

大蜡螟生物降解聚乙烯塑料 研究进展及展望

乔小燕^{1,2}, 王 斌^{2*}, 孙九胜², 孙 晨², 崔 磊², 槐国龙², 陈波浪¹

¹新疆农业大学资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年4月9日; 录用日期: 2022年5月6日; 发布日期: 2022年5月17日

摘 要

聚乙烯塑料在我们的生活生产中具有至关重要的作用, 如农用地膜及包装材料等, 然而由于聚乙烯在自然条件下极难降解, 废弃的聚乙烯塑料给环境带来严重的“白色污染”。废弃聚乙烯塑料污染治理一直是学者们普遍关注的问题, 常用的填埋、焚烧等处理措施又给环境造成二次污染, 回收利用处理成本较高, 生物降解措施是“白色污染”治理的有效途径。近些年一些研究发现, 大蜡螟体内有能够降解聚乙烯的微生物菌株, 这为废弃聚乙烯塑料生物降解找到一个新的突破口。本文综述了大蜡螟生物降解聚乙烯塑料的研究进展, 旨在为实现大蜡螟生物降解废弃聚乙烯塑料提供理论及实践参考依据。

关键词

大蜡螟, 生物降解, 聚乙烯塑料, 白色污染

Research Progress and Prospect on the Biodegradation of Polyethylene Plastic by *Galleria mellonella*

Xiaoyan Qiao^{1,2}, Bin Wang^{2*}, Jiusheng Sun², Chen Sun², Lei Cui², Guolong Huai²,
Bolang Chen¹

¹College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

²Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 9th, 2022; accepted: May 6th, 2022; published: May 17th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 乔小燕, 王斌, 孙九胜, 孙晨, 崔磊, 槐国龙, 陈波浪. 大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究进展及展望[J]. 农业科学, 2022, 12(5): 333-339. DOI: 10.12677/hjas.2022.125050

Abstract

The polyethylene plastic plays a vital role in our life and production, such as agricultural plastic film and packaging materials. However, because polyethylene is very difficult to degrade under natural conditions, waste polyethylene plastic brings serious “white pollution” to the environment. The pollution control of waste polyethylene plastic has been a common concern of scholars. Common treatment measures such as landfill and incineration cause secondary pollution to the environment, and the cost of recycling is high. Biodegradation is an effective way to treat “white pollution”. In recent years, some studies have found that there are microbial strains capable of degrading polyethylene in the body of *Galleria mellonella*, which finds a new breakthrough for the biodegradation of polyethylene plastic. This paper reviews the research progress on the biodegradation of polyethylene plastic by *Galleria mellonella*, aiming to provide theoretical and practical basis for realizing the biodegradation of polyethylene plastic by *Galleria mellonella*.

Keywords

Galleria mellonella, Biodegradation, Polyethylene Plastic, White Pollution

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

废弃聚乙烯塑料污染治理是世界性难题，尤其是农田残膜污染[1] [2] [3] [4] [5]。残膜长期残留土壤会对农田土壤理化性质及作物生长产生诸多不良影响[6] [7] [8] [9] [10]，造成农田土壤环境污染。此外，随着经济的发展，用于包装材料的聚乙烯塑料量也逐年增加，不当的废弃聚乙烯塑料处理方式不仅造成人居环境污染，也对农田土壤环境的保护构成巨大威胁。

针对当下废弃聚乙烯塑料污染严重的实际情况，找到科学实用的方法处理废弃聚乙烯塑料是重中之重，目前国内外主要的聚乙烯塑料处理方式是回收利用，其次还有焚烧、填埋等。在国外，尤其发达国家，聚乙烯塑料污染已引起了从国民到政府、从生产商到学术届的广泛关注，在废旧塑料的回收利用上起步较早，且投入了大量的人力、物力进行研究，取得了多方面进展。而我国塑料回收利用起步较晚，在技术、规模、回收率以及经营管理等各个方面，与国外相比均比较落后[11]。但随着时间的久远，以上传统的处理聚乙烯塑料方式显现各种弊端，回收利用成本高昂，焚烧及填埋造成环境二次污染等。

