

大麦虫幼虫取食塑料的研究*

李琛静** 王哲 张雅林***

(西北农林科技大学植物保护学院, 植保资源与病虫害治理教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要 【目的】近年来, 有关昆虫取食降解塑料废弃物的研究备受关注。本文研究大麦虫 *Zophobas atratus* 幼虫取食塑料后的生长发育、肠道内微生物菌群的变化, 以及经过肠道后塑料的重量损失和分子量的变化, 为进一步研究大麦虫幼虫降解塑料废弃物提供科学依据。【方法】以聚苯乙烯泡沫和聚乙烯发泡棉饲喂大麦虫幼虫, 测定其存活率、虫重、化蛹率; 使用凝胶渗透色谱法分析经过大麦虫幼虫肠道后塑料的分子量变化; 通过 Beta 多样性、菌群组成、PICRUSt 功能预测分析取食塑料后的大麦虫幼虫肠道微生物多样性及其与石油基塑料之间的关系。【结果】取食聚苯乙烯和聚乙烯泡沫塑料 25 d 后, 大麦虫幼虫存活率分别为 (58.67±4.04)% 和 (62.5±5.27)%, 取食麦麸组的大麦幼虫存活率为 (84.5±0.87)%; 取食塑料后大麦虫幼虫体重没有显著增加、不能化蛹; 经大麦虫幼虫取食后, 聚苯乙烯分子量降低, 聚乙烯分子量升高; 幼虫肠道内与塑料降解相关细菌相对丰度升高; 取食聚苯乙烯后, 幼虫肠道中芳香烃和烷烃降解基因携带菌得到富集。而取食聚乙烯后, 幼虫肠道中芳香烃和烷烃降解基因携带菌并没有被富集。【结论】大麦虫幼虫对聚苯乙烯和聚乙烯有一定的降解能力, 但对聚乙烯的降解能力较差, 这 2 种塑料均不能为大麦虫幼虫的生长发育提供足够的营养和能量。

关键词 聚苯乙烯; 聚乙烯; 生长发育; 塑料降解; 肠道菌群

Research on the consumption and degradation of plastics by *Zophobas atratus* larvae

LI Chen-Jing** WANG Zhe ZHANG Ya-Lin***

(Key Laboratory of Plant Protection of Resources and Pest Management, Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract 【Objectives】The consumption and breakdown of plastic waste by insects has been a popular research topic in recent years. We investigated the growth and development of *Zophobas atratus* larvae, changes in its gut microbiota and the molecular weight of plastics consumed by these larvae, in order to provide a foundation for further research on plastic degradation by this species. 【Methods】Larvae were fed either polystyrene or polyethylene foam, and their survival rate, weight and pupation rate were measured and compared. The molecular weight of plastics after passing through the guts of larvae was analyzed with gel permeation chromatography and the gut microbiota of larvae fed on plastics, and their relationship to pail-based plastics, were analyzed using Beta diversity, community composition and PICRUSt function prediction. 【Results】The survival rates of larvae fed on polystyrene or polyethylene foam were (58.67 ± 4.04)% and (62.50 ± 5.27)%, respectively, after 25 days, compared to (84.50 ± 0.87)% for the bran-fed control group. No significant increase in larval weight occurred in larvae that fed on plastics, nor did these larvae pupate. The molecular weight of polystyrene decreased after being digested by the larval gut, whereas that of polyethylene increased. The relative abundance of bacteria associated with plastic degradation increased in the guts of the larvae that fed of plastics. Larvae that fed on polystyrene had higher numbers of bacteria carrying aromatic hydrocarbon and alkane degradation genes in their gut whereas those that were fed on polyethylene did not. 【Conclusion】Polystyrene is more easily degraded than polyethylene by *Z. atratus* larvae.

*资助项目 Supported projects: 生态环境部“生物多样性调查与评估”(2019HJ2096001006)

**第一作者 First author, E-mail: 1927334147@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yalinzh@nwsuaf.edu.cn

收稿日期 Received: 2021-03-15; 接受日期 Accepted: 2021-06-16

However, neither polystyrene nor polyethylene provide sufficient nutrition and energy for the normal growth and development of *Z. atratus* larvae.

Key words polystyrene; polyethylene; growth and development; plastic degradation; gut microbiota

塑料因其多样的用途和低廉的价格,成为人们生活中不可或缺的一部分。近 25 年来,全球塑料产量增长了两倍,截止 2019 年,年产量高达 3.68 亿吨(Nielsen *et al.*, 2019; Feil and Pretz, 2020; PlasticsEurope, 2020)。塑料种类繁多,其中由烯烃类单体聚合而成的聚烯烃类塑料相对密度较小、机械强度高、可剪裁,使用最为广泛,产生的塑料废物最多(Razavi, 2000; Mühlaupt, 2013; Dube and Salehpour, 2014; Stürzel *et al.*, 2016)。然而,塑料结构稳定,在自然条件下难以降解(Guillet *et al.*, 1974; Albertsson *et al.*, 1987)。目前,塑料废物的处理方法主要是填埋或焚烧,给环境带来了严重的负面影响(Verma *et al.*, 2016; European Parliament, 2018; Amobonye *et al.*, 2021),因此,亟需更为节能、环保的塑料废物的生物处理方法(Raddadi and Fava, 2019)。

研究人员发现大麦虫 *Zophobas atratus*、大蜡螟 *Galleria mellonella* 等多种咀嚼式口器昆虫都有取食塑料现象(苗少娟和张雅林, 2010; Kundungal *et al.*, 2019; Lou *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020)。陈重光(2005)发现黄粉虫 *Tenebrio molitor* 可以取食塑料。苗少娟和张雅林(2010)对取食塑料后的大麦虫幼虫虫粪的化学成分进行检测分析,发现虫粪中有塑料残留。随后,相关学者进一步对取食塑料的大麦虫幼虫的生长发育进行了研究。殷涛等(2018)发现取食聚苯乙烯和聚乙烯的大麦虫幼虫体重增长较少、自相残杀数量增多,且幼虫不能化蛹,但 Yang 等(2019)发现取食聚苯乙烯和麦麸的大麦虫幼虫的存活率无显著差异,且取食塑料后幼虫可以化蛹。此外,昆虫对塑料的降解作用与其肠道微生物有关(Yang *et al.*, 2015b)。有关黄粉虫及其肠道微生物对塑料的降解作用和降解机理的相关研究较多(Yang *et al.*, 2015a, 2015b; Brandon *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018),但关于大麦虫幼虫降解石油基塑料的研究仍然较少且存在争议。

