

白星花金龟幼虫转化空心莲子草的条件优化及其效果评价*

李 龙^{1**} 童 超¹ 曾瑶瑶¹ 陈申芝² 曹成全^{1***} 叶保华³

(1. 乐山师范学院生命科学学院, 乐山 614004; 2. 乐山师范学院继续教育学院, 乐山 614004;

3. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018)

摘 要 【目的】探索入侵植物空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 的资源化利用途径, 本研究以空心莲子草为原料, 在不同优化条件下制备白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 幼虫的饲料, 系统评价白星花金龟幼虫对空心莲子草的转化效率及其虫体营养组成和虫砂肥用潜力。【方法】通过设置不同醇化时间 (0-40 d) 和含水量 (35%-85%) 的饲料梯度, 测定白星花金龟幼虫的取食量、增重量、虫砂产量及转化率, 分析取食最佳条件饲料后的幼虫虫体营养成分, 并通过盆栽试验评估虫砂对香菜生长的影响。【结果】白星花金龟幼虫对醇化 20 d、含水量 55% 的空心莲子草转化效果最佳; 幼虫虫体粗蛋白含量达 48.1%, 必需氨基酸指数 (Essential amino acid index, EAAI) 为 77.77, 属优质蛋白; 虫砂有机质含量为 29.81%, K_2O 达 4.48%, 施用后可显著 ($P < 0.05$) 提高香菜的出苗率、株高、根长及生物量。【结论】白星花金龟幼虫可高效转化空心莲子草, 虫体可作为高蛋白资源, 虫砂可作为优质生物有机肥, 本研究为入侵植物资源化利用提供了创新的生物技术途径。

关键词 白星花金龟; 空心莲子草; 转化处理; 环保昆虫; 入侵物种

Factors affecting the optimal consumption and digestion of *Alternanthera philoxeroides* by *Protaetia brevitarsis* larvae

LI Long^{1**} TONG Chao¹ ZENG Yao-Yao¹ CHEN Shen-Zhi²
CAO Cheng-Quan^{1***} YE Bao-Hua³

(1. College of Life Sciences, Leshan Normal University, Leshan 614004, China; 2. College of Extended Education, Leshan Normal University, Leshan 614004, China; 3. College of Plant Protection, Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, China)

Abstract [Aim] To identify conditions that optimize the conversion of the invasive plant *Alternanthera philoxeroides* into protein and high-quality fertilizer (frass) by *Protaetia brevitarsis* larvae. [Methods] Larvae were randomly assigned to different treatment groups with different feed gradients, fermentation durations (0-40 days) and water content (35%-85%). The amount of plant matter consumed, larval weight gain, the yield and transformation rate of frass and the nutritional components of the larvae reared were measured and compared and the effect of frass on coriander growth was assessed through controlled experiments. [Results] Larvae achieved the most effective conversion of *A. philoxeroides* after 20 days of fermentation with a moisture content of 55%. Larvae kept under these conditions contained 48.1% crude protein with an essential amino acid index (EAAI) of 77.77, indicating high protein quality. Their frass comprised 29.81% organic matter and 4.48% K_2O , and significantly ($P < 0.05$) enhanced coriander seedling emergence rate, plant height, root length, and biomass accumulation. [Conclusion] *P. brevitarsis* larvae can efficiently convert *A. philoxeroides* into high-quality protein, while producing frass that is a valuable bio-organic fertilizer. This study presents a innovative biotechnological approach for the utilization of an invasive plant.

Key words *Protaetia brevitarsis*; *Alternanthera philoxeroides*; transformation treatment; environmental insects; invasive species

*资助项目 Supported project: 乐山师范学院“竹林昆虫多样性及资源开发”项目 (项目编号: 2021SSDJS004)

**第一作者 First author, E-mail: lilong_joyfully@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: chqcao1314@163.com

收稿日期 Received: 2025-12-04; 接受日期 Accepted: 2026-01-31

苋科 *Amaranthaceae* 莲子草属 *Alternanthera* 多年生草本空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*, 俗名水花生, 其鲜嫩茎部既可供人食用, 亦适合作为畜牧饲用青料(张林鑫等, 2023)。该物种原产于南美洲巴西, 是我国首批公布的重点管控外来入侵物种之一, 入侵后会迅速蔓延成恶性杂草, 给我国生态系统、农业、渔业以及经济带来了巨大的损失。田中的空心莲子草同农作物抢夺阳光、肥力和生存空间, 致使作物大幅减产(喻大昭等, 2008); 生长在河流、沟渠中的空心莲子草会引起河道堵塞, 泥沙淤积增加, 水流受阻, 腐坏的植株也会沉积在水体底部, 影响船运、捕鱼等日常活动(沈国军等, 2005)。当前防控策略因生境而异: 旱生型空心莲子草以化学防除为主, 辅以农业、物理和生物措施; 水生型则以生物防治为主, 辅以农业、物理和化学手段(赵浩宇等, 2021)。空心莲子草也是一种具有资源化利用潜力的植物: 在医学上具有治疗作用, 可减轻糖尿病症状(Kumar *et al.*, 2011); 在农业中作为高营养饲料可改善奶品质量, 降低鱼苗养殖成本, 增强水产生态环境(李丹等, 2013); 在食用菌的生产上, 加入空心莲子草可提高产量和菌丝生长质量(贾桂康等, 2021); 在食品加工中作为营养蔬菜, 需注意其累积重金属的风险(肖宇等, 2013); 空心莲子草还用于蚯蚓养殖的低成本诱集剂, 可有效致死血吸虫传播的钉螺, 是沼气生产的理想原料(杨凤梅等, 2022); 在环境治理上, 它显著去除超富营养化水体中氮磷污染, 抑制有害藻类, 富集重金属污染土壤中的金属离子, 并可用作生产高效活性炭的材料, 助力水和空气净化(杨凤梅等, 2022)。

白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 为鞘翅目 Coleoptera 金龟科 Scarabaeidae 星花金龟属 *Protaetia* 昆虫(Lewis, 2010), 其成虫食性广泛, 属农林多寄主型, 具有群体暴食、远距离扩散等生物学特性, 其为害后易使寄主感染酸腐病, 并诱发连锁性次生病害, 严重威胁我国农林生产体系的安全(蔡欢欢, 2020); 与成虫不同, 幼虫营腐食性生活, 栖息于富含腐殖质的土壤或

腐熟有机物中, 以腐烂植物残体、秸秆和动物粪便为食, 不侵染活体植物; 同时, 幼虫在取食过程中能够加速有机物的分解与养分释放, 有助于土壤肥力的提升(郑洪源等, 2005); 同时, 虫体可作为宝贵的蛋白质资源和药材加以利用, 虫沙(幼虫粪便)富含腐殖质可用作有机肥。近年来, 利用白星花金龟幼虫转化处理秸秆(杨诚等, 2015)、生活垃圾(张广杰, 2019)、果园废弃物(王倩, 2019)、菌糠(赵威等, 2023)、竹粉(李丹等, 2023)、畜禽粪便(李潘潘, 2021)、净水植物(代凡蜃, 2023)等的研究报道较多, 证明了利用白星花金龟转化富含纤维素有机废弃物具有可行性和广阔的应用前景。

本研究旨在探究白星花金龟幼虫取食利用空心莲子草的生物学条件、取食空心莲子草后的幼虫虫体和虫砂的资源成分以及虫砂的利用, 为利用白星花金龟转化处理空心莲子草提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验昆虫: 白星花金龟幼虫来源于山东农业大学植物保护学院试验站, 在室内受控环境中[(温度(25±1)℃, 相对湿度 75%±5%, 光周期 12L:12D)]饲养至试验规定龄期。

供试植物: 空心莲子草来自山东省泰安市岱岳区角峪镇牟汶河, 采集除杂后自然晾干。

其他材料: 供试香菜 *Coriandrum sativum* 种子(品种为山东老香菜)购于兴海县禾之源农业发展有限公司; 有机物料发酵剂(有效活菌数≥5.0 亿/g)购于山东金慧农生物科技有限公司。

1.2 试验仪器

微型高速万能粉碎机(FW 型, 天津市泰斯特仪器有限公司)、秸秆揉丝机(9R-2.0 型, 4.0 kW, 沧州盛承祥机械制造有限公司)、水分测定仪(WL-45X 型, 深圳市冠亚技术科技有限公司)、智能人工气候箱(RZX-10000B, 宁波江南仪器厂)、电子天平(HLD-30002 型, 杭州

友恒称重设备有限公司)、高精度数字温度计(RT69NTY 型, 济南优测自动化有限公司)、分离筛(8、12、16、30、50 和 60 目)、爬虫饲养盒(17 cm × 10.5 cm × 7 cm, 透明食品级 pp 塑料材质, 带盖和透气孔)、花盆(22 cm × 16 cm)、卡尺等。

1.3 试验方法

1.3.1 空心莲子草好氧发酵处理 供试空心莲子草经人工去除杂质后, 置于通风处自然风干, 先后采用切菜机与秸秆粉碎机进行分段粉碎, 最终加工为粒径 0.5-1.0 cm 的均匀颗粒。称取粉碎后的空心莲子草物料 250 kg, 按质量比添加 5% 的有机物料发酵菌剂(有效活菌数 ≥ 5.0 亿/g), 加水混匀后将物料含水量调节至 55%; 充分搅拌均匀后, 将物料堆置为底宽 1.5-2.0 m、堆高 1.0-1.5 m 的馒头型发酵堆, 表面覆盖塑料薄膜密封发酵, 膜体边缘用砖块压实固定, 整个发酵周期做好防雨防护。根据试验要求, 自发酵开始(0 d), 每隔 5 d 在堆体中心位置取样 2 kg, 取样后翻堆, 每次取样后将样品保存在 -20 °C 冰箱中, 到第 40 天停止取样。取样完成后, 所有样品通过 60 °C 的烘箱烘干, 经微型高速万能粉碎机粉碎后过 16 目筛后入自封袋密封保存备用。每天使用高精度数字温度计随机插入堆体, 测量 3 次堆体中心温度后取平均值。

1.3.2 白星花金龟幼虫转化条件优化 空心莲子草发酵时间: 选取体型接近的 3 龄初期白星花金龟幼虫为试虫, 设醇化 0、5、10、15、20、25、30、35 和 40 d 的 9 组处理, 每组处理重复 3 次。每个饲养盒加入不同醇化时间的空心莲子草 50 g(干重), 调节含水量至 50%, 接入体型均匀的 3 龄幼虫 15 头, 称重记录后置于人工气候箱中[温度(25 ± 1) °C, 相对湿度 75% ± 5%, 光周期 12L:12D], 每 3 d 测定一次虫体增重量、取食量(干重)和虫砂产量(干重), 及时挑出死亡个体并补充同龄健康幼虫, 记录死亡数量。连续饲喂 15 d 后, 拣出虫体称鲜重, 将剩余饲料、虫砂及部分虫体烘干, 计算累计增重量、累计取食量和累计虫砂产量(均以干重计), 进而

计算饲料利用率、虫体转化率、虫砂转化率、近似消化率和死亡率, 以确定空心莲子草的最佳醇化时间。

饲料含水量: 设醇化空心莲子草含水量为 35%、45%、55%、65%、75%、85% 共 6 个处理, 每处理 3 次重复。每饲养盒加入醇化 20 d 的空心莲子草 50 g(干重), 接入 3 龄初期大小一致的幼虫 15 头, 饲养条件同上, 连续饲喂 15 d, 统计增重量、取食量和虫砂产量, 确定最佳饲料含水量。

不同龄期幼虫转化: 分别选取 2 龄和 3 龄初期的白星花金龟幼虫为试虫, 各 15 头, 称重后接入含醇化 20 d 空心莲子草 50 g(干重, 含水量 55%) 的饲养盒中, 每处理 3 次重复, 连续饲喂 15 d 后称重并烘干物料与虫砂, 计算转化参数, 比较不同龄期幼虫的取食表现。计算公式如下(质量单位为 g):

饲料利用率 = (投喂饲料干重 - 剩余饲料干重) / 投喂饲料干重 × 100%;

虫体转化率 = 幼虫增重量 / (取食干重 - 虫砂干重) × 100%;

虫砂转化率 = 虫砂干重 / (取食干重 - 幼虫增重量) × 100%;

近似消化率 = (取食干重 - 虫砂干重) / 取食干重 × 100%;

死亡率 = 死亡个体数 / 供试总虫数 × 100%。

1.3.3 虫体营养成分评价 取饲喂最优醇化时间和含水量饲料的白星花金龟 3 龄幼虫 3 头, 饥饿处理 24 h 以排空肠道内容物, 洗净、晾干后微波烘干, 粉碎过 30 目筛, 送青岛斯坦德标准检测有限公司检测。检测指标包括: 水分(GB 5009.3-2016)、粗蛋白(GB 5009.5-2016)、粗脂肪(GB 5009.6)、粗纤维(GB/T 5009.10-2003)、粗灰分(GB 5009.4-2016)及 18 种氨基酸[胱氨酸和色氨酸按 GB/T 18246-2000 测定, 其余 16 种(天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、甘氨酸、组氨酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸)按 GB 5009.124-2016 测定]。

1.3.4 虫砂肥效评价 收集饲喂最优条件饲料的白星花金龟 3 龄幼虫虫砂, 过 8 目和 12 目筛除去杂质, 取 12 目筛上部分, 于 60 °C 电热恒温鼓风干燥箱中烘干后送青岛斯坦德标准检测有限公司检测。试验采用盆栽, 在光照培养箱中培养。培养条件为 18 °C、光周期 8L:16D, 每盆装土 3 kg, 虫砂添加量设 0、15、30、45、60、75 g/盆 6 个梯度, 每处理 3 次重复。每盆播种香菜种子 50 粒, 定苗后保留 6 株, 生长期仅浇水不施肥。每 2 d 记录出苗数, 试验结束测定株高、根长、地上鲜重与根系鲜重。

1.4 数据分析

运用 IBM SPSS Statistics 25 对数据进行统计分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准误表示。经单因素方差分析 (One-way ANOVA) 后, 采用 Least significant difference, LSD 法进行多重比较。数据整理借助 Microsoft Excel 2019 完成。

2 结果与分析

2.1 空心莲子草好氧发酵处理

堆体中心温度呈先升后降趋势, 由温度 19.59 °C, 快速攀升至峰值 48.91 °C 后逐步回落至 33.2 °C 并趋于稳定, 伴随发酵臭味减弱、物料软化, 表明发酵完成 (图 1)。

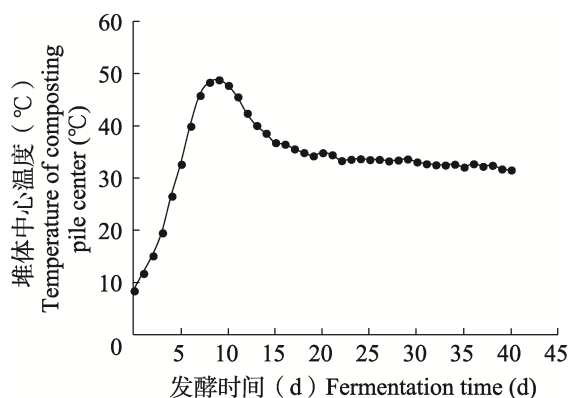


图 1 空心莲子草发酵过程中心温度变化曲线

Fig. 1 Variation curve of pile center temperature during fermentation of *Alternanthera philoxeroides*

2.2 白星花金龟幼虫转化条件优化

2.2.1 空心莲子草酵化时间的选择 由表 1 可知, 白星花金龟 3 龄幼虫取食未酵化空心莲子草时, 取食量、虫砂产量和增重量均为最低, 死亡率最高。随着酵化天数延长, 增重量先升后微降, 在酵化 20、25 和 30 d 时趋于稳定; 虫砂产量、取食量和死亡率呈波动性变化, 在取食酵化 20 和 25 d 的空心莲子草时其取食量、虫砂产量和增重量基本稳定且相对较高, 死亡率相对较低。当发酵时间超过 30 d, 各项指标均出现不同程度的回落。分析其原因, 可能是过度发酵导致饲料中营养成分被微生物大量消耗, 同时产生了一些抑制幼虫取食的代谢产物, 从而降低了饲料的适口性。

由表 2 可知, 白星花金龟 3 龄幼虫取食不同酵化时间的空心莲子草的虫体转化率、虫砂转化率、近似消化率和饲料利用率均随着酵化时间的增加而呈现波动式变化, 但虫砂转化率、近似消化率无明显差异, 在取食酵化 20、25 和 30 d 时的空心莲子草时其虫体转化率、虫砂转化率、近似消化率和饲料利用率相对较高。

综合表 1 和表 2 可得, 在空心莲子草酵化时间为 20 和 25 d 时, 白星花金龟 3 龄幼虫的取食量、增重量、虫砂产量相比较为高, 在取食空心莲子草酵化 20 d 时白星花金龟 3 龄幼虫的饲料利用率、近似消化率达到最高, 其虫体转化率、虫砂转化率相比较为高, 死亡率在取食酵化 20 d 的空心莲子草时最低。因此, 作为白星花金龟 3 龄幼虫饲料的空心莲子草最佳酵化天数为 20 d, 此条件下, 折合每取食 100 g 酵化空心莲子草, 可转化 3 龄白星花金龟虫体 3.90 g, 虫砂 71.88 g。

2.2.2 不同含水量下白星花金龟幼虫对酵化空心莲子草的转化率和转化量比较 由表 3 可知, 在 6 个不同空心莲子草含水量处理的测定结果中, 白星花金龟幼虫的增重量、虫砂产量、取食量和死亡率均有显著差异 ($P < 0.05$)。随着含水量的增加, 白星花金龟幼虫的增重量、虫砂产量、取食量表现为上升趋势, 在含水量为 55% 时达到最大值, 分别为 1.09、20.73 和 28.82 g, 其死亡

表 1 白星花金龟 3 龄幼虫对不同醇化天数空心莲子草的转化量
Table 1 Conversion amount of 3rd instar larvae of *Protaetia brevitarsis* to *Alternanthera philoxeroides* with different fermentation days

醇化天数 (d) Days of fermentation (d)	增重量 (g) Weight gain (g)	虫砂产量 (g) Frass yield (g)	取食量 (g) Food intake (g)	死亡率 (%) Mortality rate (%)
0	0.67 ± 0.03 d	17.01 ± 0.26 d	23.71 ± 0.23 d	26.06 ± 2.51 a
5	0.78 ± 0.05 cd	17.18 ± 0.15 de	23.61 ± 0.72 d	13.20 ± 3.47 b
10	0.96 ± 0.08 abc	17.73 ± 0.17 d	24.47 ± 0.11 d	9.92 ± 1.84 b
15	1.01 ± 0.10 abc	19.33 ± 0.04 b	26.60 ± 0.11 c	9.48 ± 4.95 b
20	1.13 ± 0.03 a	20.81 ± 0.07 a	28.95 ± 0.07 a	4.17 ± 2.08 b
25	1.15 ± 0.03 a	20.69 ± 0.20 a	28.36 ± 0.04 ab	6.00 ± 3.40 b
30	1.10 ± 0.05 ab	20.08 ± 0.25 b	27.68 ± 0.40 b	8.09 ± 1.84 b
35	0.95 ± 0.11 abc	19.80 ± 0.32 bc	27.49 ± 0.09 bc	9.92 ± 1.84 b
40	0.89 ± 0.09 bc	20.03 ± 0.16 b	27.51 ± 0.18 bc	11.56 ± 3.01 b

表中数据为平均值±标准误, 同列数据后标有不同小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$, LSD 法)。重量均为干重。表 2、表 3、表 4、表 5、表 9 和表 10 同。

All values in the table are presented as mean ± standard error. Different lowercase letters in the same column denote statistically significant difference at $P < 0.05$ level as determined by LSD test. All weights are dry weights. The same for Table 2, Table 3, Table 4, Table 5, Table 9 and Table 10.

表 2 白星花金龟 3 龄幼虫对不同醇化天数空心莲子草的转化率
Table 2 Conversion rate of 3rd instar larvae of *Protaetia brevitarsis* to *Alternanthera philoxeroides* with different fermentation days

醇化天数 (d) Days of fermentation (d)	虫体转化率 (%) Conversion efficiency of larvae (%)	虫砂转化率 (%) Conversion efficiency of frass (%)	饲料利用率 (%) Efficiency of feed utilization (%)	近似消化率 (%) Approximate digestibility (%)
0	10.00 ± 0.65 b	73.85 ± 1.73 a	47.43 ± 0.46 d	28.22 ± 1.71 a
5	12.52 ± 1.71 ab	75.41 ± 1.93 a	47.21 ± 1.45 d	27.12 ± 1.66 a
10	14.23 ± 0.88 a	75.43 ± 0.79 a	48.94 ± 0.22 d	27.53 ± 0.93 a
15	13.84 ± 1.42 ab	75.51 ± 0.52 a	53.20 ± 0.22 c	27.35 ± 0.44 a
20	13.90 ± 0.58 ab	74.78 ± 0.50 a	57.91 ± 0.13 a	28.14 ± 0.40 a
25	15.05 ± 0.43 a	76.05 ± 0.75 a	56.72 ± 0.07 ab	27.04 ± 0.75 a
30	14.41 ± 0.48 a	75.52 ± 0.59 a	55.37 ± 0.81 b	27.46 ± 0.60 a
35	12.50 ± 2.06 ab	74.62 ± 1.70 a	54.98 ± 0.19 bc	27.96 ± 1.34 a
40	11.88 ± 1.20 ab	75.23 ± 0.30 a	55.03 ± 0.35 bc	27.21 ± 0.12 a

表 3 不同饲料含水量下白星花金龟 3 龄幼虫对空心莲子草的转化量
Table 3 Conversion amount of 3rd instar larvae of *Protaetia brevitarsis* to *Alternanthera philoxeroides* under different feed moisture contents

含水量 (%) Moisture content (%)	增重量 (g) Weight gain (g)	虫砂产量 (g) Frass yield (g)	取食量 (g) Food intake (g)	死亡率 (%) Mortality rate (%)
35	0.57 ± 0.02 c	16.35 ± 0.39 d	23.28 ± 0.31 d	16.49 ± 2.68 bc
45	0.85 ± 0.08 ab	19.18 ± 0.44 bc	27.49 ± 0.44 b	13.19 ± 3.47 bcd
55	1.09 ± 0.21 a	20.73 ± 0.17 a	28.82 ± 0.33 a	4.17 ± 2.08 d
65	1.05 ± 0.03 a	19.99 ± 0.37 ab	27.95 ± 0.21 ab	9.48 ± 4.95 cd
75	0.59 ± 0.01 c	18.14 ± 0.28 c	25.22 ± 0.57 c	22.37 ± 1.32 b
85	0.25 ± 0.02 d	3.96 ± 0.38 e	7.58 ± 0.25 e	46.38 ± 1.11 a

率最低,为 4.17%,此后随着含水量的增加,增重量、虫砂产量、取食量逐渐降低,在含水量为 85%时降至最低,其死亡率最高,为 46.38%。

由表 4 可知,虫体转化率、虫砂转化率、饲料利用率和近似消化率随含水量增加呈上升趋势。含水量 55%和 65%处理间,虫体转化率、虫砂转化率和近似消化率无显著差异 ($P>0.05$),均处于较高水平;但饲料利用率在 55%时最高。含水量 85%时,虫体转化率、虫砂转化率和饲料利用率分别降至 7.54%、54.42%和 15.17%。综合确定最佳饲料含水量为 55%。

2.2.3 不同龄期白星花金龟幼虫取食酵化空心

莲子草转化率的比较 由表 5 可知,在 2 个龄期幼虫取食空心莲子草的结果中,白星花金龟幼虫的虫体转化率为 11.65%-13.56%,死亡率为 4.17%-6.00%,无明显差异 ($P>0.05$),2 龄幼虫的虫体转化率略高,3 龄幼虫的死亡率相对较低;在虫砂转化率和饲料利用率上,3 龄幼虫显著高于 2 龄幼虫 ($P<0.05$),3 龄幼虫的虫砂转化率为 72.13%,饲料利用率为 56.45%。此条件下,折合每取食 100 g 酵化空心莲子草,可使 2 龄白星花金龟幼虫虫体增重 2.43 g,产出虫砂 68.77 g;可使 3 龄白星花金龟幼虫虫体增重 3.08 g,产出虫砂 69.77 g。

表 4 不同饲料含水量下白星花金龟 3 龄幼虫对空心莲子草的转化率

Table 4 Conversion rate of 3rd instar larvae of *Protaetia brevitorsis* to *Alternanthera philoxeroides* under different feed moisture contents

含水量 (%) Moisture content (%)	虫体转化率 (%) Conversion efficiency of larvae (%)	虫砂转化率 (%) Conversion efficiency of frass (%)	饲料利用率 (%) Efficiency of feed utilization (%)	近似消化率 (%) Approximate digestibility (%)
35	8.25 ± 0.73 b	71.99 ± 1.63 a	46.55 ± 0.62 d	29.77 ± 1.54 b
45	10.39 ± 1.4 ab	72.06 ± 2.54 a	54.98 ± 0.89 b	30.16 ± 2.44 b
55	13.40 ± 2.24 a	74.77 ± 1.07 a	57.64 ± 0.67 a	28.05 ± 1.05 b
65	13.23 ± 0.47 a	74.32 ± 0.83 a	55.90 ± 0.42 ab	28.48 ± 0.85 b
75	8.37 ± 0.55 b	73.68 ± 0.77 a	50.44 ± 1.15 c	28.05 ± 0.69 b
85	7.54 ± 1.74 b	54.42 ± 6.64 b	15.17 ± 0.49 e	47.47 ± 6.23 a

表 5 不同龄期的白星花金龟幼虫取食空心莲子草转化率的比较

Table 5 Comparison of conversion rates of *Protaetia brevitorsis* larvae at different instars feeding on *Alternanthera philoxeroides*

龄期 Instar	虫体转化率 (%) Conversion efficiency of larvae (%)	虫砂转化率 (%) Conversion efficiency of frass (%)	饲料利用率 (%) Efficiency of feed utilization (%)	死亡率 (%) Mortality rate (%)
2	13.56 ± 1.02 a	68.11 ± 0.21 b	54.21 ± 0.59 b	6.00 ± 3.40 a
3	11.65 ± 1.33 a	72.13 ± 0.56 a	56.45 ± 0.39 a	4.17 ± 2.08 a

2.3 取食酵化空心莲子草的白星花金龟幼虫虫体营养成分评价

2.3.1 取食酵化空心莲子草的白星花金龟幼虫虫体主要资源成分 一般而言,昆虫体的粗蛋白含量往往高于粗脂肪,二者比值 (P/G) 常被用于评估昆虫的营养类型。依据王付彬和刘玉升

(2011)提出的标准,当 P/G 值达到 2 或以上时,该类昆虫可归为高蛋白型;反之, P/G 值低于 2 则属于高脂肪型。白星花金龟 3 龄幼虫干虫主要营养成分测定结果见图 2,粗蛋白含量很高,为 48.1%,脂肪含量远低于粗蛋白含量,为 14.6%,白星花金龟 3 龄幼虫取食酵化空心莲子草后 P/G 为 3.29,属高蛋白、低脂肪的昆虫。

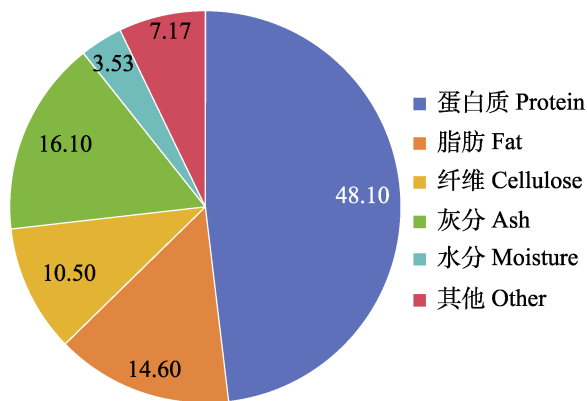


图 2 白星花金龟 3 龄幼虫干虫主要营养成分 (g/100 g)

Fig. 2 Main nutritional components of dried 3rd instar larvae of *Protactia brevitaris* (g/100 g)

2.3.2 取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫体氨基酸含量 由表 6 可知,白星花金龟幼虫虫体含有 18 种氨基酸,总氨基酸含量 (TAA) 为 43.38%,涵盖全部 8 种人体必需氨基酸。其

中谷氨酸 (Glu) 含量最高 (6.38 g/100 g),色氨酸 (Trp) 最低 (0.64 g/100 g)。

2.3.3 取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫体氨基酸评价 由表 7 可知,饲喂醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫虫体中,苯丙氨酸 Phe+酪氨酸 Tyr 的氨基酸评分 AAS 最高,达到 167.0,其次是赖氨酸 Lys,为 149.7,氨基酸评分 AAS 最低的是亮氨酸 Leu,为 52.3。化学分 (CS) 与氨基酸分 (AAS) 的最高值和最低值一致,分别为 104.9 和 43.5。因此,在取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫虫体蛋白质中,苯丙氨酸 (Phe) 和酪氨酸 (Tyr) 为第一限制性氨基酸。

2.4 取食醇化空心莲子草的白星花金龟虫砂肥效评价

2.4.1 取食醇化空心莲子草的白星花金龟虫砂的主要营养成分 取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫砂检测结果见表 8。由表 8 可知,白

表 6 白星花金龟 3 龄幼虫干虫氨基酸含量

Table 6 Amino acid content of dried 3rd instar larvae of *Protactia brevitaris*

序号 No.	氨基酸种类 Types of amino acids	含量 (g/100 g) Content (g/100 g)	序号 No.	氨基酸种类 Types of amino acids	含量 (g/100 g) Content (g/100 g)
1	天冬氨酸 Asp	3.14	13	**胱氨酸 Cys	0.48
2	谷氨酸 Glu	6.38	14	*异亮氨酸 Ile	2.52
3	丝氨酸 Ser	2.33	15	*亮氨酸 Leu	1.76
4	甘氨酸 Gly	2.58	16	*苯丙氨酸 Phe	1.65
5	组氨酸 His	1.56	17	*赖氨酸 Lys	2.52
6	精氨酸 Arg	2.37	18	*色氨酸 Trp	0.64
7	*苏氨酸 Thr	2.68	19	★必需氨基酸 Essential amino acids	18.77
8	丙氨酸 Ala	2.27	20	非必需氨基酸 Non-essential amino acids	24.61
9	脯氨酸 Pro	3.98	21	总氨基酸 Total amino acids	43.38
10	**酪氨酸 Tyr	3.17	22	★必需氨基酸/非必需氨基酸 (%) Essential amino acids/Non-essential amino acids (%)	76.30
11	*缬氨酸 Val	2.27	23	★必需氨基酸/总氨基酸 (%) Essential amino acids/Total amino acids (%)	43.30
12	*蛋氨酸 Met	1.08			

*: 必需氨基酸; **: 半必需氨基酸; ★: 包括酪氨酸和胱氨酸在内。
*: Essential amino acids; **: Semi-essential amino acids; ★: Including Tyr and Cys.

表 7 白星花金龟幼虫蛋白与 FAO 推荐模式蛋白及全鸡蛋蛋白含量的比较 (mg/g, 蛋白质)
Table 7 Comparison of protein content between *Protaetia brevitarsis* larvae,
FAO recommended pattern protein and whole egg protein (mg/g)

必需氨基酸 Essential amino acids	*FAO 模式 *FAO model	*全鸡蛋* Whole eggs	必需氨基酸 Essential amino acids	氨基酸分 Amino acid score	化学分 Chemical score
异亮氨酸 Ile	40	52.4	52.4	131.0	100.0
亮氨酸 Leu	70	84.1	36.6	52.3	43.5
赖氨酸 Lys	35	64.9	52.4	149.7	80.7
蛋氨酸 + 胱氨酸 Met + Cys	55	62.7	32.4	58.9	51.7
苯丙氨酸 + 酪氨酸 Phe + Tyr	60	95.5	100.2	167.0	104.9
苏氨酸 Thr	40	53.9	55.7	139.3	103.3
色氨酸 Trp	10	16.2	13.3	133.0	82.1
缬氨酸 Val	50	57.6	47.2	94.4	81.9
总氨基酸 Total amino acids	360	487.3	390.2	—	—

*蛋白质模式的氨基酸含量来源于参考文献乔太生等 (1992)。下表同。
Sources of amino acid content with * protein pattern are from the reference (Qiao *et al.*, 1992). The same below.

表 8 白星花金龟幼虫虫砂的主要营养成分
Table 8 Main nutritional components of frass of
Protaetia brevitarsis larvae

序号 No.	检测项目 Test items	含量 (%) Content (%)
1	有机质 Organic matter	29.81
2	总氮 Total Nitrogen	1.19
3	五氧化二磷 P ₂ O ₅	1.81
4	氧化钾 K ₂ O	4.48
5	酸碱度 pH	8.86
6	氯离子含量 Chloride content	0.89

星花金龟虫砂中有机质含量较高, 为 29.81%。取食酵化空心莲子草的白星花金龟虫砂中检测到 N、P、K 含量, 其中 K₂O 相对较高, 为 4.48%, N、P、K 总含量达到了国家农业行业标准生物有机肥料 (NY 525-2012) 最低含量标准, 虫砂 (pH = 8.86) 偏碱性。

2.4.2 白星花金龟虫砂对香菜生长的影响

2.4.2.1 不同用量的白星花金龟虫砂对香菜出苗率的影响 表 9 可知, 对照组不添加任何成分时, 香菜的出苗率为 74.67%, 随着虫砂的添加量增加, 香菜的出苗率出现先升后降, 当白星花金龟虫砂添加量为 45 g 时, 出苗率最大, 为 94.67%; 当白星花金龟虫砂添加量为 75 g 时,

出苗率降至最低, 为 64.67%。白星花金龟虫砂的颗粒较大, 添加适量的虫砂可促进香菜幼苗的呼吸生长, 提高出苗率, 添加过量时可能会出现烧苗情况从而降低出苗率。

表 9 不同用量的白星花金龟虫砂对
香菜出苗率的影响

Table 9 Effect of different dosages of *Protaetia brevitarsis* frass on the germination rate of coriander

白星花金龟虫砂添加量 (g) Addition amount of <i>P. brevitarsis</i> frass (g)	出苗率 (%) Emergence rate (%)
0	74.67 ± 1.76 d
15	84.00 ± 1.15 bc
30	88.67 ± 2.31 ab
45	94.67 ± 1.33 a
60	78.67 ± 1.53 cd
75	64.67 ± 2.41 e

2.4.2.2 施用白星花金龟虫砂对香菜生长的影响 由表 10 可知, 虫砂添加量对香菜各生长指标影响较大。随添加量增加, 株高、根长、地上部鲜重和根鲜重均呈先升后降趋势, 均在 45 g/盆处理下达最大值 (分别为 26.36 cm、8.50 cm、31.44 g 和 1.26 g)。继续增加虫砂用量, 各项指标下降, 但仍优于对照组。

表 10 不同用量的白星花金龟虫砂对香菜长势的影响
Table 10 Effect of different dosages of *Protaetia brevitarsis* frass on the growth of coriander

添加量 (g) Amount of addition (g)	株高 (cm) Plant height (cm)	根长 (cm) Root length (cm)	株鲜重 (g) Fresh weight of overground part (g)	根鲜重 (g) Fresh weight of subterranean part (g)
0	18.85 ± 0.84 c	5.73 ± 0.41 b	28.21 ± 0.17 b	0.71 ± 0.02 c
15	23.46 ± 0.88 ab	7.42 ± 0.67 ab	29.86 ± 0.36 ab	0.85 ± 0.04 bc
30	25.42 ± 0.67 a	7.93 ± 0.14 a	30.51 ± 0.63 ab	0.99 ± 0.05 b
45	26.36 ± 0.78 a	8.50 ± 0.38 a	31.44 ± 0.78 a	1.26 ± 0.08 a
60	23.94 ± 0.24 ab	7.33 ± 0.26 ab	29.68 ± 0.39 ab	0.94 ± 0.07 bc
75	21.51 ± 0.74 bc	6.69 ± 0.55 ab	29.17 ± 0.96 ab	0.86 ± 0.04 bc

3 结论与讨论

现有研究中,关于白星花金龟幼虫对有机废弃物的转化利用,多集中于玉米秸秆、平菇菌糠、大球盖菇菌糠、苹果枝落叶、畜禽粪便等常规农业有机废弃物的转化处理(杨诚等, 2015; 张倩, 2015; 孙晨可, 2018; 王倩, 2019; 杨柳等, 2019),而利用白星花金龟幼虫过腹转化外来入侵植物空心莲子草的相关研究,目前尚未见公开报道。本研究发现,取食醇化 20 d 的空心莲子草时白星花金龟 3 龄幼虫的饲料利用率、近似消化率达到最高,其虫体转化率、虫砂转化率相比较较高,死亡率在取食醇化 20 d 的空心莲子草时最低,与苹果落叶和大球盖菇菌糠的最适醇化时间(21 d)较为接近(孙晨可, 2018; 王倩, 2019)。饲料含水量对幼虫生长发育影响显著,过高或过低均有抑制作用;含水量 55%时各转化指标表现最佳,与苹果落叶和大球盖菇菌糠的最适含水量一致(孙晨可, 2018; 王倩, 2019),说明白星花金龟幼虫取食饲料含水量范围在 55%左右。在不同龄期白星花金龟幼虫取食醇化空心莲子草的测定中,在虫砂转化率和饲料利用率上,3 龄幼虫明显高于 2 龄幼虫,可能是 3 龄幼虫发育较完全,营养物质主要用于维持自身生命活动能量所需。本研究明确了白星花金龟幼虫取食空心莲子草的最佳醇化天数、最佳饲料含水量,以及幼虫不同龄期的取食情况。但本研究仅采用常规醇化方式,未探究其他醇化方式能否缩短醇化时长,也未对醇化后的空心莲子草营养成分进行测

定。同时,杨柳等(2019)的研究表明,玉米秸秆与牛粪按不同比例混配可显著提升白星花金龟幼虫的取食量,据此推测在空心莲子草饲料中添加畜禽粪便或能取得更优效果,该方向有待下一步实验深入探究。

参照 FAO/WHO (1973) 推荐的蛋白质质量评价标准,本研究中取食醇化 20 d 空心莲子草的白星花金龟 3 龄幼虫,其必需氨基酸与非必需氨基酸 EAA/NEAA 的比值为 76.30%,必需氨基酸占总氨基酸 EAA/TAA 的比例为 43.30%,表明该虫体蛋白具有较好的营养品质,其虫体中粗脂肪含量为 14.6%,明显优于以东亚飞蝗虫砂为食的白星花金龟 3 龄幼虫虫体的粗脂肪含量 9.7%,但粗蛋白含量 48.1%低于其测定的 53.8%(张广杰, 2019),可能是饲料差异造成。蛋白质营养评价不仅要关注必需氨基酸的种类和含量,还需考察其比例均衡性,常用指标包括 AAS、CS 和 EAAI (Omotoso *et al.*, 2006)。通过计算求得,取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫必需氨基酸指数 (EAAI) 为 77.77,明显低于以东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 虫砂为食的白星花金龟 3 龄幼虫的必需氨基酸指数结果 88.64 (王倩, 2019)。参考蛋白质评价标准,当比较氨基酸数 *n* 为 6-12 时, EAAI > 95.0 为优质蛋白原, 86.0 < EAAI ≤ 95.0 为良好蛋白, 75.0 < EAAI ≤ 86.0 为可用蛋白, EAAI < 75.0 为不适蛋白(陈爱莲和苏娅, 1998),取食醇化 20 d 空心莲子草白星花金龟幼虫的必需氨基酸指数 (EAAI) 为 77.8,在 76-86 之间,符合可用蛋

白标准。与牛里脊肉相比,白星花金龟幼虫虫粉的低分子量蛋白质和蛋白质消化率更高 (Lee *et al.*, 2020), 随着我国养殖业持续进步, 蛋白质饲料的需求量日益上升, 作为一种经济实惠、安全可信的蛋白质供应来源, 白星花金龟幼虫展现出巨大的开发与应用潜力。同时, 近年来的研究发现, 白星花金龟幼虫在抗癌 (Yoo *et al.*, 2007)、抗炎 (秦铭璐, 2020)、抗菌 (Krishnan *et al.*, 2020) 等方面也有很高的利用价值。

取食醇化 20 d 空心莲子草的白星花金龟 3 龄幼虫虫砂有机质为 29.81%, 明显高于以东亚飞蝗虫砂为食的白星花金龟 3 龄幼虫虫砂的结果 (18.72%) (王倩, 2019), 低于以醇化苹果树枝为食的白星花金龟 3 龄幼虫虫砂的结果 (33.22%); 钾含量比以东亚飞蝗虫砂为食的白星花金龟 3 龄幼虫虫砂的结果 (2.41%) 高 2.07%。取食醇化空心莲子草的白星花金龟幼虫虫砂 K₂O 含量升高, 这可能与空心莲子草的钾含量较高有关, 约为一般作物秸秆的 10 倍 (王志勇和赵昌明, 2010)。已有研究证实, 施用白星花金龟虫砂和黄粉虫 *Tenebrio molitor* 虫砂均可促进菠菜生长 (王倩, 2019)。研究表明辣椒种植中适量施用黄粉虫虫砂和白星花金龟虫砂可增加辣椒产量, 提升辣椒品质 (张连俊等, 2021)。本研究发现, 施用白星花金龟虫砂后有助于香菜生长发育, 单株产量明显提升。白星花金龟虫砂促进香菜生长的最佳施用量为 1 kg 土壤, 施用 15 g, 白星花金龟虫砂是理想的生物有机肥。本试验只测定了虫砂对香菜的基础长势指标, 下一步试验可以其他有机肥、微生物菌肥作为对照, 测定白星花金龟虫砂对香菜的叶绿素、VC 含量、风味物质等含量的影响, 同时今后应该丰富白星花金龟虫砂在果蔬花卉等植物种植方面的利用。

综上所述, 白星花金龟幼虫可有效转化空心莲子草, 其转化效率受醇化时间与饲料含水量显著影响, 在空心莲子草醇化 20 d、含水量 55% 的条件下, 幼虫取食量、增重量及虫砂产量均达最优; 取食该条件下饲料的幼虫虫体粗蛋白含量达 48.1%, 必需氨基酸指数 (EAAI) 为 77.77, 符合可用蛋白标准, 具备良好的营养价值与开发

潜力; 虫砂中富含有机质 (29.81%) 与钾元素 (K₂O 4.48%), 符合生物有机肥标准, 适量施用可显著促进香菜生长, 最佳施用量为 45 g/盆 (土壤 3 kg)。本研究验证了白星花金龟幼虫在入侵植物资源化处理中的可行性与高效性, 为空心莲子草的综合治理与高值利用提供了创新的生物技术路径。

参考文献 (References)

- Cai HH, 2020. Study on host transfer rules and control technologies of adult *Protaetia brevitarsis*. Master dissertation. Shihezi: Shihezi University. [蔡欢欢, 2020. 白星花金龟成虫的寄主转移规律和控制技术研究. 硕士学位论文. 新疆: 石河子大学.]
- Chen AL, Su Y, 1998. Calculation of essential amino acid index (EAAI) using microsoft excel. *Grain Distribution Technology*, 1998(3): 32–36. [陈爱莲, 苏娅, 1998. 利用 Microsoft excel 计算必需氨基酸指数(EAAI). 粮食流通技术, 1998(3): 32–36.]
- Dai FS, 2023. Feasibility study on utilization of five water purification plants by *Protaetia brevitarsis* and *Hermetia illucens*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [代凡蜃, 2023. 白星花金龟与黑水虻利用五种净水植物的可行性研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- FAO, WHO, 1973. Energy and Protein Requirements. Ad hoc Expert Committee. FAO Nutrition Meetings Report Series No. 52. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization.
- Jia GK, Huang ML, Zhang ZY, 2021. Preliminary experiment on cultivation of *Pleurotus ostreatus* using invasive plant *Alternanthera philoxeroides*. *Edible Fungi of China*, 40(5): 16–18, 22. [贾桂康, 黄曼莲, 张智英, 2021. 利用入侵植物空心莲子草栽培平菇初步试验. 中国食用菌, 40(5): 16–18, 22.]
- Krishnan M, Choi J, Jang A, Kim Y, 2020. A novel peptide antibiotic, Pro10-1D, designed from insect defensin shows antibacterial and anti-inflammatory activities in sepsis models. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17): 1–24.
- Kumar PS, Dheeba B, Stalin S, Maragatham M, Kannan M, 2011. Hypoglycemic and antihyperlipidemic activity of leaves and stems of *Alternanthera philoxeroides* in alloxan induced diabetes. *Journal of Pharmacy Research*, 4(6): 1793–1795.
- Lee S, Choi YS, Jo K, Kim TK, Jung S, 2020. Quality characteristics and protein digestibility of *Protaetia brevitarsis* larvae. *Journal of Animal Science and Technology*, 62(5): 741–752.

- Lewis G, 2010. On certain new species of Coleoptera from Japan. *Annals & Magazine of Natural History*, 4(24): 459–467.
- Li D, Xu L, Zhang Z, Wang YP, 2013. Research progress on utilization and biological control of *Alternanthera philoxeroides*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(1): 71–75. [李丹, 徐丽, 张震, 王育鹏, 2013. 喜旱莲子草的利用及其生物防治研究进展. 中国农学通报, 29(1): 71–75.]
- Li D, Dai FW, Zhaxi C, 2023. Study on the effect of bamboo powder on the conversion efficiency of distiller's grains by *Protaetia brevitarsis*. *Journal of Leshan Normal University*, 38(8): 32–39, 50. [李丹, 代发文, 扎西初, 2023. 竹粉对白星花金龟转化白酒糟效率的影响研究. 乐山师范学院学报, 38(8): 32–39, 50.]
- Li PP, 2021. Study on the conversion capacity of livestock and poultry manure by *Protaetia brevitarsis*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [李潘潘, 2021. 白星花金龟对畜禽粪污转化能力的研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Omotoso OT, 2006. Nutritional quality, functional properties and anti-nutrient compositions of the larva of *Cirina forda* (Westwood) (Lepidoptera: Saturniidae). *Journal of Zhejiang University Science B*, 7(1): 51–55.
- Qin ML, 2020. Extraction, isolation, purification and anti-inflammatory activity of *Protaetia brevitarsis* larval protein. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [秦铭璐, 2020. 白星花金龟幼虫蛋白的提取、分离纯化及抗炎性研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Qiao TS, Tang HC, Liu JX, Li L, 1992. Nutritional composition analysis and protein evaluation of *Oxya chinensis*. *Entomological Knowledge*, 29(2): 113–117. [乔太生, 唐华澄, 刘景晞, 李力, 1992. 中华稻蝗的营养成分分析及其蛋白质评价. 昆虫知识, 29(2): 113–117.]
- Shen GJ, Xu ZH, Yu GS, 2005. Distribution, harm and control countermeasures of *Alternanthera philoxeroides*. *Plant Protection*, 31(3): 14–18. [沈国军, 徐正浩, 俞谷松, 2005. 空心莲子草的分布、危害与防除对策. 植物保护, 31(3): 14–18.]
- Sun CK, 2018. Study on the circulation model of "wheat straw-*Stropharia rugosoannulata*-*Protaetia brevitarsis*". Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [孙晨可, 2018. “小麦秸秆-大球盖菇-白星花金龟”循环模式研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Wang FB, Liu YS, 2011. Analysis of resource components and value evaluation of larvae of *Neochauliodes minor*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(1): 147–151. [王付彬, 刘玉升, 2011. 小碎斑鱼蛉幼虫资源成分分析及价值评价. 应用昆虫学报, 48(1): 147–151.]
- Wang Q, 2019. Study on the technology of combined conversion of orchard waste by *Protaetia brevitarsis* and *Tenebrio molitor*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [王倩, 2019. 利用白星花金龟和黄粉虫联合转化苹果园废弃物的技术研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Wang ZY, Zhao CM, 2010. Utilization value of *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 14(10): 113–114, 116. [王志勇, 赵昌明, 2010. 空心莲子草的可利用价值. 河北农业科学, 14(10): 113–114, 116.]
- Xiao Y, Sun L, Tian Y, Guan XJ, 2013. Application research of *Alternanthera philoxeroides*. *Heilongjiang Science*, 2013(3): 32–33, 40. [肖宇, 孙力, 田媛, 关向军, 2013. 空心莲子草的应用研究. 黑龙江科学, 2013(3): 32–33, 40.]
- Yang C, Liu YS, Xu XY, Zhao L, 2015. Study on feeding effect of 3rd-instar larvae of *Protaetia brevitarsis* on ensiled corn straw. *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 122–127. [杨诚, 刘玉升, 徐晓燕, 赵莉, 2015. 白星花金龟幼虫对醇化玉米秸秆取食效果的研究. 环境昆虫学报, 37(1): 122–127.]
- Yang FM, Zheng SH, Guan XY, Kuang NS, Guo YJ, 2022. Research progress on biological characteristics and utilization value of *Alternanthera philoxeroides*. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(22): 99–103, 107. [杨凤梅, 郑舒含, 关晓银, 卞乃诵, 郭雁君, 2022. 空心莲子草的生物学特性及利用价值研究进展. 现代农业科技, 2022(22): 99–103, 107.]
- Yang L, Zhang GJ, Xu T, Zhang LJ, Qiang S, Ma DY, Liu YS, 2019. Study on the conversion capacity of *Protaetia brevitarsis* larvae to different agricultural organic wastes. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 42(3): 189–193. [杨柳, 张广杰, 徐韬, 张连俊, 羌松, 马德英, 刘玉升, 2019. 白星花金龟幼虫对不同农业有机废弃物的转化力研究. 新疆农业大学学报, 42(3): 189–193.]
- Yoo YC, Shin BH, Hong JH, Lee J, Chee HY, Song KS, Lee KB, 2007. Isolation of fatty acids with anticancer activity from *Protaetia brevitarsis* larva. *Archives of Pharmacal Research*, 30(3): 361–365.
- Yu DZ, Wei SH, Zhu WD, Cao AC, Zhang CX, Song ZX, 2008. Effects of *Alternanthera philoxeroides* on rice growth and its economic threshold. *Acta Phytopylacica Sinica*, 35(1): 69–73. [喻大昭, 魏守辉, 朱文达, 曹劫程, 张朝贤, 宋兆欣, 2008.]

- 空心莲子草对水稻生长的影响及其经济阈值. 植物保护学报, 35(1): 69–73.]
- Zhang GJ, 2019. Study on conversion technology of organic waste by *Protaetia brevitarsis*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [张广杰, 2019. 白星花金龟对有机废弃物的转化技术研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Zhang LJ, Li JL, Zhang S, Zhang GJ, Yang L, Xu T, Ma DY, Liu YS, 2021. Effects of two insect frass on the growth and fruit quality of pepper. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(8): 1511–1518. [张连俊, 李金兰, 张帅, 张广杰, 杨柳, 徐韬, 马德英, 刘玉升, 2021. 2 种昆虫虫粪对辣椒生长及果实品质的影响. 新疆农业科学, 58(8): 1511–1518.]
- Zhang LX, Wu X, Li LN, Ran J, Su CZ, Zhang KK, Huang B, 2023. Study on nutritional components and feeding value of 8 kinds of green forages. *Chinese Livestock and Poultry Breeding*, 19(5): 66–71. [张林鑫, 吴仙, 李莉娜, 冉江, 粟朝芝, 张凯凯, 黄波, 2023. 8 种青饲料营养成分及其饲用价值的研究. 中国畜禽种业, 19(5): 66–71.]
- Zhang Q, 2015. Biological study on *Protaetia brevitarsis* feeding on *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [张倩, 2015. 取食平菇菌糠的白星花金龟生物学研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Zhao HY, Liu JD, Zheng SJ, Yang JM, Liu SN, Zhu JY, Zhou XG, 2021. Integrated control technology of *Alternanthera philoxeroides*. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 2021(2): 56–57. [赵浩宇, 刘俊豆, 郑仕军, 杨洁森, 刘胜男, 朱建义, 周小刚, 2021. 空心莲子草综合防治技术. 四川农业与农机, 2021(2): 56–57.]
- Zhao W, Zhao CY, Kong H, Wang L, 2023. Study on conversion of *Hypsizygus marmoreus* spent mushroom substrate by larvae of *Protaetia brevitarsis*. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 54(6): 865–872. [赵威, 赵传岳, 孔昊, 王丽, 2023. 白星花金龟幼虫转化蟹味菇菌糠的研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 54(6): 865–872.]
- Zheng HY, Liu JP, Nan HL, Li ZL, He LF, 2005. Study on feeding habits of *Protaetia brevitarsis*. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2005(3): 23–24, 54. [郑洪源, 刘建平, 南怀林, 李占林, 何丽芬, 2005. 白星花金龟子食性研究. 陕西农业科学, 2005(3): 23–24, 54.]