



周星佑, 马崇, 胡斌, 胡文锋, 杨美艳. 黑水虻在水产养殖中的应用研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1076 - 1082. ZHOU Xing-Tou, MA Chong, HU Bin, HU Wen-Feng, YANG Mei-Yan. Research progress on the application of black soldier fly in fish farming [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1076 - 1082.

黑水虻在水产养殖中的应用研究进展

周星佑¹, 马崇², 胡斌^{2,3}, 胡文锋^{1,2*}, 杨美艳^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广州 510642; 2. 生物源生物技术(深圳)股份有限公司, 广东深圳 518118;

3. 广东省农业科学院动物科学研究所, 广州 510642)

摘要: 水产养殖作为全球食品供应链的重要组成部分, 为人们提供了丰富的蛋白质来源。然而, 这个领域正面临挑战, 随着水资源污染和气候变暖, 传统的饲料蛋白质来源如鱼粉和大豆, 已经不能满足生产所需, 急需寻找可持续的饲料蛋白质来源。黑水虻 *Hermetia illucens* L. 作为一种昆虫蛋白资源, 近年来备受关注。黑水虻幼虫 (Black soldier fly larvae, BSFL) 能够高效地将废弃物转化为有价值的饲料蛋白质, 同时减少环境污染。本研究探讨了黑水虻在水产养殖中作为蛋白质替代物的应用, 主要关注其对水产品的生长性能、经济效益、肉质品质和免疫功能的影响。同时, 本团队还研究了黑水虻在幼龄阶段对水产品质量的影响, 通过这两方面总结水产养殖中使用黑水虻幼虫作为饲料替代品可能面临的主要问题。

关键词: 黑水虻; 水产养殖; 可持续蛋白; 饲料应用

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 05-1076-07

Research progress on the application of black soldier fly in fish farming

ZHOU Xing-Tou¹, MA Chong², HU Bin^{2,3}, HU Wen-Feng^{1,2*}, YANG Mei-Yan^{1*} (1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Bioforte Biotechnology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518118, Guangdong Province, China; 3. Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510642, China)

Abstracts: Aquaculture, a key component of the global food supply chain, provides a rich source of protein. However, this sector faces pressing challenges, with water pollution and a warming climate, traditional sources of feed protein, such as fishmeal and soya, are no longer sufficient for production and there is an urgent need to find sustainable sources of feed protein. Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) has attracted much attention in recent years as an insect protein resource. Black soldier fly larvae (BSFL) is widely distributed around the world and can efficiently convert waste into valuable feed protein while reducing environmental pollution. In this paper, we discussed the application of black soldier fly as a protein substitute in aquaculture, emphasizing its influence on the growth performance, economic benefits, meat quality, and immune function of cultured aquatic species. Additionally, we investigate the impact of black soldier fly at young age stages on the quality of aquatic products. Through these two focal points, we systematically summarize the primary challenges and issues that may arise when utilizing BSFL as a feed substitute in the aquaculture industry.

Key words: Black soldier fly; aquaculture; sustainable protein; feed application

水产养殖饲料的主要蛋白来源是鱼粉。我国的鱼粉主要依赖进口和大量捕捞鲜鱼, 成本的不

断上涨使得本地水产业在市场竞争中逐渐处于劣势, 成本增加和质量问题已成为水产养殖业的重

基金资助: 深圳市技术攻关面上项目 (JSGG20201102173800002); 国家食品营养与安全重点研发计划专项 (2023YFF1104100)

作者简介: 周星佑, 男, 硕士研究生, 研究方向为食源性致病菌的噬菌体治疗和替代蛋白开发, E-mail: staright@stu.scau.edu.cn

*共同通讯作者 Author for correspondence: 杨美艳, 女, 博士, 讲师, 研究方向为噬菌体防控和新食物资源开发, E-mail: ymy@scau.edu.cn;

胡文锋, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物生理生化、后生元、黑水虻, E-mail: wfhu@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-05-27; 接受日期 Accepted: 2024-08-27

要挑战（高彬等，2022）。根据国际饲料工业联合会的统计，预计到 2050 年全球人口将超过 100 亿，这将导致对动物蛋白的需求翻倍，进一步加剧对鱼粉的需求压力（Gephart *et al.*, 2021）。因此迫切需要寻找新的替代品，以部分或完全替代鱼粉在水产饲料中的应用（Shafique *et al.*, 2021）。

黑水虻是鱼粉最具发展潜力的替代品之一，其幼虫能够有效摄食餐厨垃圾或动物粪便等有机废弃物，生产高价值的蛋白原料，这不仅为水产养殖业提供了一种新的饲料蛋白来源，而且有助于减少环境污染和降低饲料成本（孟泳岐等，2023）。此外，黑水虻具有繁殖能力强、易于管理和较强的环境适应性等优点，使得它们可以在不同的气候和地理条件下进行养殖，这为全球的水产养殖业提供了灵活的饲料蛋白解决方案（郑丽卿等，2019；郗婧怡等，2023）。

本研究旨在探讨黑水虻在水产养殖中的应用研究进展，包括黑水虻幼虫（Black soldier fly larvae, BSFL）作为替代蛋白时自身的蛋白质含量与氨基酸组成，以及其对水产生长性能、经济效益、肉质品质以及免疫功能的影响等，特别讨论了黑水虻对不同日龄水产动物的生长性能及其品质变化的影响，为未来的研究和实际应用提供有价值的的数据支持与理论依据。

1 黑水虻幼虫的蛋白质含量与氨基酸组成

BSFL在养殖业领域具有巨大的潜力，其蛋白质含量在 32%~58%之间，脂肪含量高达 15%~39%（Gold *et al.*, 2018），超过了多数传统的饲料成分。这使得BSFL成为了理想的蛋白质和脂肪来源（车彦卓等，2020），可以为畜禽、水产、以及宠物等动物提供丰富的能量和营养。BSFL为水生动物提供的高质量蛋白质，甚至超过传统饲料蛋白的来源，如大豆粉和鱼粉（王宇等，2020；张聪颖，2022）；若通过脱脂处理，其蛋白质含量可以进一步提高到约 60%（李嘉慧等，2022），成为水产养殖的新型非粮蛋白源，为可持续养殖和废弃物管理提供了广阔前景。此外，BSFL还富含必需氨基酸和矿物质（李嘉慧等，2022），如赖氨酸、蛋氨酸和精氨酸（李小军，2019；张佳鑫

等，2019；萧鸿发等，2020；蔡腾等，2021）；同时BSFL的氨基酸组成比例均衡，特别是谷氨酸、赖氨酸、甘氨酸等组份含量丰富，这为调整饲料配方以满足不同鱼类的特定需求提供了强有力的支持，有利于鱼类的生长和发育（王宇等，2020）。

2 黑水虻在水产养殖中作为替代蛋白的应用效果

2.1 黑水虻作为替代蛋白对水产生长性能的影响

BSFL作为替代蛋白在鱼类生产中的应用有大量相关研究。研究表明，部分或全部以BSFL替代传统鱼粉不仅不会对鱼类或虾的生长性能产生显著的不利影响，甚至可以提升其生长性能；但也有少数报道了负面影响。

针对鱼类养殖的报道中，非洲鲶鱼为期 6 周的喂养试验，将鱼粉替换为BSFL对其生长性能未造成不利影响（Gebremichael *et al.*, 2023）；尼罗罗非鱼*Oreochromis niloticus*使用添加了黑水虻预蛹粉饲料喂养后，表现出显著的增重、更高的特定生长率和增重百分比（见增强出版材料附表 1）

（Panikkar *et al.*, 2022）。也有少数研究发现，过高脂质含量的BSFL会抑制鱼类的生长性能，所以在BSFL用于鱼饲料时，应重点关注饲料中脂质含量和脂肪酸组成的变化（Zhao *et al.*, 2023）。

BSFL作为替代蛋白在虾类生产中的应用也有类似相关研究。研究表明，对虾饲料中引入BSFL后，其生长性能有着明显的正面反馈，虾的体重、特定生长率以及饲料转化率都随着BSFL含量增加而改善（Richardson *et al.*, 2021；Shin *et al.*, 2021；侯雪阳等，2022；Wang *et al.*, 2022；韩光明等，2023）。这表明BSFL在虾养殖中具备作为蛋白质来源的潜力，有助于提升虾的生长性能。BSFL替代鱼粉之所以能够取得正面效果，部分原因在于其氨基酸组成与传统的鱼粉非常相似（Richardson *et al.*, 2021），这种相似性可能是水产动物在以BSFL为饲料时表现出色的关键因素之一。此外，南美白对虾*Litopenaeus vannamei*对BSFL粗蛋白质的表观消化率均高于多种商业鱼粉（王文娟等，2012；易昌金等，2018）。

然而，虽然BSFL可以提升对虾的生长性能，

其在饲料中的含量仍然需要严格控制,以避免负面影响的发生。一些研究发现,当BSFL替代饲料中的比例超过一定阈值时,虾的生长性能可能会受到限制(He *et al.*, 2022a; Chen *et al.*, 2023)。主要原因可能是营养成分不均衡,随着BSFL比例增加,饲料营养成分不均衡导致氨基酸比例失衡;同时,BSFL中的几丁质成分可能抑制虾肠道对脂质的消化和吸收,从而降低生长性能(Wang, 2021; 陈永康等, 2023)。因此,在以鱼类和对虾为代表的水产饲料中准确控制BSFL的含量对于实现最佳生长效果至关重要。

2.2 黑水虻作为替代蛋白对水产肉质品质的影响

就鱼肉品质而言,BSFL替代鱼粉后对不同品种鱼肉营养成分的影响不同。如用脱脂BSFL替代25%鱼粉养殖半滑舌鳎*Cynoglossus semilaevis*, 鱼肌肉的水分、灰分、粗脂肪和蛋白质含量均显著提高(Li *et al.*, 2022); 但将BSFL加入梭鲈*Sander lucioperca*饲料后(18%), 最终鱼片中的蛋白质和灰分含量均显著降低,可能是鱼类器官的发育和营养物质消化受到了影响(Stejskal *et al.*, 2023)。BSFL与家禽副产品粉配合使用时,尖吻鲈*Lates calcarifer*鱼片的感官质量和颜色均得到显著改善,整体品质提升(Chaklader *et al.*, 2021)。因此,BSFL的应用确实会影响鱼肉品质,且其影响效果与其被添加到商业饲料的种类关系较大。

BSFL对虾肉品质也有显著影响。在马龙螯虾*Cherax Cainii-Marron*饲料中添加BSFL后虾尾肌中的蛋白质和能量含量显著提升(Md *et al.*, 2021); 但在南美白对虾中,随着脱脂BSFL含量的增加,虾肉中的蛋白含量以及蛋白质和脂肪保留率都显著下降,可能是脱脂BSFL含量的增加导致n-3多不饱和脂肪酸水平降低,从而虾的生长性能和脂肪保留率下降(Wang, 2021)。因此,利用BSFL作为替代蛋白质时,需注意对虾肉质品质的影响,尤其是蛋白质含量和脂肪保留率方面的影响。

综上,BSFL对不同品种的鱼类和虾类肉质均会产生一定影响。

2.3 黑水虻作为替代蛋白对水产免疫功能的影响

在免疫功能方面,大多数研究显示BSFL能够增强鱼类的免疫反应或不会产生显著的不利影响。

在欧洲鲈鱼中,用BSFL部分替代饲料中的鱼粉,可以增强鱼类的非特异性免疫反应及抗氧化能力,并使其具有一定的抗菌活性(Lanes *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022)。BSFL中富含抗菌肽,可以增强鱼类对特定病原体的抵抗力,降低疾病爆发的风险(Zhang *et al.*, 2022)。在湖白鲑*Coregonus clupeaformis*中,5% BSFL不会影响其免疫反应(Chen *et al.*, 2023),所以需探究用更高的BSFL比例替代对鱼类免疫功能的影响。

在虾类的养殖中,BSFL因其在对抗白斑综合症和急性肝胰腺坏死病等虾类主要疾病方面具有潜在作用而备受关注。研究表明,当白斑综合症病毒和副溶血弧菌等病原菌存在时,BSFL饲料可以提高虾的存活率(Foysal *et al.*, 2021; Richardson *et al.*, 2021; He *et al.*, 2022b)。分子水平的研究表明,BSFL饲料可以上调马龙螯虾肝胰腺和肠道组织以及血细胞中与免疫相关的基因表达(Foysal *et al.*, 2021)。同时也有研究表明,高比例的BSFL会对龙虾的细胞和免疫功能产生负面影响,具体来说,50%全脂BSFL粉添加会导致龙虾的肝胰腺细胞严重损伤(Saputra *et al.*, 2023); 而脱脂BSFL粉可在不影响虾体内抗氧化和免疫酶活性以及消化酶活性的情况下,替代高达50%的鱼粉(He *et al.*, 2022b)。因此,添加比例十分重要。此外,BSFL还会改变虾体内微生物组成,低替代水平的BSFL可以增加与碳水化合物利用相关的细菌丰度(Chen *et al.*, 2023)。

这些研究结果表明,BSFL在虾类养殖中作为替代蛋白源具有潜在作用,对虾体健康和免疫具有积极影响。

2.4 黑水虻作为替代蛋白对水产养殖效益的影响

水产的养殖效益是选择饲料原料的重要参考依据。BSFL被证明是淡水鱼类饲料物美价廉的蛋白质来源,能够降低鱼类养殖业的饲料成本,同时保持营养平衡(Panikkar *et al.*, 2022)。将黑水虻用作鱼类蛋白来源可以有效提升养殖效益,主要有两方面,一是提高饲料的利用率(见增强出版材料附表1)(Wachira *et al.*, 2021; Aisyah *et al.*, 2022),二是赋予废物生物修复的额外好处,可以降低成本(Panikkar *et al.*, 2022)。但BSFL的添加比例也很重要,在半滑舌鳎中,随着脱脂BSFL的比例增加,其饲料转化率和采食量逐渐下

降 (Li *et al.*, 2022), 所以在使用黑水虻替代鱼粉作为鱼类蛋白来源时需多考虑替代比例与饲料利用率之间的关系。

用于南美白对虾养殖时, BSFL作为鱼粉的替代品或虾饲料的功能性蛋白质来源, 有助于降低养殖成本 (Ko, 2020)。其一, 饲料转化率更高; 相比鱼粉, 在饲料中添加 10.5%的BSFL可以使虾的饲料转化率更高效 (见增强出版材料附表 2) (Richardson *et al.*, 2021)。其二, BSFL本身的养殖成本较低; 传统情况下, 虾饲料中鱼粉占据相当大比例, 导致高昂的饲料成本, 而BSFL能够以较低的成本从餐厨垃圾和动物粪便中生产出高价值的蛋白质原料, 所以BSFL的使用有望减轻这一经济负担 (高彬等, 2022; 孟泳岐等, 2023)。尤其是在南美白对虾的饲养中, 鱼粉通常占饲料配方的 20%至 50%, 导致饲料成本高达生产者经营成本的 50%~80%, 使用BSFL替代 25%以下的鱼粉, 虾的生长性能可维持在正常养殖下的 95%~100%之间, 从而有效降低成本并提高生产者的盈利能力 (Cummins *et al.*, 2017)。

因此, 使用BSFL作为水产养殖中的替代蛋白来源, 可有效提高养殖效益, 降低养殖成本。

3 黑水虻对幼龄水产生长性能的影响

相比成年后, 幼龄水产的营养保障更加重要, 因为它们正处于快速发育的阶段, 此时的营养摄入对其免疫功能、生长性能和最终的养殖效益有重要的影响。BSFL作为替代饲料对幼鱼的影响, 国内外学者也开展了大量的研究与应用。

大多数研究表明, 使用BSFL替代鱼粉添加到饲料养殖幼鱼, 不会对幼鱼的生长性能、养殖效益和免疫功能等产生显著的不利影响。例如, 相比于常规饲料, 脱脂BSFL替代 (14%) 鱼粉在大菱鲆 *Scophthalmus maximus* 幼鱼的生长没有不利影响 (见增强出版材料附表 1), 且通过增加包括芽孢杆菌在内的益生菌的丰度, 改善了幼鱼的肠道健康 (Zhao *et al.*, 2023)。可能是BSFL含有丰富的油脂, 可以作为鱼油的替代品。如添加BSFL油饲喂多鳞白甲鱼 *Onychostoma macrolepis* 和虹鳟鱼 *Oncorhynchus mykiss* 幼鱼, 不仅不会对它们的生长性

能产生不利影响, 而且能提高多鳞白甲鱼肝脏的抗氧化能力以及抑制其脂肪细胞的发育 (Gou *et al.*, 2023) 和调节虹鳟鱼脂肪酸的代谢 (Fawole *et al.*, 2021)。

另外, 采用BSFL全脂预蛹粉 (0%~25%~50%) 替换鱼粉投喂斑马鱼 *Danio rerio* 2 日龄仔鱼, 不同BSFL全脂预蛹粉的替代水平并不影响仔鱼的整体生长和健康状况, 且随着替代水平的增加, 仔鱼的适应能力也增强 (Zarantoniello *et al.*, 2018)。值得注意的是, 有研究发现, BSFL全脂预蛹粉以 100%的比例替代鱼粉时, 也没有对斑马鱼仔鱼的生长性能和健康产生显著的负面影响 (Zarantoniello *et al.*, 2021)。这与大部分高比例替代时会对水产生长产生负面影响的结果不同。

但也有研究表明, 使用添加BSFL的日粮养殖幼鱼可能存在一定不利影响。如非洲鲶鱼杂交 (尖齿胡鲶 *Clarias gariepinus* × 长丝异鳃鲶 *Heterobranchus longifilis*) 幼鱼, 被喂养含BSFL的日粮时, 必需氨基酸的消化率较低 (Sandor *et al.*, 2022); 幼年大菱鲆添加全脂BSFL的日粮养殖幼鱼后, 生长性能受到抑制。所以, BSFL添加入鱼饲料时应重点关注其脂质含量和饲料中脂肪酸组成的变化, 以及不同鱼品种对虫粉的喜好程度 (Zhao *et al.*, 2023)。

在幼虾养殖领域, BSFL也表现出较大应用前景。将BSFL替代鱼粉作为南美白对虾 (14 日龄) 的基础饲料, 可以改善幼虾的饲料转化率和整体生长性能 (见增强出版材料附表 2) (胡俊茹等, 2019)。且幼虾对添加BSFL更为敏感, 在幼虾的早期生长阶段适量添加, 对它们的生长性能有更显著的改善作用 (见增强出版材料附表 2) (Richardson *et al.*, 2021)。另外, BSFL对红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus* 的幼虾养殖也具有促进作用 (见增强出版材料附表 2) (Wang *et al.*, 2022)。而不同比例的BSFL对龙虾幼虾的生长、存活率和体组成没有显著影响 (Saputra *et al.*, 2023)。

因此, 由于幼龄水产对油脂的特别需求, 富含油脂的BSFL在作为幼龄水产的营养来源时具有较大优势。

4 总结和展望

BSFL作为替代蛋白质在水产养殖中的应用研究取得了一定的进展。然而,其应用效果以及对水产养殖产品品质的影响存在差异。在鱼类养殖中,使用BSFL作为替代蛋白质可以提高鱼的生长性能和饲料利用率,降低养殖成本。但BSFL的脂质含量和脂肪酸组成与传统鱼粉存在差异,使用时应注意控制饲料中的脂质含量和脂肪酸组成,以避免对鱼类生长性能产生不利影响。在虾类养殖中,BSFL也提高虾的生长性能和饲料转化率,降低养殖成本。但同样也需要注意控制BSFL的添加量,以避免对虾的生长性能产生负面影响。此外,BSFL的添加还可以改善虾的免疫功能和抗氧化能力,降低疾病爆发的风险。不同种类和不同生长阶段的虾,对BSFL的适应程度可能存在差异,需根据具体情况确定最佳的添加比例和应用方式。

综上,在水产养殖领域,黑水虻的应用前景非常广阔。这一技术的发展可提高养殖的可持续性,减少环境影响,同时降低对传统饲料资源的依赖,降低养殖成本。尽管研究有待深入,但黑水虻作为可持续饲料蛋白质来源表现出的前景令人瞩目,有望为水产养殖行业带来新的机遇和解决方案。我们认为未来的研究可以关注以下方面:

- 1、添加BSFL或预蛹饲喂虾类和鱼类的后备种群,对其种群繁殖性能的影响。
- 2、有关活虫、预蛹、成虫和虫油等不同组分在水产养殖中的应用研究。
- 3、进一步研究鱼类和虾类对BSFL粉的消化特性,优化饲料配方,以提高幼鱼和幼虾对必需氨基酸的消化率。
- 4、进一步探究使用BSFL饲喂虾类和鱼类对它们的机体健康以及鱼类虾类产品安全性的影响。

参考文献 (References)

Aisyah HN, Athirah Z, Hanani WR, *et al.* The effect of feeding black soldier fly larvae on growth performance, protein, and fat content of red hybrid tilapia (*Oreochromis* spp.) [J]. *Veterinary World*, 2022, 15 (10): 2453 - 2457.

Cai T, Li JX, Li ZQ, *et al.* Analysis of amino acid and trace element of *Hermetia illucens* larvae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43 (3): 684-689. [蔡腾, 李嘉希, 李志强, 等. 黑水虻幼虫氨基酸及其微量元素分析 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 684 - 689]

Chaklader MR, Chung WH, Howieson J, *et al.* A combination of *Hermetia illucens* reared on fish waste and poultry by-product meal improves sensory and physicochemical quality of farmed barramundi filets [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 788064.

Che YZ, Huang ZW, Wu SG, *et al.* The effects of black soldier fly protein replacing soybean meal on laying performance, egg quality, and serum protein metabolism indicators under different dietary crude protein levels [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32 (4): 1632 - 1640. [车彦卓, 黄振吾, 武书庚, 等. 不同饲料粗蛋白质水平下黑水虻蛋白替代豆粕对蛋鸡生产性能, 蛋清品质及血清蛋白质代谢指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2020, 32 (4): 1632 - 1640]

Chen Y, Lawson R, Shandilya U, *et al.* Dietary protein, lipid and insect meal on growth, plasma biochemistry and hepatic immune expression of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) [J]. *Fish and Shellfish Immunology Reports*, 2023, 5: 100111.

Chen Y, Zhuang Z, Liu J, *et al.* Effects of *Hermetia illucens* larvae meal on the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) revealed by innate immunity and 16S rRNA gene sequencing analysis [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2023, 46: 101080.

Chen YK, Zheng CZ, Zhang S, *et al.* Effects of black soldier fly larvae powder on the growth, immunity, and lipid metabolism of *Fenneropenaeus merguensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47 (2): 269 - 278. [陈永康, 郑朝中, 章双, 等. 黑水虻幼虫粉对凡纳滨对虾生长、免疫和脂质代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, 47 (2): 269 - 278]

Cummins VC, Rawles SD, Thompson KR, *et al.* Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Aquaculture*, 2017, 473: 337 - 344.

Di Rosa AR, Caccamo L, Pansera L, *et al.* Influence of *Hermetia illucens* larvae meal dietary inclusion on growth performance, gut histological traits and stress parameters in *sparus aurata* [J]. *Animals*, 2023, 13 (3): 339.

Fawole FJ, Labh SN, Hossain MS, *et al.* Insect (black soldier fly larvae) oil as a potential substitute for fish or soy oil in the fish meal-based diet of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Animal Nutrition*, 2021, 7 (4): 1360 - 1370.

Foysal MJ, Fotedar R, Siddik MAB, *et al.* Lactobacillus plantarum in black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal modulates gut health and immunity of freshwater crayfish (*Cherax cainii*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2021, 108: 42 - 52.

Gao B, Tian CY, Si ZZ, *et al.* Effect of black soldier fly meal on growth and development of *Penaeus vannamei* [J]. *Hebei Fisheries*, 2022, 10: 5 - 7. [高彬, 田翠云, 司增志, 等. 黑水虻虫粉对南美白对虾生长发育的影响 [J]. 河北渔业, 2022, 10: 5 - 7]

Gebremichael A, Kueska B, Ardo L, *et al.* Physiological response of grower African catfish to dietary black soldier fly and mealworm meal [J]. *Animals* (Basel), 2023, 13 (6): 968.

Gephart JA, Golden CD, Asche F, *et al.* Scenarios for global aquaculture and its role in human nutrition [J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2021, 29 (1): 122 - 138.

Gold M, Tomberlin JK, Diener S, *et al.* Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review [J]. *Waste Management*, 2018, 82 (12): 302 - 318.

Gou N, Wang K, Jin T, *et al.* First insights on the administration of insect oil (Black soldier fly larvae) in the diet of juvenile *Onychostoma macrolepis* [J]. *Animals*, 2023, 13 (3): 518.

Han GM, Zhang JH, Wu LM, *et al.* The effects of black soldier fly larvae powder as a substitute for fish meal on the growth, body composition, and immune function of *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35 (7): 4495 - 4506. [韩光明, 张家宏, 吴雷明, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对克氏原螯虾生长、体组成及免疫力的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, 35 (7): 4495 - 4506]

He Y, Liu X, Zhang N, *et al.* Replacement of commercial feed with fresh black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in pacific white shrimp

- (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2022, 1: 9130400a.
- He Y, Zhang N, Wang A, et al. Positive effects of replacing commercial feeds by fresh black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in the diets of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Immune enzyme, water quality, and intestinal microbiota [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 987363b.
- Hender A, Siddik MAB, Howieson J, et al. Black soldier fly, *Hermetia illucens* as an alternative to fishmeal protein and fish oil: Impact on growth, immune response, mucosal barrier status, and flesh quality of juvenile barramundi, *Lates calcarifer* (Bloch, 1790) [J]. *Biology-Basel*, 2021, 10 (6): 505.
- Homska N, Kowalska J, Bogucka J, et al. Dietary fish meal replacement with *Hermetia illucens* and *Tenebrio molitor* larval meals improves the growth performance and nutrphysiological status of ide (*Leuciscus idus*) juveniles [J]. *Animals* (Basel), 2022, 12 (10): 1277.
- Hou XY, Li L, Xu CF, et al. Research progress on the characteristics and applications of black soldier fly [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2022, 25 (4): 56-60. [侯雪阳, 李林, 许长峰, 等. 黑水虻特性及应用研究进展 [J]. 特种经济动植物, 2022, 25 (4): 56 - 60]
- Hu JR, Wang GX, Huang WQ, et al. Effects of fish meal replacement by black soldier fly (*hermetia illucens*) larvae meal on growth performance, body composition, serum biochemical indexes and antioxidant ability of juvenile *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31 (11): 5292-5300. [胡俊茹, 王国霞, 黄文庆, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对凡纳滨对虾幼虾生长性能、体组成、血清生化指标和抗氧化能力的影响 [J]. 动物营养学报, 2019, 31 (11): 5292 - 5300]
- Jiang B, Sun Y, Li W, et al. Effects of dietary black soldier fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) on the disease resistance of juvenile grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2022, 123: 136 141.
- Ko JD. Replacing Fish Meal with Black soldier fly larvae and mealworm larvae in diets for pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2020, 53 (6): 900 - 908.
- Kuo IP, Liu CS, Yang SD, et al. Effects of replacing fishmeal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) larvae meal in japanese eel (*Anguilla japonica*) diet on growth performance, fillet texture, serum biochemical parameters, and intestinal histomorphology [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2022, 1866142.
- Lanes C, Pedron FA, Bergamin GT, et al. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and prepupae defatted meals in diets for zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Animals* (Basel), 2021, 11 (3): 720.
- Li JH, Yu X, Wu YT, et al. Research progress of black soldier fly in aquaculture [J]. *Feed Research*, 2022, 45 (9): 148-151. [李嘉慧, 於霞, 郭伊田, 等. 黑水虻在水产养殖中的研究进展 [J]. 饲料研究, 2022, 45 (9): 148-151]
- Li X, Qin C, Fang Z, et al. Replacing dietary fish meal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal affected growth, digestive physiology and muscle quality of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. *Front Physiol.*, 2022, 13: 855957.
- Li XJ. The Effects of Dietary Lysine and Methionine on the Growth, Feed Utilization, Intestinal Morphology, and Immunity of Tiger Dragon Hybrid Spotted Grouper Juveniles [D]. Haikou: Hainan University Master Thesis, 2019. [李小军. 饲料赖氨酸和蛋氨酸对虎龙杂交斑幼鱼生长、饲料利用、肠道形态学和免疫的影响 [D]. 海口: 海南大学硕士学位论文, 2019]
- Md JF, Ravi F, Muhammad ABS, et al. *Lactobacillus plantarum* in black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal modulates gut health and immunity of freshwater crayfish (*Cherax cainii*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2021, 108: 42-52.
- Meng YQ, Lu YP, Zhang ZL, et al. Research progress on culture of *Hermetia illucens* L. larva and its application in aquatic animal feed [J]. *China Feed*, 2023, 15: 104-111. [孟泳岐, 鲁耀鹏, 张泽龙, 等. 黑水虻幼虫人工养殖及其在水产动物饲料中的应用研究进展 [J]. 中国饲料, 2023, 15: 104 - 111]
- Monteiro DSD, Rodrigues DFO, Oishi CA, et al. Full-Fat black soldier fly larvae meal in diet for Tambaqui, *Colossoma macropomum*: Digestibility, growth performance and economic analysis of feeds [J]. *Animals*, 2023, 13 (3): 360.
- Panikkar P, Parakkandi J, Khan F, et al. Use of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on organic waste as feed or as an ingredient in a pellet-feed formulation for Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (48): 72968 - 72978.
- Ratti S, Zarantonello M, Chemello G, et al. Spirulina-enriched substrate to rear black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae as alternative aquafeed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets: Possible effects on zootechnical performances, gut and liver health status, and fillet quality [J]. *Animals*, 2023, 13 (1): 173.
- Richardson A, Dantas-Lima J, Lefranc M, et al. Effect of a black soldier fly ingredient on the growth performance and disease resistance of juvenile pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Animals*, 2021, 11 (5): 1450.
- Sandor ZJ, Banjac V, Vidosavljevic S, et al. Apparent digestibility coefficients of black soldier fly (*Hermetia illucens*), yellow mealworm (*Tenebrio molitor*), and blue bottle fly (*Calliphora vicina*) insects for juvenile African catfish hybrids (*Clarias gariepinus* x *Heterobranchus longifilis*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2022: 4717014.
- Saputra I, Fotedar R. The effect of defatted black soldier fly meal (*Hermetia illucens*) inclusion in the formulated diet on the growth, gene expression, and histopathology of juvenile lobster (*Panulirus ornatus* Fabricius, 1798)[J]. *Aquaculture International*, 2024, 32: 11 - 29.
- Shafique L, Abdel-Latif H, Hassan FU, et al. The feasibility of using yellow mealworms (*Tenebrio molitor*): Towards a sustainable aquafeed industry[J]. *Animals* (Basel), 2021, 11(3): 811.
- Shin J, Lee KJ. Digestibility of insect meals for pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and their performance for growth, feed utilization and immune responses [J]. *PLoS ONE*, 2021, 16 (11): e260305.
- Stejskal V, Tran HQ, Prokesova M, et al. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) in pikeperch (*Sander lucioperca*) diets: Effects on growth performance, nutrient digestibility, fillet quality, economic and environmental sustainability [J]. *Animal Nutrition*, 2023, 12: 7-19.
- Wachira MN, Osuga IM, Munguti JM, et al. Efficiency and improved profitability of insect-based aquafeeds for farming Nile Tilapia fish (*Oreochromis niloticus* L.) [J]. *Animals* (Basel), 2021, 11 (9): 2599.
- Wang G, Peng K, Hu J, et al. Evaluation of defatted *Hermetia illucens* larvae meal for *Litopenaeus vannamei*: Effects on growth performance, nutrition retention, antioxidant and immune response, digestive enzyme activity and hepatic morphology [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27 (4): 986-997.
- Wang T, Wang X, Shehata AI, et al. Growth performance, physiological and antioxidant capacity responses to dietary fish meal replacement with insect meals for aquaculture: a case study in red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) [J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53 (10): 3853-3864.
- Wang WJ, Chi SY, Tan BP, et al. Study on the apparent digestibility of nutrients in 13 animal feed raw materials for *Litopenaeus vannamei* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24 (12): 2402-2414. [王文娟, 迟淑艳, 谭北平, 等. 凡纳滨对虾对 13 种动物性饲料原料营养物质表观消化率的研究 [J]. 动物营养学报, 2012, 24 (12): 2402-2414]
- Wang Y, Yan HG, Zhou XH. Nutritional value of black soldier fly and its research progress in aquaculture production [J]. *Feed Review*, 2020, 8: 50-54. [王宇, 闫卉果, 周兴华. 黑水虻营养价值及其在水产动物生产中研究进展 [J]. 饲料博览, 2020, 8: 50-54]
- Xiao HF, Wang GX, Peng K, et al. Research progress on biologic characteristics and application of *Hermetia illucens* L.[J]. *Guangdong Journal of Animal and Veterinary*, 2020, 45 (2): 27-33. [萧鸿发, 王国霞, 彭凯, 等. 黑水虻生物学特点及其应用研究进展 [J]. 广东畜牧兽医科技, 2020, 45 (2): 27-33]
- Xie JY, Wang SQ, Bai YT, et al. Research on the optimization of process parameters for the treatment of kitchen waste using the response surface methodology [J/OL]. *China Agricultural Science and Technology Bulletin*, 2024, 1-9. [郝婧怡, 王双庆, 白一彤, 等. 响应面法优化黑水

- 虻处理餐厨垃圾工艺参数研究 [J/OL]. 中国农业科技导报, 2024, 1-9]
- Yi CJ, Hu JR, Hu Y, *et al.* Apparent nutrients digestibility of *Hermetia illucen* larvae meal for *Litopenaeus vannamei* [J]. *Feed Industry*, 2018, 39 (4): 21-26. [易昌金, 胡俊茹, 胡毅, 等. 凡纳滨对虾对黑水虻幼虫粉营养物质的表观消化率 [J]. 饲料工业, 2018, 39 (4): 21-26]
- Yildirim-Aksoy M, Eljack R, Beck BH, *et al.* Nutritional evaluation of frass from black soldier fly larvae as potential feed ingredient for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 27: 101353.
- Zarantoniello M, Bruni L, Randazzo B, *et al.* Partial dietary inclusion of *Hermetia illucens* (Black soldier fly) full-fat prepupae in zebrafish feed: Biometric, histological, biochemical, and molecular implications [J]. *Zebrafish*, 2018, 15 (5): 519-532.
- Zarantoniello M, de Oliveira AA, Sahin T, *et al.* Enhancing rearing of european seabass (*Dicentrarchus labrax*) in aquaponic systems: Investigating the effects of enriched black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae meal on fish welfare and quality traits [J]. *Animals*, 2023, 13 (12): 1921.
- Zarantoniello M, Randazzo B, Cardinaletti G, *et al.* Possible dietary effects of insect-based diets across zebrafish (danio rerio) generations: A multidisciplinary study on the larval phase [J]. *Animals*, 2021, 11 (3): 751.
- Zhang CY. Current status and proposed measures for county-level kitchen waste resource utilization technology [J]. *Leather Production and Environmental Protection Science and Technology*, 2022, 3 (19): 118-120. [张聪颖. 县级餐厨垃圾资源化处理技术现状及建议措施 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3 (19): 118-120]
- Zhang JX, Wang XJ. The nutritional value of black otter and its production in animals application progress [J]. *Guangdong Feed*, 2019, 5: 38-40. [张佳鑫, 王晓娟. 黑水虻的营养价值及其在动物生产中的应用进展 [J]. 广东饲料, 2019, 5: 38-40]
- Zhang S, Xiong P, Ma Y, *et al.* Transformation of food waste to source of antimicrobial proteins by black soldier fly larvae for defense against marine *Vibrio parahaemolyticus* [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154163.
- Zhao J, Pan J, Zhang Z, *et al.* Fishmeal protein replacement by defatted and full-fat black soldier fly larvae meal in juvenile turbot diet: Effects on the growth performance and intestinal microbiota [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 8128141.
- Zheng LQ, Cui JJ, Wang YH, *et al.* Nutritional component analysis of black soldier fly larvae [J]. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2019, 49 (2): 55-56. [郑丽卿, 崔锦良, 王月晖, 等. 黑水虻幼体营养成分分析研究 [J]. 甘肃畜牧兽医, 2019, 49 (2): 55-56]

附录：表 1 黑水虻在水产品中作为替代蛋白在生长性能和养殖效益方面的应用

表 2 黑水虻对幼年阶段水产品品质的影响

详细数据见网络版 (<http://hjkcx.b.alljournals.net/>)

附表1 黑水虻在水产品中作为替代蛋白在生长性能和养殖效益方面的应用

Appendix Table 1 The Black Soldier Fly is used as a substitute protein in aquatic products for its growth performance and aquaculture benefits

鱼、虾种 Fish,shrimp species	尖齿胡鲶 <i>Clarias gariepinus</i>	大菱鲆 <i>Scophthalmus maximus</i>	鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	大盖巨脂鲤 <i>Colossoma macropomum</i>	大西洋 鲷 <i>Sparus aurata</i>	红杂交罗 非鱼 red hybrid tilapia	圆腹雅罗 鱼 <i>Leuciscus idus</i>	尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	半滑舌鳎 <i>Cynoglossus semilaevis</i>	梭鲈 <i>Sander lucioiperca</i>	尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	南美白对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>				马龙螯虾 <i>Cherax Cainii-M arron</i>	
替代方式 Alternative method	黑水虻幼虫 替代鱼粉 BSFL replace fish meal	脱脂黑水虻幼 虫替代鱼粉蛋 白 Defatted BSFL meal replace fish meal protein	脱脂黑水虻 幼虫替代鱼粉 Defatted BSFL meal replace fish meal	全脂黑水虻 幼虫替代鱼 粉 The full-fat BSFL replace fish meal	黑水虻 幼虫替 代鱼粉 BSFL replace fish meal	黑水虻幼 虫替代鱼 粉 BSFL replace fish meal	黑水虻幼 虫替代鱼 粉 BSFL replace fish meal	黑水虻预 蛹粉替代 鱼粉 BSFL pre-pupa meal replace fish meal	黑水虻 幼虫替 代鱼粉 蛋白 BSFL replace fish meal protein	脱脂黑水虻 幼虫替代鱼 粉 Defatted BSFL replace fish meal	脱脂黑水虻 幼虫替 代鱼粉 Defatted BSFL replace fish meal	黑水虻幼 虫替代鱼 粉 BSFL replace fish meal	黑水虻 幼虫粉 替代鱼 粉 BSFL meal replace fish meal	黑水虻幼虫替代鱼粉 BSFL replace fish meal		黑水虻幼 虫替代鱼 粉 BSFL replace fish meal	黑水虻幼 虫替代鱼 粉 BSFL replace fish meal
最佳替代比 例 (%) Best substitute ratio	50	14	30	10.50	35	30	20	100	33	25	18	30	10	40	17	21	12
特定生长率 (%/day) Specific growth rate 等量鱼粉	0.62 ± 0.08	2.10 ± 0.06	0.94 ± 0.07	-	0.76	2.70 ± 0.29	0.94 ± 0.05	2.39 ± 0.009	-	1.97 ± 0.12	0.93 ± 0.22	6.98 ± 0.26	5.6	7.46 ± 0.04	6.45 ± 0.09	3.85 ± 0.19	0.51 ± 0.04
Equal amount of fish meal 饲料转化率	0.69 ± 0.06	2.21 ± 0.00	0.87 ± 0.08	-	0.76	1.97 ± 1.15	0.76 ± 0.11	2.42 ± 0.007	-	1.66 ± 0.05	0.95 ± 0.20	6.91 ± 0.14	5.51	7.14 ± 0.10	6.04 ± 0.17	3.92 ± 0.05	0.49 ± 0.04
Feed conversion ratio 等量鱼粉	2.57 ± 0.30	-	1.34 ± 0.06	-	1.41	1.81 ± 1.38	2.02 ± 0.14	1.79 ± 0.046	2.1	1.14 ± 0.05	-	0.76 ± 0.01	1.3	1.16 ± 0.04	1.43 ± 0.08	2.61 ± 0.28	2.91 ± 0.15
Equal amount of fish meal 蛋白质效率 比	2.30 ± 0.23	-	1.55 ± 0.08	-	1.42	1.47 ± 0.18	2.54 ± 0.39	1.54 ± 0.081	2.7	1.26 ± 0.04	-	0.80 ± 0.01	1.36	1.42 ± 0.05	1.56 ± 0.22	2.12 ± 0.15	3.02 ± 0.16
Protein efficiency ratio 等量鱼粉	0.8 ± 0.11	-	1.34 ± 0.06	2.89 ± 0.40	1.77	0.25 ± 0.15	1.18 ± 0.08	1.89 ± 0.037	-	31.22 ± 0.12	1.64 ± 0.04	-	-	2.33 ± 0.07	-	-	-
Equal amount of fish meal	0.98 ± 0.09	-	1.23 ± 0.06	2.95 ± 0.48	1.82	0.23 ± 0.06	0.95 ± 0.12	2.11 ± 0.063	-	30.32 ± 0.16	1.66 ± 0.08	-	-	1.90 ± 0.06	-	-	-

参考文献 Reference	(Gebremichael <i>et al.</i> , 2023)	(Zhao <i>et al.</i> , 2023)	(Kuo <i>et al.</i> , 2022)	(Monteiro <i>et al.</i> , 2023)	(Di Rosa <i>et al.</i> , 2023)	(Aisyah <i>et al.</i> , 2022)	(Homska <i>et al.</i> , 2022)	(Panikkar <i>et al.</i> , 2022)	(Wachira <i>et al.</i> , 2021)	(Li <i>et al.</i> , 2022)	(Stejskal <i>et al.</i> , 2023)	(Hender <i>et al.</i> , 2021)	(Chen <i>et al.</i> , 2023)	(Ko, 2020)	(Shin <i>et al.</i> , 2021)	(Cummins, <i>et al.</i> , 2017)	(Md, <i>et al.</i> , 2021)
-------------------	--	--------------------------------	----------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	---------------	-----------------------------	------------------------------------	----------------------------

附表2 黑水虻对幼年阶段水产品品质的影响

Appendix Table 2 The impact of black soldier fly on the quality of juvenile aquatic products

鱼、虾种 Fish,shrimp species	欧洲鲈 <i>Dicentrarchus labrax</i>	多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	麦奇钩吻鲑 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	点带石斑鱼 <i>Epinephelus coioides</i>	南美白对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	四脊滑螯虾 <i>Cherax quadricarinatus</i>	中华锦绣龙虾 <i>Panulirus ornatus</i>		
替代方式 Alternative method	全脂黑水虻预蛹粉替代鱼粉 The full-fat BSFL pre-pupa meal replace fish meal	黑水虻幼虫油替代鱼油 BSFL oil replace fish oil	全脂黑水虻预蛹粉替代鱼粉 The full-fat BSFL pre-pupa meal replace fish meal	黑水虻幼虫油替代鱼油 BSFL oil replace fish oil	黑水虻幼虫替代鱼粉 BSFL replace fish meal	黑水虻幼虫替代鱼粉 BSFL replace fish meal	黑水虻幼虫替代鱼粉 BSFL replace fish meal	脱脂黑水虻幼虫替代鱼粉 Defatted BSFL replace fish meal	
最佳替代比例 (%) Best substitute ratio	3	25	3	100	5	10.50	15	14	35
特定生长率(%/day) Specific growth rate	1.36 ± 0.09	2.95 ± 0.06	2.3 ± 0.4	2.51 ± 0.03	-	7.53 ± 0.18	3.91 ± 0.04	3.30 ± 0.07	1.82 ± 0.25
等量鱼粉/鱼油 Equal amounts of fish meal / fish oil	1.47 ± 0.08	2.98 ± 0.05	2.5 ± 0.4	2.52 ± 0.05	-	6.01 ± 0.33	3.85 ± 0.03	3.12 ± 0.08	1.81 ± 0.13
饲料转化率 Feed conversion ratio	1.75 ± 0.07	1.54 ± 0.03	0.7 ± 0.06	1.04 ± 0.02	1.30 ± 0.09	1.23 ± 0.12	1.31 ± 0.00	0.96 ± 0.04	-
等量鱼粉/鱼油 Equal amounts of fish meal / fish oil	1.71 ± 0.09	1.55 ± 0.06	0.68 ± 0.05	0.98 ± 0.03	1.35 ± 0.09	1.70 ± 0.17	1.41 ± 0.00	1.05 ± 0.04	-
蛋白质效率比 Protein efficiency ratio	-	-	-	2.20 ± 0.02	-	-	-	-	-
等量鱼粉/鱼油 Equal amounts of fish meal / fish oil	-	-	-	2.25 ± 0.08	-	-	-	-	-
参考文献 Reference	(Zarantonello <i>et al.</i> , 2023)	(Gou <i>et al.</i> , 2023)	(Ratti <i>et al.</i> , 2023)	(Fawole <i>et al.</i> , 2021)	(Jiang <i>et al.</i> , 2022)	(Richardson <i>et al.</i> , 2021)	(胡俊茹等, 2019)	(Wang <i>et al.</i> , 2022)	(Saputra <i>et al.</i> , 2023)