针对上述问题,本文选择聚苯乙烯泡沫塑料和聚乙烯发泡棉饲喂大麦虫后,观察大麦虫幼虫的生长发育、幼虫肠道微生物变化,以及幼虫取食塑料后,塑料重量的损失和分子量的变化,以期利用大麦虫幼虫降解塑料提供更多的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫与材料

大麦虫幼虫:购自广东阳江。将幼虫放入养虫盒内,置于温度为 25 °C、湿度为 70%、L:D=24:0 的人工气候室中饲养 30 d。饲喂麦麸,每天添加少量甘蓝叶。

麦麸:购自陕西杨凌面粉厂(无添加剂)。

挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(Extruded polystyrene foam, XPS)(含阻燃剂):购自河北德鹏建材有限公司。

发泡聚乙烯(Expandable polyethylene, EPE)(含发泡剂):购自江苏南京天诺宝公司。

1.2 主要试剂与仪器

DNeasy Blood & Tissue Kit(QIAGEN, 69506)、生理盐水(0.85%)、四氢呋喃(色谱纯,阿拉丁)、甲苯(分析纯,西陇化工)、1,2,4-三氯苯(色谱纯,阿拉丁)。

Waters 1525 凝胶渗透色谱仪(Gel permeation chromatography, GPC)

1.3 试验方法

1.3.1 试虫处理 选取 1 200 头体长约 4 cm 大麦虫幼虫分为 6 组,每组 200 条,称量每组幼虫总重量,将试虫置于养虫盒(28 cm×19 cm×6 cm)中饲养。饲喂幼虫的食物分别为 XPS、XPS+麦麸(1:1)、EPE、EPE+麦麸(1:1)和饥饿处理,以饲喂麦麸(Bran)作为对照组。依据食料配方的不同,将上述 6 组分为 4 种类型:麦麸组、

塑料组 (XPS、EPE)、塑料+麦麸组 (XPS+麦麸、EPE+麦麸)、饥饿组。塑料裁剪为 4 cm×4 cm×2 cm 的小片。除饥饿组外, 所有处理加入的食物总量均为 10 g, 麦麸组每 2.5 d 补充 10 g 麦麸, 塑料+麦麸混合组每 5 d 补充 5 g 麦麸。养虫室条件设置为: 温度 25 °C, 湿度 70%, L:D=24:0。每个处理试验重复 3 次。

1.3.2 大麦虫生长发育测定 试验期间, 每 5 d 统计大麦虫幼虫存活数目, 并称量虫体重量, 收集虫粪, 试验持续 25 d。待幼虫老熟后, 分开置于化蛹盘, 统计化蛹数。存活率、虫体增加的重量和化蛹率的计算公式为:

存活率 (%) = 存活数/初始虫数×100,

虫体增加的重量 (g) = 存活虫体总重量/存活虫数 - 初始虫体总重量/初始虫数,

化蛹率 (%) = 化蛹数/初始虫数×100。

1.3.3 虫粪中塑料的提取及塑料损失 每 5 d 称量幼虫对塑料取食量, 25 d 试验结束后, 计算幼虫取食塑料的总量。第 25 天收集虫粪, 并清理虫粪中的杂质, 将虫粪样品保存在 -20 °C 冰箱中备用。

称量 XPS 组大麦虫幼虫虫粪 4 g, 碾成粉末, 倒入 250 mL 茄形瓶, 加入 100 mL 四氢呋喃, 将茄形瓶安装到冷凝回流装置上, 70 °C 水浴加热萃取 12 h。趁热抽滤, 除去杂质, 将滤液转移至新的 250 mL 茄形瓶, 70 °C 旋转浓缩至滤液呈粘稠状。然后将滤液转移至玻璃培养皿, 通风橱中晾一夜至四氢呋喃挥发完全, 收集虫粪提取物, 并称重 (杨宇, 2015)。

称量 EPE 组大麦虫幼虫虫粪 4 g, 碾成粉末, 倒入 250 mL 茄形瓶, 加入 100 mL 甲苯, 80 °C 水浴加热萃取 12 h。将萃取液趁热转移至新的 250 mL 茄形瓶, 80 °C 旋转浓缩至 5 mL。然后将萃取液转移至 10 mL 烧杯, 通风橱中晾一夜至甲苯挥发完全, 收集虫粪提取物, 称重。塑料损失计算方法为:

塑料损失量 (g) = 塑料总量 (g) - 剩余塑料量 (g) - 虫粪提取物 (g),

取食量 (g) = 塑料总量 (g) - 剩余塑料量 (g)。

1.3.4 虫粪提取物分子量的测定 使用 GPC 测

定提取物的分子量。称取 1 g XPS 组虫粪提取物, 溶解在四氢呋喃中, 浓度为 2 mg/mL。将溶液上样至 GPC。以四氢呋喃为流动相, 温度 40 °C, 流速为 1 mL/min。EPE 组虫粪提取物以 1,2,4-三氯苯为流动相, 温度 140 °C, 流速为 1 mL/min。将未经处理的 XPS 和 EPE 作为对照 (Yang *et al.*, 2015b)。在表征高聚物的分子量时, 本研究采用的是衡量其平均分子量的数均分子量 (Number-average molecular weight, M_n) 和衡量其分散性的重均分子量 (Weight-average molecular weight, M_w)。

1.3.5 大麦虫幼虫肠道微生物检测 饲喂塑料 25 d 后, 从 3 个试验组 (麦麸、XPS 组、EPE 组) 中各随机选取大麦虫幼虫 5 头, 将幼虫置于 75% 酒精中浸泡 30 s, 然后置于生理盐水中浸泡 3 次, 晾干虫体后置于灭菌滤纸上解剖。将幼虫全肠道取出后置于 1.5 mL 离心管, 电动研磨仪研磨破碎, 使用 QIAGEN DNeasy Blood & Tissue Kit 提取肠道内容物 DNA。对提取 DNA 的 16S rRNA 基因 V3-V4 区进行 PCR 扩增, 高通量测序, 将得到序列相似性大于 97% 的定义为一个分类单元 (Operational taxonomic units, OTU)。每个处理试验重复 3 次。本研究中 16S rRNA 基因的高通量测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成, 利用美吉生物云平台分析肠道微生物菌群的多样性。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 20 进行数据处理和分析, 采用 Duncan's 新复极差检验分析不同处理的大麦幼虫的存活率、虫体增加的重量、化蛹率以及塑料重量损失的差异显著性, 采用 Student's *t*-tests 分析虫粪提取物与塑料样品的分子量的差异显著性, 运用 GraphPad Prism 8、Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 取食塑料对大麦虫生长发育的影响

经不同食物处理 25 d 后, 大麦虫幼虫的存活率大小顺序为: 麦麸组 > 塑料+麦麸组 > EPE ≥

XPS≥饥饿组(图1)。取食EPE的大麦虫幼虫存活率显著大于饥饿组的($P<0.05$), 取食XPS的大麦虫幼虫存活率与饥饿组无显著差异($P>0.05$); 取食塑料+麦麸组的大麦虫幼虫存活率显著高于塑料组的($P<0.05$)。因此, 取食XPS、EPE不利于大麦虫幼虫存活, 取食EPE可以维持大麦虫幼虫的生命, 在塑料中添加麦麸有利于大麦虫幼虫存活。

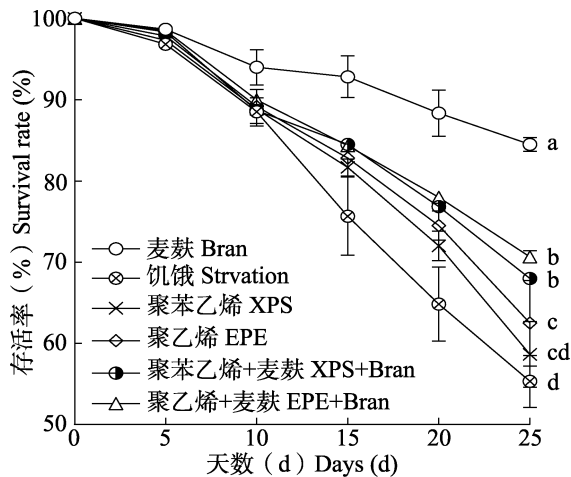


图1 大麦虫幼虫的存活率

Fig. 1 Survival rate of *Zophobas atratus* larvae

图中XPS表示以聚苯乙烯为食物饲喂试虫,EPE表示以聚乙烯为食物饲喂试虫。下图同。图中数据为平均值±标准差。图中标注的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 新复极差检验)。

XPS in the figure shows feeding *Zophobas atratus* larvae with extruded polystyrene foam as food. EPE in the figure shows feeding *Zophobas atratus* larvae with extruded polystyrene foam as food. The same below. Data are mean ± SD. Different letters indicate significant differences at 0.05 level by Duncan's multiple range test.

由图2可知, 饲养25 d时, 取食塑料+麦麸和麦麸的大麦虫虫体增加的重量显著大于取食塑料和饥饿处理虫体增加的重量($P<0.05$), 取食塑料的虫体增加的重量与饥饿处理组无显著差异($P>0.05$)。饲养30 d后, 取食XPS、EPE和经饥饿处理的大麦虫幼虫身体出现腐烂、变软, 开始陆续死亡, 且不能化蛹。而取食麦麸、XPS+麦麸、EPE+麦麸的大麦幼虫则能化蛹, 化蛹率分别为(56.33±3.82)%、(31.00±5.29)%、(32.17±2.57)% (图3), 且取食塑料+麦麸的化蛹率显著低于取食麦麸的($P<0.05$)。综上所述

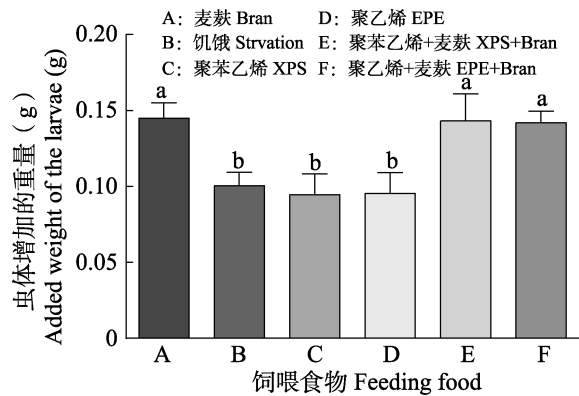


图2 虫体增加的重量

Fig. 2 Weight increase of *Zophobas atratus* larvae

图中数据为平均值±标准差。柱上标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 新复极差检验)。

图3, 图5同。

Data are mean ± SD. Histograms with different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level by Duncan's multiple range test. The same as Fig.3 and Fig.5.

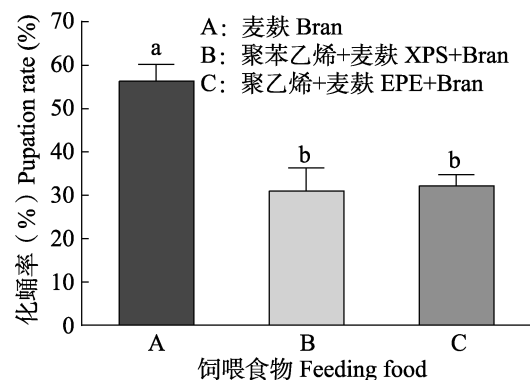


图3 大麦虫幼虫化蛹率

Fig. 3 Pupation rate of *Zophobas atratus* larvae

述, 取食塑料不利于大麦虫幼虫虫体重量的增加及化蛹。

2.2 大麦虫幼虫取食塑料后塑料重量的损失及分子量变化

在试验期间, 大麦虫幼虫取食塑料和塑料+麦麸的取食量逐日减少(图4)。20 d后, 大麦虫幼虫几乎不再取食塑料。25 d后, 称量剩余塑料重量, 并提取虫粪中的塑料, 计算塑料重量损失。塑料重量损失结果如图5所示, XPS组塑料损失量为(1.86±0.16)g, 高于XPS+麦麸组的(1.15±0.08)g, EPE组塑料损失量为(1.72±0.15)g, 高于EPE+麦麸组的(1.03±0.09)g。由此可知, 大麦虫幼虫在有麦麸的情况下, 更喜欢取食麦麸,

麦麸的存在并不能增加大麦虫幼虫对塑料的取食、降解。

通过 GPC 测定经过大麦虫幼虫肠道后塑料的分子量变化。结果如图 6 所示, XPS 组虫粪提取物的 M_n 下降了 20.78%, M_w 下降了

20.03%, 说明经过幼虫肠道后, XPS 中低分子量物质占比增加。而在 EPE 组虫粪提取物中, M_n 上升了 33.72%, M_w 上升了 9.71% (图 6), 说明经过幼虫肠道后, EPE 中高分子量物质占比增加。

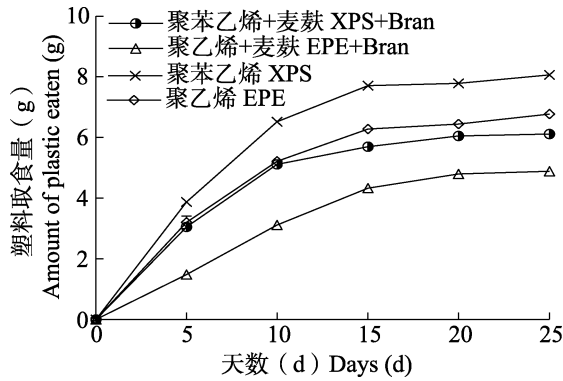


图 4 25 d 内取食塑料量变化

Fig. 4 Consumption changes of plastics of over the 25-day experiment

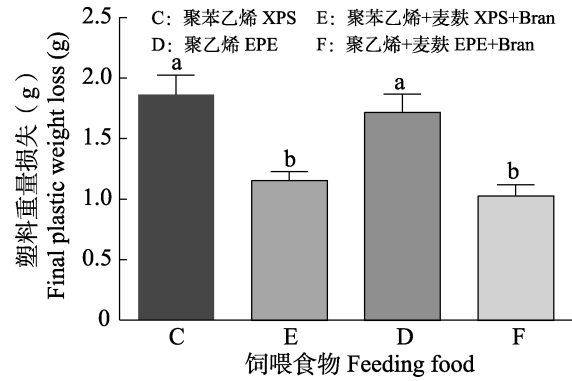


图 5 25 d 的塑料损失量

Fig. 5 Plastics loss over the 25-day experiment

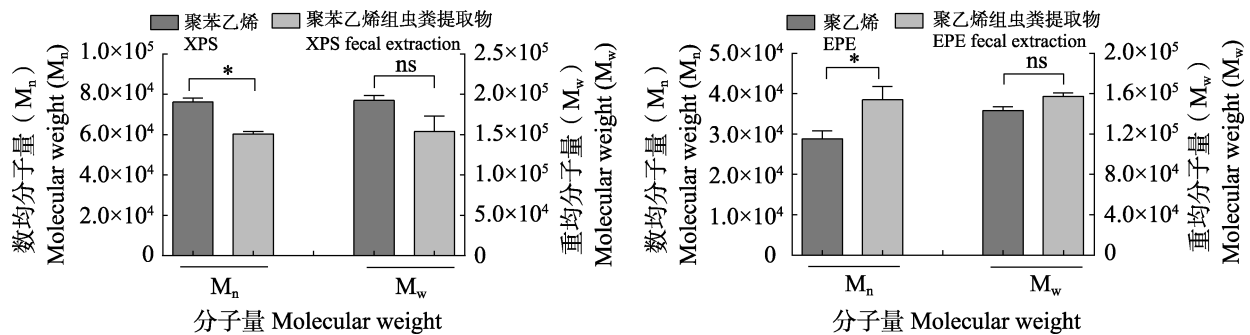


图 6 虫粪提取物分子量变化

Fig. 6 Molecular weight changes of fecal extraction from the plastic groups

图中数据为平均值 ± 标准差。*表示差异显著 ($P < 0.05$, Student's t -test), ns 表示无显著性差异。

Data are mean ± SD. * indicates significant differences at 0.05 level by Student's t -test. ns indicates no significant difference.

2.3 取食不同食料后大麦虫肠道微生物的变化

2.3.1 大麦虫幼虫肠道细菌多样性分析 对取食不同食料后大麦虫肠道微生物进行高通量测序后, 我们发现麦麸组有 272 个 OTUs, XPS 组有 592 个 OTUs, EPE 组有 170 个 OTUs。在 OTU 水平采用主坐标分析 (Principal co-ordinates analysis, PCoA) 的方法对不同处理肠道微生物菌群结构进行 Beta 多样性分析, 发现与麦麸组相比, XPS 组内 Bray-Curtis 距离缩小, 取食 XPS 诱导幼虫肠道微生物发生了特定变化 (图 7)。而取食 EPE 后, 其组内 Bray-Curtis 距离与麦麸

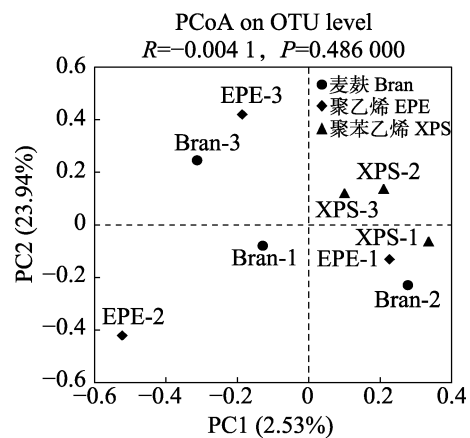


图 7 基于 Bray-Curtis 距离的 PCoA 分析

Fig. 7 Bray-Curtis PCoA plot

组相比则增大, 取食 EPE 没有引起幼虫肠道微生物发生特定变化 (图 7)。

将相对丰度小于 0.01% 的属合并为 Others。麦麸组、XPS 组、EPE 组菌群在属水平上的组成如图 8-图 10 所示。取食麦麸、XPS 和 EPE 的大麦虫肠道微生物属数目分别为 16、16 和 15 个, 肠道菌群属数目相似, 且优势属基本相同。相比麦麸组, XPS 组中, *Romboutsia*、*Enterococcus*、*Pseudomonas*、*Bacillus* 和 *Sebaldella* 属相对丰度上升, Others 也上升, 说明相对丰度较低的物种多样性增加。相比麦麸组, EPE 组中 *Enterobacteriaceae* 科未知属, *Romboutsia*、*Spiroplasma*、*Bacillus* 和 *Clostridium* 属相对丰度上升。

2.3.2 肠道菌群功能预测 利用 PICRUST 对 16S rRNA 基因进行功能预测, 功能通路中含有 23 个与芳香烃和烷烃降解相关的基因。麦麸组、XPS 组和 EPE 组均筛选到 23 个基因, 通路丰度热图如图 11 所示。热图中数值为表达量, 数值越大表明相关通路表达量越高。XPS 组与麦麸组

相比, 肠道中有 21 个与芳香烃和烷烃降解相关通路的丰度升高, 表明该处理中芳香烃和烷烃降解基因携带菌得到富集。EPE 组与麦麸组相比, 肠道中仅有 3 个与芳香烃和烷烃降解相关通路丰度升高, 其余均降低, 说明取食聚乙烯后, 肠道中芳香烃与烷烃降解基因携带菌没有被富集。

3 讨论

大麦虫幼虫取食聚苯乙烯后, 可以长时间保持较高的存活率与化蛹率, 且体重增加显著 (Yang et al., 2019; Peng et al., 2020)。黄粉虫幼虫在取食塑料后也能存活并保持一定的化蛹率 (徐诗杰和张雅林, 2018)。而本研究结果表明仅取食聚苯乙烯和聚乙烯塑料并不能维持大麦虫幼虫正常的生长发育, 其体重也没有显著增加, 这一发现与殷涛等 (2018) 的研究结果一致。通过分析, 我们推测大麦虫幼虫取食塑料后不能长时间存活和化蛹可能与大麦虫幼虫的体型有关。相较于黄粉虫等的幼虫, 大麦虫幼虫体型较

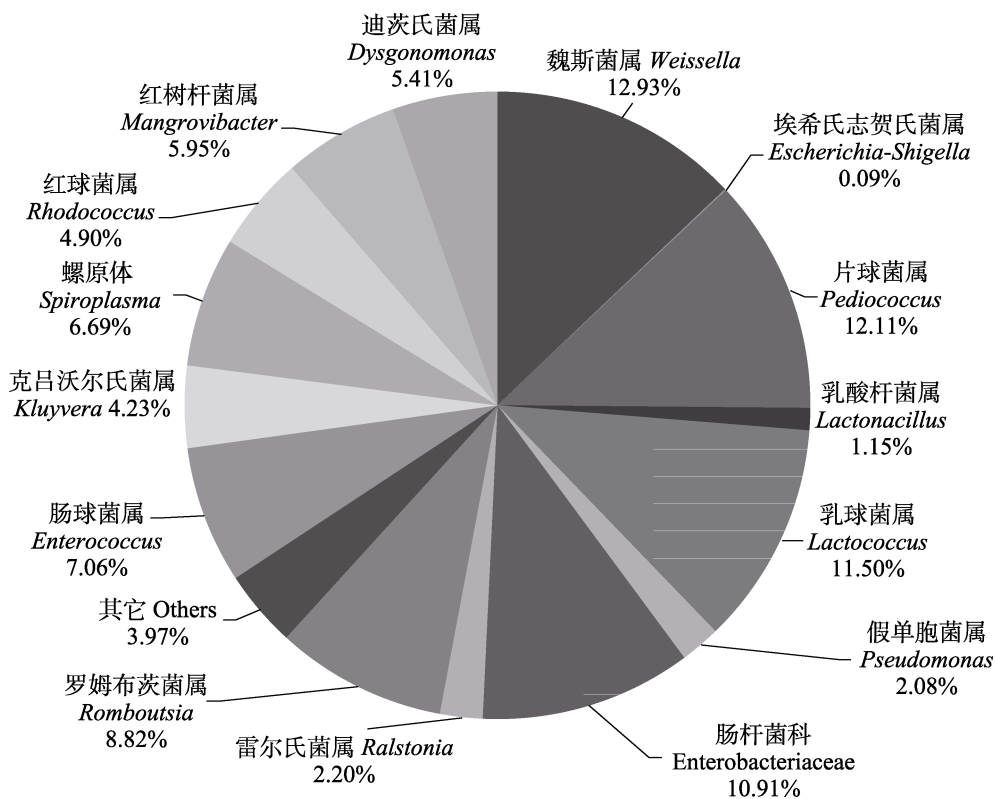


图 8 Bran 组属水平上的群落分析样图

Fig. 8 Community analysis pieplot on genus level of the Bran group

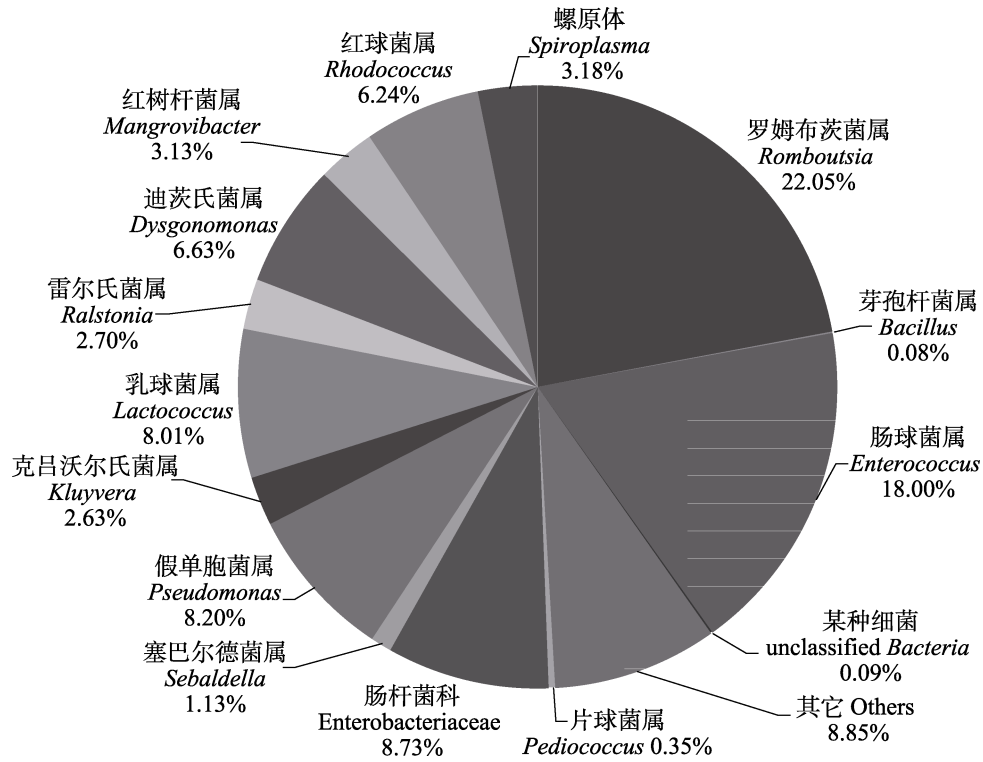


图 9 XPS 组属水平上的群落分析样图

Fig. 9 Community analysis pieplot on genus level of the XPS group

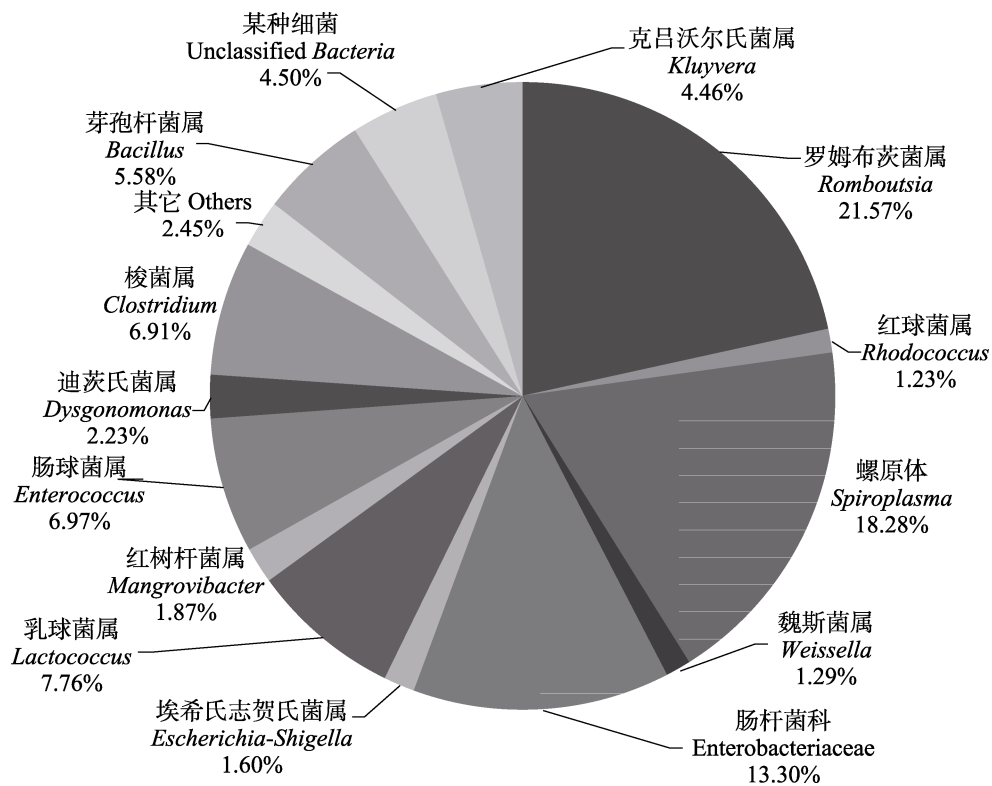


图 10 EPE 组属水平上的群落分析样图

Fig. 10 Community analysis pieplot on genus level of the EPE group

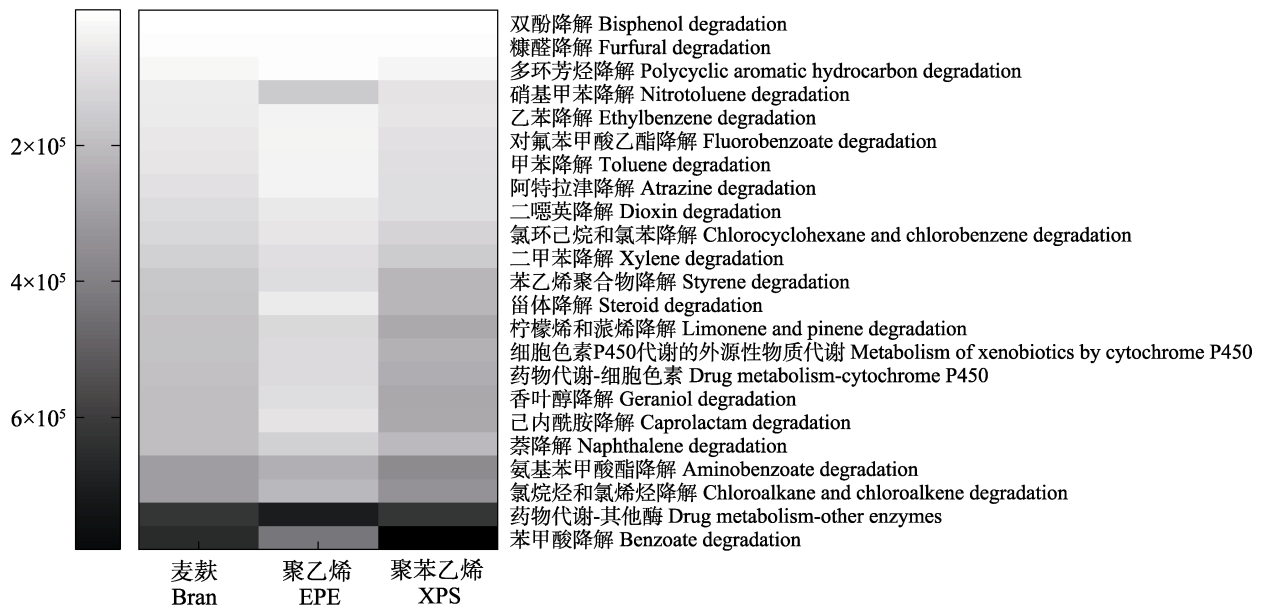


图 11 基于 KEGG 数据库与芳香烃和烷烃降解相关的基因预测热图

Fig. 11 The prediction heatmap of genes related to aromatic compounds and alkane degradation based on KEGG pathway

大, 生长发育所需营养也较多, 只取食塑料无法为生长发育提供足够的营养(王孝妮, 2012)。此外, 大麦虫幼虫的生长还与食料的含水量密切相关。在缺水状态下大麦虫不能存活(王孝妮, 2012), 而塑料中几乎不含水, 这也是造成大麦虫幼虫取食塑料后不能长时间存活的一个重要因素。

Peng 等(2020)的研究表明, 塑料中添加麦麸有利于大麦虫的生长发育及对塑料的取食。本研究发现添加麦麸后, 大麦虫幼虫存活率及虫重均有显著提高, 但是塑料重量损失显著降低, 这一现象与 Peng 等(2020)的研究结果不一致。我们推测塑料与麦麸的配比是影响大麦虫幼虫塑料取食量变化的关键因素。Peng 等(2020)的研究中, 麦麸所占的初始比例较低(塑料麦麸比为 9:1), 且后期添加的麦麸也较少, 而本研究中麦麸所占比例较高(塑料麦麸比为 1:1), 且定期添加的麦麸也偏多。由此我们推测在塑料中添加少量麦麸将有助于大麦虫幼虫取食塑料, 但麦麸添加量过大反而会抑制大麦虫幼虫对塑料的取食。除了麦麸与塑料的配比, 麦麸与塑料的混合方式也可能会影响大麦虫幼虫对塑料的取食量。张可等(2017)研究发现黄粉虫幼虫对

含淀粉的塑料薄膜的取食量大于不含淀粉的薄膜, 这表明将塑料与麦麸整合为一体, 可能更有利于提高大麦虫幼虫对塑料的取食量。

根据大麦虫幼虫取食聚苯乙烯和聚乙烯后虫粪提取物分子量的变化, 大麦虫幼虫对这 2 种塑料的降解方式是不同的。取食聚苯乙烯后, 大麦虫幼虫的虫粪提取物中高分子量成分含量下降。而取食聚乙烯后, 对应的虫粪提取物中高分子量成分含量是上升的。这一现象与聚苯乙烯和聚乙烯的结构相关。对于聚烯烃, 其分子量越高, 物质结晶度、拉伸强度、断裂拉伸率等参数越大, 机械性能越好, 越不容易被降解(徐伟强和郑昌仁, 1992)。聚乙烯结构简单、对称性好, 是结晶性高聚物, 较稳定(Ray and Cooney, 2018), 其高分子物质较难降解, 而低分子物质则相对易降解。在经过大麦虫幼虫肠道消化后, 聚乙烯中低分子量物质被降解, 留下分子量较高难降解的物质, 导致虫粪提取物分子量上升(Kundu *et al.*, 2014; Lou *et al.*, 2020)。而聚苯乙烯的侧链含有苯环, 对称性较差, 是非晶高聚物, 稳定性稍差, 高分子物质相对容易发生断链反应(刘凤岐和汤心颐, 2004)。聚苯乙烯中的高分子量物质

在大麦虫幼虫肠道中发生断链后被排出体外,从而导致虫粪提取物分子量下降 (Yang *et al.*, 2015; Brandon *et al.*, 2018)。

昆虫降解塑料的能力与其肠道微生物密切相关 (Calderón-Pérez *et al.*, 2021)。使用抗生素抑制肠道微生物后,昆虫对塑料的降解能力也被抑制 (Yang *et al.*, 2015b; Yang *et al.*, 2019)。昆虫在取食可降解塑料后,其肠道微生物可通过富集塑料降解菌等方式对饲喂塑料产生响应,这种现象有利于我们从中筛选出可降解塑料的细菌 (杨宇, 2015; Wang *et al.*, 2020)。本研究通过饲喂聚苯乙烯,我们发现大麦虫幼虫肠道中 *Bacillus* 属、*Enterococcus* 属及 *Pseudomonas* 属细菌的相对丰度均有升高。目前,相关学者已多次从这些属中筛选到塑料降解菌 (Yang *et al.*, 2014; 孔芳等, 2018; Kim *et al.*, 2020; 杨莉等, 2020)。此外,通过 PICRUST 基因功能预测发现,取食聚苯乙烯后大麦虫幼虫肠道中芳香烃和烷烃降解基因携带菌得到富集。因此,我们推测大麦虫幼虫肠道微生物对聚苯乙烯的摄入是有响应的,这也从侧面证实大麦虫幼虫可以降解聚苯乙烯。大麦虫幼虫取食聚乙烯后,其肠道微生物相对丰度上升的属中,仅有 2 个属曾筛选到可降解塑料的细菌 (陈冠舟等, 2017), 且芳香烃和烷烃降解相关通路的丰度也较低,因此我们认为大麦虫幼虫肠道微生物对聚乙烯的摄入没有明显响应。

在经过大麦虫幼虫肠道消化后,聚苯乙烯发生了重量减少及分子量变低等变化。此外,大麦虫幼虫肠道微生物也会对聚苯乙烯的摄入产生响应,使肠道环境更利于聚苯乙烯的降解。这些现象均表明大麦虫幼虫对聚苯乙烯是有降解能力的。而聚乙烯经过大麦虫幼虫肠道后的变化及摄入后大麦虫幼虫肠道微生物的弱响应表明大麦虫幼虫对聚乙烯的降解能力较弱。虽然大麦虫幼虫可以降解聚苯乙烯,但并不能从中摄取到足够的营养和水分,大麦虫幼虫在取食聚苯乙烯的同时,还需要摄入一定量的麦麸才能完成正常的生长发育。未来建议对麦麸的添加量和添加形式

以及塑料的含水量等方面开展研究,在维持大麦虫幼虫正常的生长发育的同时,提高对塑料的取食量。

参考文献 (References)

- Albertsson AC, Andersson SO, Karlsson S, 1987. The mechanism of biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 18(1): 73–87.
- Amobonye A, Bhagwat P, Singh S, Pillai S, 2021. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*, 759: 143536.
- Brandon AM, Gao SH, Tian R, Ning D, Yang SS, Zhou J, Wu WM, Criddle CS, 2018. Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *Environmental Science & Technology*, 52(11): 6526–6533.
- Calderón-Pérez L, Llauredó E, Companys J, Pla-Pagà L, Pedret A, Rubió L, Gosalbes MJ, Yuste S, Solà R, Valls RM, 2021. Interplay between dietary phenolic compound intake and the human gut microbiome in hypertension: A cross-sectional study. *Food Chemistry*, 344: 128567.
- Chen CG, 2005. The discovery of organic plastics digestible by mealworms. *Science in 24 Hours*, (2): 25. [陈重光, 2005. 黄粉虫可消化有机塑料的发现. 科学 24 小时, (2): 25.]
- Chen GZ, Zhang BL, Ji MM, Wu XG, Zhou JY, Chen JN, Wang Y, Tian H, Zhang XJ, 2017. Gut microbiota of polystyrene-eating mealworms analyzed by high-throughput sequencing. *Microbiology China*, 44(9): 2011–2018. [陈冠舟, 张白鹭, 纪梦梦, 吴晓刚, 周君仪, 陈家楠, 王芸, 田浩, 张晓君, 2017. 高通量测序探究嗜食聚苯乙烯泡沫塑料黄粉虫的肠道菌群结构. 微生物学通报, 44(9): 2011–2018.]
- Dube MA, Salehpour S, 2014. Applying the principles of green chemistry to polymer production technology. *Macromolecular Reaction Engineering*, 8(1): 7–28.
- European Parliament, 2018. Plastic waste and recycling in the EU: Facts and figures. Strasbourg: European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>.
- Feil A, Pretz T, 2020. Plastic Waste and Recycling, Massachusetts: Academic Press. 283–319.
- Guillet JE, Regulski TW, Mcanene TB, 1974. Biodegradability of photodegraded polymers II. Tracer studies of biooxidation of

- ecolyte PS polystyrene. *Environmental Science & Technology*, 8(10): 923–925.
- Kim HR, Lee HM, Yu HC, Jeon E, Lee S, Li J, Kim DH, 2020. Biodegradation of polystyrene by pseudomonas sp. Isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental Science & Technology*, 54(11): 6987–6996.
- Kong F, Hong KJ, Xu H, Zhao SG, Wang Y, 2018. Evidence of polystyrene biodegradation by gut microbiota of styrofoam feeding yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus). *Microbiology China*, 45(7): 1438–1449. [孔芳, 洪康进, 徐航, 赵世光, 王幼, 2018. 基于嗜食泡沫塑料黄粉虫肠道菌群中聚苯乙烯生物降解的探究. *微生物学通报*, 45(7): 1438–1449.]
- Kundu D, Hazra C, Chatterjee A, Chaudhari A, Mishra S, 2014. Biopolymer and biosurfactant-graft-calcium sulfate/polystyrene nanocomposites: Thermophysical, mechanical and biodegradation studies. *Polymer Degradation and Stability*, 107: 37–52.
- Kundungal H, Gangarapu M, Sarangapani S, Patchaiyappan A, Devipriya SP, 2019. Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18): 18509–18519.
- Liu FQ, Tang XY, 2004. *Polymer Physics*. Second edition. Beijing: Higher Education Press. 354–359. [刘凤岐, 汤心颐, 2004. 高分子物理. 第2版. 北京: 高等教育出版社. 354–359.]
- Lou Y, Ekaterina P, Yang SS, Lu B, Liu B, Ren N, Corvini PFX, Xing D, 2020. Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. *Environmental Science & Technology*, 54(5): 2821–2831.
- Miao SJ, Zhang YL, 2010. Feeding and degradation effect on plastic of *Zophobas morio*. *Journal of Environmental Entomology*, 32(4): 435–444. [苗少娟, 张雅林, 2010. 大麦虫 *Zophobas morio* 对塑料的取食和降解作用研究. *环境昆虫学报*, 32(4): 435–444.]
- Mülhaupt R, 2013. Green polymer chemistry and bio-based plastics: Dreams and reality. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 214(2): 159–174.
- Nielsen TD, Hasselbalch J, Holmberg K, Stripple J, 2020. Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 9(1): e360.1–e360.18
- Peng BY, Li Y, Fan R, Chen Z, Chen J, Brandon AM, Criddle CS, Zhang Y, Wu WM, 2020. Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad and limited extent depolymerization. *Environmental Pollution*, 266(Pt 1): 115206.
- PlasticsEurope, 2020. *Plastics-the facts 2020: An analysis of European plastics production, demand waste data*. Brussels: PlasticsEurope. https://www.plasticseurope.org/download_file/force/2367/181.
- Raddadi N, Fava F, 2019. Biodegradation of oil-based plastics in the environment: Existing knowledge and needs of research and innovation. *Science of the Total Environment*, 679: 148–158.
- Ray S, Cooney RP, 2018. Chapter 9-Thermal Degradation of Polymer and Polymer Composites. Oxford: William Andrew Publishing. 213–242.
- Razavi A, 2000. Metallocene catalysts technology and environment. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIC - Chemistry*, 3(7): 615–625.
- Stürzel M, Mihan S, MüLhaupt R, 2016. From multisite polymerization catalysis to sustainable materials and all-polyolefin composites. *Chemical Reviews*, 116(3): 1398–1433.
- Verma R, Vinoda KS, Papireddy M, Gowda ANS, 2016. Toxic pollutants from plastic waste-a review. *Procedia Environmental Sciences*, 35: 701–708.
- Wang XN, 2012. Study on biological characteristics of *Zophobas atratus* Fab and its conditions of artificial feeding. Master dissertation. Ya'an: Sichuan Agricultural University. [王孝妮, 2012. 大麦虫生物学及人工饲养条件研究. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学.]
- Wang Z, Xin X, Shi XF, Zhang YL, 2020. A polystyrene-degrading *Acinetobacter* bacterium isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. *Science of the Total Environment*, 726: 138564.
- Xu WQ, Zheng CR, 1992. The effect of molecular weight and molecular weight distribution on the physical and mechanical properties of polyolefine. *Modern Plastics Processing and Applications*, (1): 54–59. [徐伟强, 郑昌仁, 1992. 聚烯烃分子量及分子量分布对其物理机械性能的影响. *现代塑料加工应用*, (1): 54–59]
- Xu SJ, Zhang YL, 2018. Life characteristics of plastic eating *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Northwest A&F University*, 46(7): 102–108. [许诗杰, 张雅林, 2018. 取食塑料的黄粉虫生命特征研究. *西北农林科技大学学报*, 46(7): 102–108.]

- Yang J, Yang Y, Wu WM, Zhao J, Jiang L, 2014. Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms. *Environmental Science & Technology*, 48(23): 13776–13784
- Yang L, Liu Y, Gao J, Peng XW, Bai ZH, Zhuang XL, 2020. Biodegradation of expanded polystyrene foams in *Zophobas morio*: Effects of gut microbiota. *Environmental Science*, 41(12): 5609–5610. [杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮, 2020. 大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解. 环境科学, 41(12): 5609–5610.]
- Yang SS, Brandon AM, Flanagan JCA, Yang J, Ning D, Cai SY, Fan HQ, Wang ZY, Ren J, Benbow E, Ren N, Waymouth RM, Zhou J, Criddle CS, Wu WM, 2018. Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 191: 979–989.
- Yang Y, 2015. Biodegradation and mineralization of petroleum-based plastics by plastic-chewing insect larvae and their gut bacteria. Doctor dissertation. Beijing: Beihang University. [杨宇, 2015. 啃食塑料昆虫幼虫及其肠道细菌完全生物降解石油基塑料的研究. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学.]
- Yang Y, Wang J, Xia M, 2019. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*. *Science of the Total Environment*, 708: 135233.
- Yang Y, Yang J, Wu WM, Zhao J, Song Y, Gao L, Yang R, Jiang L, 2015a. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. Chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science & Technology*, 49(20): 12080–12086.
- Yang Y, Yang J, Wu WM, Zhao J, Song Y, Gao L, Yang R, Jiang L, 2015b. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 2. Role of gut microorganisms. *Science of the Total Environment*, 49(20): 12087–12093.
- Yin T, Zhou X, Wang YB, Huang FQ, 2018. Effects of plastic foam feeding on the growth of *Tenebrio molitor* L. and *Zophobas morio* Fabricius. *Journal of Gansu Agricultural University*, 53(2): 74–79. [殷涛, 周祥, 王艳斌, 黄方巧, 2018. 泡沫塑料的取食对黄粉虫和大麦虫生长的影响. 甘肃农业大学学报, 53(2): 74–79.]
- Zhang K, Hu RQ, Cai MM, Zheng LY, Yu ZN, Zhang JB, 2017. Degradation of plastic film containing polyethylene (PE) by yellow meal worms. *Chemistry & Bioengineering*, 34(4): 47–49. [张可, 胡芮琦, 蔡珉敏, 郑龙玉, 喻子牛, 张吉斌, 2017. 黄粉虫取食和消化降解 PE 塑料薄膜的研究. 化学与生物工程, 34(4): 47–49.]