因此，研究者们近些年将精力集中在聚乙烯塑料的生物降解，但目前还处于初级阶段，要达到较好的效果，还需探索生物降解聚乙烯塑料的方法和原理，寻找更多的高效降解菌和适合的降解条件[12] [13]。2017年西班牙生物学家 Federica Bertocchini 以及英国生物化学家 Paolo Bombelli 和 Christopher J. Howe 研究发现，一种叫做“大蜡螟(*Galleria mellonella*)”的昆虫能将塑料完全消化并降解，与细菌和真菌降解塑料相比，其降解速率显著提高[14]。刘淑琴以大蜡螟、黄粉虫和大麦虫为试验昆虫，对比分析对聚乙烯地膜、聚乙烯塑料袋和聚苯乙烯泡沫 3 种塑料制品的生物降解，比较 3 种昆虫取食降解 3 种塑料的能力，结果表明大蜡螟取食塑料的能力优于黄粉虫和大麦虫[15]。相关学者研究进一步指出，大蜡螟生物降解聚乙烯塑料的原因是其肠道具有降解聚乙烯塑料的微生物菌株[16] [17] [18] [19] [20]。这些研究成果为废弃聚乙烯

烯塑料污染问题的解决找到了一个新的突破口,开展大蜡螟生物降解聚乙烯塑料的相关研究,对于生态保护具有十分重要的意义。本文对大蜡螟生物学特性和大蜡螟生物降解聚乙烯塑料国内外研究现状进行了综述,并结合目前相关研究的热点和国家对于废弃聚乙烯塑料处理及生态环境保护的需求,对大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究领域进行展望,旨在为大蜡螟生物降解废弃聚乙烯塑料的研究与应用提供参考依据。

2. 大蜡螟生物学特性

大蜡螟(*Galleria mellonella*)属鳞翅目(*Lepidoptera*)、螟蛾科(*Pyralidae*)、蜡螟亚科(*Galleriinae*)、蜡螟属(*Galleria*)的完全变态昆虫,生长周期分卵、幼虫、蛹、成虫四个阶段[21]。大蜡螟是养蜂业的主要害虫之一[22][23],但其在医学、药学、生理学、农学等学科领域发挥着不可替代的作用[24][25][26][27]。大蜡螟卵期为8~23天[28],正常卵单层紧密粘连成片,呈扁平的不规则六边形或短椭圆形,卵初产时表面光滑,乳白色或粉红色,以后渐黄变褐[15]。幼虫共8龄,也有7龄化蛹的现象,历期为28~58天,2~4龄幼虫体多呈乳白色,头壳与前胸背板浅棕色,4龄后为棕褐色或棕红色。老熟幼虫吐丝作茧进入蛹期,茧为白色丝织物,厚实结实,两端丝织疏松,呈长椭圆形,长14~23mm,宽5~7.5mm,历期6~55天。成虫雌蛾翅展27~32mm,头小,下唇须长,明显前伸,头胸部背面毛色褐色,腹部银灰色,前翅呈长方形,外缘较平直,翅面平滑,灰黑色。雄蛾翅展24~26mm,头胸部背面毛色灰白,复眼银灰色,下唇须上翘在头前,盘成半圆状,前翅面不平滑,颜色不均一。雌蛾个体较雄蛾大,在自然条件下,雌蛾历期7~9天,体长18~22mm,重达 123 ± 2 mg,羽化后1~3小时开始交尾,交尾4~5小时后产卵,平均产卵量 725 ± 149 粒。雄蛾历期12~24天,体长14~16mm,体重 74 ± 7 mg[28][29][30][31][32]。

了解并掌握大蜡螟生物学特性,可对大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究中大蜡螟的饲养提供技术依据,也对大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究的观察、记录、分析等提供参照对比依据。

3. 大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究现状

3.1. 大蜡螟室内饲养技术研究

工厂化大规模生产大蜡螟费工费时、不适宜实验室用大蜡螟批量生产,相关人员开始研究大蜡螟室内人工饲养繁殖技术[33][34][35],探索易于实验室周年、批量繁殖大蜡螟的方法,以便对其更好的开发和应用。目前,大蜡螟人工饲养繁殖的相关温度、湿度、光照条件已经基本确定[35][36],而从取材、价格等方面考虑,为找到理想又经济实用的饲料配方,研究人员对大蜡螟的人工饲料配方也开展了较多研究[37][38][39]。此外,大蜡螟交配率高、繁殖速率快、产卵量多,张俊俊等人介绍了三种能够在实验室内快速检测大蜡螟虫卵数量的方法,分别为:直接计数法、Motic面积计数法和PS像素计数法[40]。杨爽等人对大蜡螟蛹及成虫雌雄的鉴别方法进行了详细的研究[41]。以上研究为大蜡螟生物降解聚乙烯塑料试验研究的虫源饲养提供参考依据。

3.2. 大蜡螟生物降解聚乙烯塑料研究

近几年,大蜡螟幼虫所具有降解塑料的功能得到进一步证实[42][43][44][45][46]。目前有关大蜡螟降解塑料的研究主要有:对大蜡螟肠道中能够降解聚乙烯塑料的菌株提取及降解性能等的验证,大蜡螟直接取食聚乙烯塑料对其生长的影响研究及其代谢产物的检测、监测及分析等研究。

1) 降解聚乙烯菌株的提取验证

Yang等从其肠道中分离出2株细菌菌株,并证明其在实验室环境中能够生长和分解聚乙烯塑料[42]。胡亚楠等人从新疆蜜蜂蜂巢中的土著大蜡螟肠道分离获得的聚乙烯降解菌菌株最多,其聚乙烯的降解效

率高于其他来源的分离菌株,从中筛选出具有较高降解能力的3个菌株它们能利用PE膜片生长,证明了新疆蜜蜂蜂巢中的土著大蜡螟肠道存在对PE具有较高降解能力的菌株[43]。Zhang等把大蜡螟的肠道研磨后,从中分离出一株可以将高密度聚乙烯降解的真菌(*Aspergillus flavus* PEDX3),该菌在28 d后,对高密度聚乙烯的降解失重率为 $3.9025\% \pm 1.18\%$ [18]。Bombelli将大蜡螟幼虫研磨成匀浆涂抹于聚乙烯薄膜上,然后通过对聚乙烯薄膜进行重量分析、高效液相色谱仪-质谱联动技术分析、傅里叶变换红外光谱仪分析和原子力显微镜分析,最后得出大蜡螟幼虫可对聚乙烯塑料进行降解[14]。Saikia用16s-rDNA测序法揭示了大蜡螟肠道的9中细菌可降解多环芳烃、低密度聚乙烯等[44]。Asal用16s-rRNA基因高通量测序法证明了大蜡螟肠道微生物菌群对聚乙烯、聚苯乙烯等的降解[45]。刘亚飞和毛敏敏二人也对大蜡螟幼虫肠道中与降解聚乙烯有关的微生物进行了筛选、分离、纯化与鉴定,均证明大蜡螟肠道中有能够降解聚乙烯的微生物菌株,且这些菌株之间有协同作用使得降解聚乙烯的效果更佳[17] [20],但对筛选的菌株降解聚乙烯的机理仍无实质性发现。

2) 取食聚乙烯塑料对大蜡螟生长的影响研究

唐瑞等人对取食聚乙烯微塑料对大蜡螟生长发育的影响进行了研究,得出相较于正常饲喂的大蜡螟幼虫,取食塑料薄膜的大蜡螟幼虫发育历期延长、蛹重下降,10%的塑料比例与饲料混合饲喂时,大蜡螟能够最大程度降解塑料,同时又可保证自身正常生长发育繁殖,而其体内受到的其他生理影响以及具体塑料降解率还需进一步试验研究[46]。大蜡螟幼虫之所以能够进行塑料的生物降解,这可能与其本身的生态学特性有关,它们长期以蜂蜡为食,而蜂蜡是由高度多样化的脂质化合物混合组成,最常见的键是 $\text{CH}_2\text{-CH}_2$,其化学结构与PE高度相似[47]。

3) 大蜡螟代谢产物的检测、监测及分析研究

除以上研究外,对大蜡螟代谢产物的研究也可证明大蜡螟降解聚乙烯膜的能力。如:Ekaterina在大蜡螟降解塑料及其肠道微生物组研究中通过试验对大蜡螟粪便进行热重量分析(TGA)、红外光谱分析(FTIR)和凝胶渗透色谱分析(GPC)得出:大蜡螟幼虫取食泡沫塑料后的虫粪的产物中塑料组分显著小于塑料的本身,证实了幼虫降解塑料的能力;通过红外光谱检测结果,表明昆虫取食塑料后的虫粪物质中出现了含氧官能团的特征峰,证明了塑料在幼虫肠道中发生了有氧降解过程,再次证明了幼虫降解塑料的能力;通过凝胶渗透色谱测定,推测出幼虫肠道消化系统具有降解塑料的功能[16],但取食聚乙烯塑料后大蜡螟代谢产物具体成分还有待明确。刘亚飞用添加不同聚乙烯粉末的人工饲料饲喂大蜡螟20 d后,将大蜡螟粪便在体视显微镜下观察,镜检结果表明,大蜡螟幼虫的粪便中含有聚乙烯颗粒[17]。Agnès采用同位素标记和红外显微镜检的光谱组织学方法,在幼虫组织未检测到生物同化现象,但在大蜡螟幼虫消化道腔内及粪便中发现微米级PE颗粒,证明大蜡螟可以降解聚乙烯塑料,但不一定能完全代谢[19],具体代谢产物尚待进一步研究。

4. 总结及展望

4.1. 总结

探索有效的途径解决废弃聚乙烯塑料污染问题已成为生产和环境保护的当务之急,生物降解策略可能成为减少“白色污染”的有效途径之一。基于对大蜡螟养殖技术、生物降解聚乙烯塑料的研究基础,实现大蜡螟生物降解废弃聚乙烯塑料具有很大的潜能,可达到资源再利用的价值,也为塑料“白色污染”这一世界性难题提供新的解决途径。但目前针对大蜡螟降解聚乙烯塑料的研究侧重于其肠道微生物对聚乙烯的降解(细菌培养法),且仅停留在少量实验研究,并无实际性大规模推广应用。对大蜡螟直接取食降解聚乙烯塑料研究较少,尤其大蜡螟生物降解聚乙烯塑料对其生长、繁殖、产物分析等研究尚少。

4.2. 展望

根据现有研究进展及欠缺, 建议今后对以下两个方面更多关注及研究:

1) 大蜡螟肠道降解聚乙烯塑料研究

加强对大蜡螟生物降解聚乙烯塑料的降解机制、过程、影响因素等的理论研究, 大蜡螟幼虫肠道菌群是残膜生物降解的关键, 因此需要进行更多的研究来复制肠道降解菌的生物降解过程, 优化生物降解条件, 提高降解效率; 对大蜡螟肠道中具有降解聚乙烯塑料能力的微生物还需开展更多挖掘研究, 同时针对混合菌株对残膜的降解机理进行探索, 以提高废弃聚乙烯塑料微生物降解效率; 开展实际应用过程的降解研究, 探索实际应用条件下微生物的存活问题。

2) 大蜡螟取食并生物降解聚乙烯塑料研究

对大蜡螟直接取食并降解废弃聚乙烯塑料还需进行深入系统的研究, 如对大蜡螟生长、繁殖的影响及代谢产物组分的确定等, 并进行试验示范, 为工厂化应用大蜡螟降解废弃聚乙烯塑料提供研究基础。

基金项目

自治区重点研发计划项目(2018B01006-1, 2021B02003-1)。

参考文献

- [1] 胡灿, 王旭峰, 陈学庚, 汤修映, 赵岩, 严昌荣. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 223-234.
- [2] 王海基, 王敏, 王吉亮, 卢勇涛, 营雨琨, 何玉泽. 新疆农田残膜污染治理技术与防控策略[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 166-174.
- [3] 马蕾, 吕金良. 我国农用地膜使用现状及回收机制研究[J]. 农业科技通讯, 2019(11): 19-23.
- [4] 热米兰·乌斯曼. 农业地膜污染现状及防治途径[J]. 农家参谋, 2021(19): 25-26.
- [5] 雍婕, 程益, 周海燕. 地膜降解途径及机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 729-736.
- [6] 张雨蒙, 申丽霞. 农田土壤残膜的污染现状及应对措施[J]. 天津农业科学, 2018, 24(2): 86-90.
- [7] 马彦, 杨虎德. 甘肃省农田地膜污染及防控措施调查[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 478-483.
- [8] Romic, D., Romic, M., Borosic, J. and Poljak, M. (2003) Mulching Decreases Nitrate Leaching in Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Cultivation. *Agricultural Water Management*, **60**, 87-97. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00168-3)
- [9] 邹小阳, 牛文全, 刘晶晶, 李元, 张明智, 段晓辉. 残膜对土壤和作物的潜在风险研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 47-54.
- [10] 王亮, 林涛, 严昌荣, 何文清, 王静, 汤秋香. 不同残膜量和灌溉定额对棉花养分和水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 122-133.
- [11] 李蔓. 聚乙烯塑料生产和废聚乙烯塑料资源化技术生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. and Oda, K. (2016) Response to Comment on "A Bacterium That Degrades and Assimilates Poly (Ethylene Terephthalate)". *Science*, **353**, 759. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8625>
- [13] Yang, Y., Yang, J., Wu, W.M., Zhao, J., Song, Y.L., Gao, L.C., Yang, R.F. and Jiang, L. (2015) Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *Environmental Science and Technology*, **49**, 12087-12093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>
- [14] Bombelli, P., Bertocchini, F. and Howe, C.J. (2017) Polyethylene Biodegradation by Caterpillars of the Wax Moth *Galleria mellonella*. *Current Biology*, **27**, 292-293. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>
- [15] 刘淑琴. 大蜡螟人工饲料优化及资源利用的研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- [16] Ekaterina, P. 大蜡螟降解塑料及其肠道微生物组研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [17] 刘亚飞. 大蜡螟幼虫肠道中聚乙烯降解菌株的筛选、鉴定及其降解特性研究[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师

- 范大学, 2019.
- [18] Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y.X., Li, L., Lin, H.F., Bi, Q.R. and Zhao, Y.C. (2020) Biodegradation of Polyethylene Microplastic Particles by the Fungus *Aspergillus flavus* from the Guts of Wax Moth *Galleria mellonella*. *Science of the Total Environment*, **704**, Article ID: 135931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>
- [19] Agnès, R., Jehan, W., Ariane, D.B., Nicolas, C., Christina, N.L. and Christophe, S. (2021) Plastic Biodegradation: Do *Galleria mellonella* Larvae Bioassimilate Polyethylene? A Spectral Histology Approach Using Isotopic Labeling and Infrared Microspectroscopy. *Environmental Science and Technology*, **56**, 525-534. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03417>
- [20] 毛敏敏. 大蜡螟幼虫肠道中降解聚乙烯微生物的鉴定及表征[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
- [21] 刘奇志, 田里, 蒲恒浒. 大蜡螟作为试验昆虫资源的利用现状[J]. 昆虫知识, 2009, 46(3): 485-489.
- [22] 黄少康, 王建鼎. 大蜡螟的生物学研究[J]. 中国养蜂, 2001, 52(5): 8-10.
- [23] Ellis, J.D., Graham, J.R. and Mortensen, A. (2013) Standard Methods for Wax Moth Research. *Journal of Apicultural Research*, **52**, 1-17. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.10>
- [24] Wang, H.X., Yuan, X., Huang, H.M., Zhang, B., Cao, C.N. and Zhao, H.P. (2017) Chemical Constituents from *Swertia mussoitii* Franch (*Gentianaceae*). *Natural Product Research*, **31**, 1704-1708. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1286480>
- [25] Alghoribi, M.F., Gibreel, T.M., Dodgson, A.R., Beatson, S.A. and Upton, M. (2014) *Galleria mellonella* Infection Model Demonstrates High Lethality of ST69 and ST127 Uropathogenic *E. coli*. *PLoS ONE*, **9**, Article ID: e101547. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101547>
- [26] Harding, C.R., