;乳糖与无糖组无显著差异。综合比较,葡萄糖和淀粉作为碳源时,黑水虻幼虫的单虫鲜质量、饲料减少率、生物转化率和百头虫蛋白产出,均为差异不显著 ($P > 0.05$),是最佳碳源的候选。为得到更高的饲料减少率,选择葡萄糖作为碳源进行后续研究。

2.4 全纯培养基中的碳氮比评估

由图4可见,以不同碳氮比饲养12 d后,碳氮比为15时,幼虫单虫鲜质量为 (105.47 ± 2.70) mg,较碳

氮比为25、30和35的处理组分别显著提高了 14.02% 、 30.75% 和 46.54% ($P < 0.05$),但与其他处理组无显著差异。在饲料减少率方面,碳氮比为15的处理组为 $(24.61 \pm 0.46)\%$,较碳氮比为35的处理组显著提高 21.88% ($P < 0.05$),但与其他处理组无显著差异。在生物转化率方面,碳氮比为15的处理组为 $(10.55 \pm 0.27)\%$,较碳氮比为5、25、30和35的处理组分别显著提高 9.73% 、 14.31% 、 32.76% 和 46.90% ($P < 0.05$),但与其他处理组无显著差异。综合比较,碳氮比为15时,黑水虻幼虫的单虫鲜质量和生物转化率为最佳。因此,为在后续试验中获得更好的生长性能,选择碳氮比为15进行进一步研究。

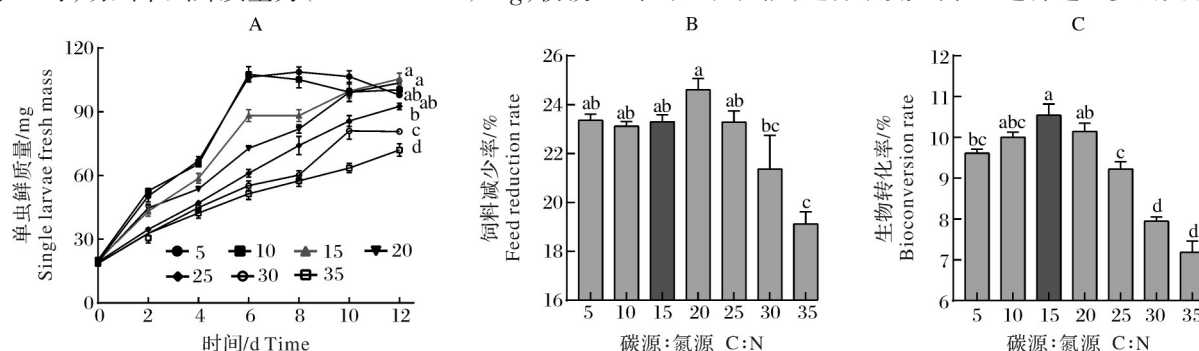


图4 全纯培养基中碳氮比对单虫鲜质量(A)、饲料减少率(B)和生物转化率(C)的影响

Fig.4 Effects of different ratio of carbon-to-nitrogen in holdic medium on the single larvae fresh mass(A), feed reduction rate(B) and bioconversion rate(C)

2.5 全纯培养基中的虫/干料比评估

由图5可见,以不同虫/干料比饲养12 d后,虫/干料比为1:0.15组幼虫单虫鲜质量为 (89.28 ± 0.83) mg,较虫/干料比为1:0.1显著提高了 71.11% ($P < 0.05$),而较虫/干料比为1:0.31、1:0.52和1:1.03的处理组显著降低 21.08% 、 30.31% 和 30.82% ($P < 0.05$),与虫/干料比为1:0.21的幼虫单虫鲜质量无显著差异。在饲料减少率方面,虫/干料比1:0.15组的

为 $(91.62 \pm 3.06)\%$,分别较虫/干料比1:0.31、1:0.52和1:1.03的处理组显著提高 60.95% 、 193.90% 和 469.76% ($P < 0.05$),但与虫/干料比1:0.1和1:0.21的处理组无显著差异。

在生物转化率方面,虫/干料比1:0.15的处理组为 $(9.08 \pm 0.15)\%$,较虫/干料比1:0.1、1:0.21、1:0.31、1:0.52和1:1.03分别显著提高 42.69% 、 14.93% 、 46.73% 、 111.10% 和 319.03% ($P < 0.05$)。

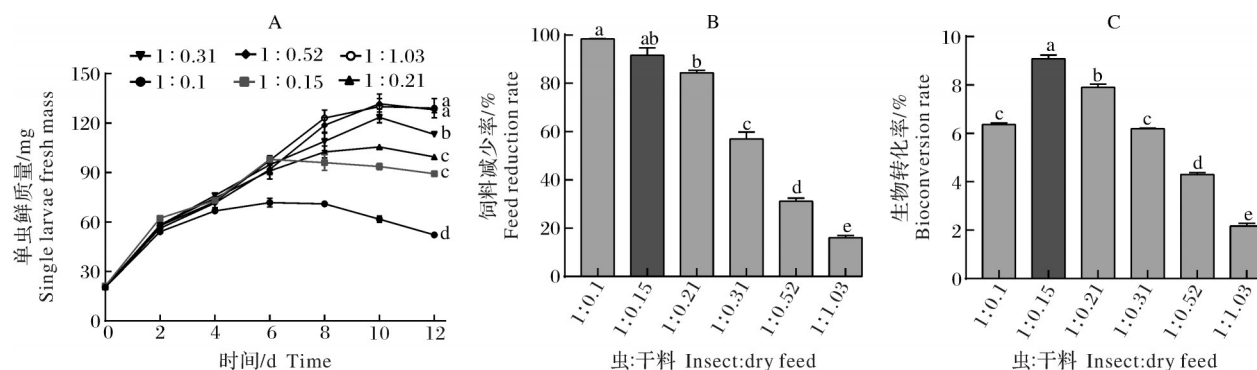


图5 全纯培养基中不同虫/干料比对黑水虻单虫鲜质量(A)、饲料减少率(B)和生物转化率(C)的影响

Fig.5 Effects of different ratio of larvae-to-dry feed in holdic medium on the single larvae fresh mass(A), feed reduction rate(B) and bioconversion rate(C)

在虫/干料比1:0.15的处理组中,生物转化率最高,且饲料减少率与虫/干料比1:0.1(饲料减少率最高组)的无显著差异。综合考虑经济效益和饲料利用效率,虫/干料比1:0.15是最佳饲养密度。

3 讨论

3.1 全纯培养基对黑水虻幼虫生长发育的影响

本研究系统探讨了全纯培养基中营养物质对黑水虻生长性能的影响,试验结果表明,全纯培养基能够支持黑水虻幼虫发育至成虫阶段,并在存活率、幼虫发育时间、化蛹率和羽化率方面表现优异,特别是在幼虫生长性能方面,全纯培养基显著优于果蝇培养基,但与富营养培养基相比,幼虫期显著延长,虫质量峰值和化蛹率显著降低。这一差异可能源于富营养培养基在每100 g鲜质量中具有较高的碳氮含量,为黑水虻提供了更为适宜的营养环境^[20]。全纯培养基较果蝇培养基在存活率和幼虫发育时间上的优势,可能归因于其更优的营养成分比例和成分纯度。与传统的废弃物培养基(如食物残渣、农业副产品、动物粪便等)相比,全纯培养基在幼虫体质量方面表现出色。有研究^[21-22]报道,废弃物培养基饲养的黑水虻幼虫体质量通常在66.17~204.9 mg,而本研究中全纯培养基饲养的虫质量峰值达到(119.03±1.82) mg,处于较高水平。此外,以有机废弃物为主的培养基存在营养成分不确定性的问题,即使使用相同类型的废弃物,不同批次之间也可能存在显著差异,导致试验结果的变异性增大^[17]。相比之下,全纯培养基因其成分明确,显著提高了试验结果的可重复性和可靠性。然而,本研究在试验设计方面存在一定的局限性。尽管使用虫质量峰值作为衡量指标能在一定程度上反映不同培养基的优劣,但由于没有统一在相同的发育阶段(如预蛹期)对3组黑水虻幼虫体质量进行测量,这一指标可能存在偏差。不同培养基会影响黑水虻的生长发育速度,导致幼虫进入不同发育阶段的时间存在差异。在本试验中,富营养培养基上的幼虫发育较快,而其他2组发育相对较慢。这种发育进程的不同步使得仅比较虫质量峰值难以准确反映不同培养基对幼虫生长的实际影响,很可能会掩盖不同培养基在支持幼虫生长潜力方面的真实差异。预蛹期是幼虫生长发育过程中的一个相对稳定且具有代表性的阶段,此时幼虫基本完成了生长和物质积累,体质量相对稳定;在该阶段测量幼虫体质量,可以减少因发育进程不同步

带来的误差,更准确地评估不同培养基对幼虫生长的促进作用。由于本研究中不同处理组之间的发育至预蛹期时长差异过大,因此未能测定预蛹期的虫体质量,未来在开展深入研究时可采用该指标。

3.2 氮源和碳源对黑水虻幼虫生长发育的影响

本研究系统分析了全纯培养基中不同氮源和碳源对黑水虻幼虫生长性能的影响,试验结果表明,氨基酸作为氮源时,黑水虻幼虫的生长性能显著优于其他氮源($P<0.05$)。这一结果与昆虫生长发育对氨基酸的高需求一致^[23]。同时也与有机废弃物中主要氮源为蛋白质(由氨基酸组成)的研究结果相符。相比之下,尿素和 NH_4^+ 在其他研究中被发现能够促进黑水虻幼虫生长^[7-8,24],但在本研究中效果远不及氨基酸,基本不利用(与无氮组比无显著差异)。这可能是因为其他研究是在猪粪、餐厨垃圾等复杂基质中进行的,其中已含有丰富的氮源(如氨基酸),促进了黑水虻对尿素和 NH_4^+ 的利用。而本研究首次发现在全纯培养基中以尿素和 NH_4^+ 作为唯一氮源时,其无法被黑水虻幼虫直接利用。在碳源方面,葡萄糖作为碳源显著提高了黑水虻幼虫的生长性能,这与文献报道的葡萄糖是黑水虻最佳碳源^[25]的结果一致。葡萄糖作为一种单糖,能够迅速提供能量,满足幼虫的高能量需求。淀粉与葡萄糖的效果相似,可能是由于黑水虻具有较高的淀粉酶活性,能够将淀粉分解为可利用的单糖,从而有效获取能量和碳源^[26]。相比之下,其他单糖、双糖和多糖的效果差异较大,可能与黑水虻对不同碳源的利用效率不一致有关^[27]。以纤维素为例,黑水虻自身无法分泌木质纤维素降解酶,需要依赖微生物协同降解纤维素^[28-29],因此其利用效率偏低。

3.3 碳氮比对黑水虻幼虫生长发育的影响

本研究的结果显示,碳氮比在10~20之间时单虫鲜质量、饲料减少率和生物转化率无显著差异。进一步分析表明,碳氮比为15时,黑水虻幼虫的生长性能最佳。该结果与文献报道的黑水虻适合范围的饲料($\text{C/N}<20$)^[8]的结果一致。文献中关于黑水虻最佳碳氮比的研究较多,但不同培养基的最佳碳氮比存在显著差异。例如,家禽饲料($\text{C/N}=18$)、食物垃圾($\text{C/N}=14$)、屠宰场垃圾($\text{C/N}=6$)以及水果和蔬菜垃圾($\text{C/N}=24$)的最佳碳氮比均不相同^[30]。此外,即使碳氮比相同,不同培养基的性能也可能存在差异。例如,餐厨垃圾和牛粪的碳氮比均为20以上,但餐厨垃圾的利用效果显著优于牛粪,这可能是因

为牛粪中含有大量不可利用的碳源(如纤维素)^[8,29]。这些研究中的碳源和氮源来源不明确,可能存在生物不可利用的碳源和氮源,导致结果的不一致性。相比之下,本研究使用的碳源(葡萄糖)和氮源(氨基酸)均为生物可利用形式,因此能够更准确地反映黑水虻对碳氮比的真实需求。研究发现,黑水虻幼虫的最佳可利用碳氮比为15,这一结果与营养丰富的饲料的碳氮比相似^[30]。研究结果表明,产业上若要明确黑水虻的最佳碳氮比,必须明确其可利用的碳源和氮源。本研究开发的全纯培养基因其碳源和氮源清晰且均为可利用形式,在研究黑水虻幼虫的最适碳氮比方面具有显著优势。

3.4 虫/干料比对黑水虻幼虫生长发育的影响

虫/干料比直接影响幼虫密度,进而显著影响黑水虻将残留有机物转化为体质量的效率。尽管较高的幼虫密度可以在一定程度上提升总产量,但这一做法也伴随着潜在的风险。当幼虫密度过高时,可能导致氧气、空间不足,进而影响幼虫的新陈代谢^[10]。已有研究表明,饲料供应较多的黑水虻幼虫从卵到蛹的发育时间相对较短,且蛹体质量通常比饲料供应较少的幼虫更高。然而,这些研究也发现,尽管幼虫的个体质量增加,但其生物转化率却相对较低^[31]。本研究也观察到了类似变化趋势。虫/干料比为1:0.15的处理组中,幼虫体质量的增加显著高于虫/干料比为1:0.1的处理组,且与虫/干料比1:0.21的处理组相比没有显著差异。这表明在虫/干料比为1:0.15的条件下,幼虫能够高效利用饲料,实现较快的生长。饲料减少率在虫/干料比为1:0.15的处理组中略低于1:0.1的处理组,但两者之间无显著差异,说明在这一虫/干料比下,幼虫对饲料的利用效率较高。这一现象可能与饲料的浪费有关:在较高的饲料供应下,幼虫可能消耗更多饲料,但并非所有饲料都能有效转化为体质量,部分饲料可能被浪费。此外,由于本研究采用的全纯培养基干料均为营养物质,与其他培养基中可能含有不可利用成分的情况不同^[32],因此可以更准确地计算单头幼虫所需的干物质营养与黑水虻幼虫生长之间的关系。结果表明,当黑水虻幼虫所需的营养物质干质量为0.15 g时,生物转化效率最高,此结果低于粪污中饲养的黑水虻幼虫在12 d内达到最高生物转化率所需的干质量(0.63 g)^[33],这可能是因为粪污中存在大量不可利用的物质。同时,本研究发现全纯培养基中营养物质干质量达到0.52 g以上不会进一步促进黑

水虻幼虫体质量的增加,这与现有研究中营养丰富的鸡饲料(0.6 g干物质)被认为是足量营养物质的结果^[10]相似。

综上,本研究开发了一种全纯培养基,该培养基能够有效支持黑水虻的正常生长发育。通过对全纯培养基中关键营养因子的系统性评估,发现以氨基酸为氮源、葡萄糖和淀粉为碳源、碳氮比为15、虫/干料比为1:0.15作为饲养条件时能够获得更优的生长性能。这些研究结果为精确解析黑水虻的营养需求、提升其生物转化效率提供了基础参数。今后将进一步探索全纯培养基在黑水虻养殖产业中的应用潜力,为黑水虻的高效养殖提供更多实用技术支持。

参考文献 References

- [1] 胡芮绮,张连帅,张吉斌.亮斑扁角水虻[J].生物资源,2017,39(4):314.HU R Q,ZHANG L S,ZHANG J B.Black soldier fly[J].Biotic resources,2017,39(4):314(in Chinese).
- [2] ČIČKOVÁ H,NEWTON G L,LACY R C, et al.The use of fly larvae for organic waste treatment[J].Waste management, 2015,35:68-80.
- [3] 张绍波,张李文,王盛琪,等.黑水虻在畜禽生产中应用的研究进展[J].养殖与饲料,2023,22(4):34-37.ZHANG S B,ZHANG L W,WANG S Q, et al.Progress on the application of black soldier fly in the production of livestock and poultry[J].Animal breeding and feed, 2023, 22(4): 34-37 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨航,袁泉,吕巍巍,等.黑水虻幼虫的营养特性及其在水产饲料中的应用进展[J].华中农业大学学报,2024,43(2):164-174.YANG H,YUAN Q,LÜ W W, et al.Progress on nutritional characteristics of black soldier fly larvae and its application in aquatic feeds[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2024,43(2):164-174 (in Chinese with English abstract).
- [5] AMRUL N F,KABIR AHMAD I,AHMAD BASRI N E, et al.A review of organic waste treatment using black soldier fly (*Hermetia illucens*)[J/OL].Sustainability, 2022, 14(8): 4565 [2025-01-27].https://doi.org/10.3390/su14084565.
- [6] LALANDER C,DIENER S,ZURBRÜGG 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,2019,208:211-219.
- [7] PARODI A,YAO Q,GERRITS W, et al.Upgrading ammonia-nitrogen from manure into body proteins in black soldier fly larvae[J/OL].Resources, conservation & recycling, 2022, 182: 106343[2025-01-27].https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106343.
- [8] LU Y,ZHANG S,SUN S, et al.Effects of different nitrogen

- sources and ratios to carbon on larval development and bioconversion efficiency in food waste treatment by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) [J/OL]. *Insects*, 2021, 12(6): 507 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.3390/insects12060507>.
- [9] BOSCH G, OONINCX D, JORDAN H, et al. Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae [J]. *Journal insects as food feed*, 2020, 6(2): 95-110.
- [10] BARRAGAN-FONSECA K B, DICKE M, VAN LOON J J. 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.
- [11] WOODS M, HOFFMAN L, PIETERSE E. Artificial diets for neonatal black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae [J]. *Journal of insects as food and feed*, 2019, 5(2): 99-105.
- [12] 乔红皓, 王秋晨, 武传良, 等. 营养条件对水虻油脂积累的影响 [J]. *化学与生物工程*, 2022, 39(10): 20-26. QIAO H H, WANG Q C, WU C L, et al. Effect of nutritional conditions on lipid accumulation in black soldier fly [J]. *Chemistry & bioengineering*, 2022, 39(10): 20-26 (in Chinese with English abstract).
- [13] PIPER M D, BLANC E, LEITÃO-GONÇALVES R, et al. A holidic medium for *Drosophila melanogaster* [J]. *Nature methods*, 2014, 11(1): 100-105.
- [14] ZHANG J, CHEN L, ZHAO S, et al. Electric field mitigates NH_3 and N_2O emissions during bioconversion of dairy manure by black soldier fly [J/OL]. *Chemical engineering journal*, 2024, 484: 149483 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149483>.
- [15] 张振宇, 秦朝伟, 李庆, 等. 一种饲养黑水虻的人工培养基及其制备方法: CN117796476A [P]. 2024-04-02. ZHANG Z Y, QIN C W, LI Q, et al. An artificial medium for raising black soldier flies and its preparation method; CN117796476A [P]. 2024-04-02 (in Chinese).
- [16] FELS-KLERX H J, CAMENZULI L LEE M K, et al. Uptake of cadmium, lead and arsenic by *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from contaminated substrates [J/OL]. *PLoS one*, 2016, 11(11): e0166186 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166186>.
- [17] BOSCH G, OONINCX D G A B, JORDAN H R, et al. Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae [J]. *Journal of insects as food and feed*, 2019, 6(2): 1-16.
- [18] BREMNER J. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method [J]. *The journal of agricultural science*, 1960, 55(1): 11-33.
- [19] JANSSEN R H, VINCKEN J-P, VAN DEN BROEK L A, et al. Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens* [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2017, 65(11): 2275-2278.
- [20] TOMBERLIN J K, SHEPPARD D C. Factors influencing mating and oviposition of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) in a colony [J]. *Journal of entomological science*, 2002, 37(4): 345-352.
- [21] BOAFO H A, GBEMAVO D S J C, TIMPONGJONES E C, et al. Substrates most preferred for black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) oviposition are not the most suitable for their larval development [J]. *Journal of insects as food and feed*, 2023, 9(2): 183-192.
- [22] GIACOMO R, SHIKHA O, ANDREAS M B, et al. Fresh aquaculture sludge management with black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae: investigation on bioconversion performances [J/OL]. *Scientific reports*, 2023, 13(1): 20982 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48061-0>.
- [23] DADD R. Insect nutrition: current developments and metabolic implications [J]. *Annual review of entomology*, 1973, 18(1): 381-420.
- [24] XUEMING R, RUXIN G, MAZARIN A, et al. Nitrogen acquisition strategies mediated by insect symbionts: a review of their mechanisms, methodologies, and case studies [J/OL]. *Insects*, 2022, 13(1): 84 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.3390/insects13010084>.
- [25] 郭孝结. 黑水虻幼虫营养配方优化及应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016. GUO X J. Optimization of nutrition formula for the black soldier fly larvae and cultivation [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [26] GUILLAUME J B, DA LAGE J L, MEZDOUR S, et al. Amylase activity across black soldier fly larvae development and feeding substrates: insights on starch digestibility and external digestion [J/OL]. *Animal*, 2024, 18(11): 101337 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101337>.
- [27] COHN Z, LATTY T, ABBAS A. Understanding dietary carbohydrates in black soldier fly larvae treatment of organic waste in the circular economy [J]. *Waste management*, 2022, 137: 9-19.
- [28] JIA Z, ZHIJUN L, NAN L, et al. Cellulose-degrading bacteria improve conversion efficiency in the co-digestion of dairy and chicken manure by black soldier fly larvae [J/OL]. *Journal of environmental management*, 2023, 348: 119156 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119156>.
- [29] FANGMING X, QIAN Z, XINHUA X, et al. Black soldier fly larvae recruit functional microbiota into the intestines and residues to promote lignocellulosic degradation in domestic biodegradable waste [J/OL]. *Environmental pollution*, 2023, 340: 122676 [2025-01-27]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122676>.
- [30] REHMAN K U, CAI M, XIAO X, et al. Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of

- dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*Hermetia illucens* L.) [J]. Journal of environmental management, 2017, 196:458-465.
- [31] DIENER S. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates [J]. Waste management & research, 2009, 27(6):603-610.
- [32] GUIDINI LOPES I, WIKLICKY V, ERMOLAEV E, et al. Dynamics of black soldier fly larvae composting: impact of substrate properties and rearing conditions on process efficiency [J]. Waste management, 2023, 172:25-32.
- [33] NYAKERI E, AYIEKO M, AMIMO F, et al. An optimal feeding strategy for black soldier fly larvae biomass production and faecal sludge reduction [J]. Journal of insects as food and feed, 2019, 5(3):201-213.

Optimization of key nutritional factors for growth of black soldier fly based on holidic medium

QIN Chaowei¹, SHAO Dan², ZOU Chenhui¹, WEI Jiahui¹, SU Lei³, LONG Mengjun⁴,
ZHAO Shanshan⁴, DAI Menghong², LI Qing⁴, ZHANG Zhenyu¹

1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. College of Animal Science and Technology, College of Veterinary Medicine, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Life Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 4. College of Chemistry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Black soldier flies (*Hermetia illucens* L.) were reared with a holidic medium to study the characteristics of nutritional requirements and key nutrient factors for the black soldier fly. The growth and development of black soldier flies were evaluated by controlling nitrogen sources, carbon sources, the ratio of carbon-to-nitrogen and ratio of larvae-to-dry feed. The results showed that the black soldier fly reared on the holidic medium had better growth performance with the larval survival rate of $(84.38 \pm 1.18)\%$, the larval duration of (29.04 ± 0.43) d, the peak individual fresh mass of (119.03 ± 1.82) mg, the pupation rate of $(60.59 \pm 1.50)\%$, the pupal duration of (14.70 ± 0.16) d, and the emergence rate of $(80.20 \pm 3.65)\%$. The performance of holidic medium was better than that of *Drosophila* medium, although the enriched medium was superior in certain aspects. The results of comprehensively analyzing the fresh weight of individual larvae, the rate of feed reduction, and the bioconversion rate of larvae showed that amino acids were the optimal nitrogen source, glucose and starch were the optimal carbon sources, the most suitable ratio of carbon-to-nitrogen was 15, and the optimal ratio of larvae-to-dry feed was 1:0.15. It is indicated that the holidic medium developed in this article can enable black soldier flies to complete its life cycle, achieving better growth performance under the conditions of using amino acids, glucose, starch as the optimal carbon sources, with the suitable ratio of carbon-to-nitrogen of 15 and the optimal ratio of larvae-to-dry feed of 1:0.15.

Keywords black soldier fly (*Hermetia illucens* L.); holidic medium; carbon source; nitrogen source; ratio of carbon-to-nitrogen; ratio of larvae-to-dry feed

(责任编辑:赵琳琳)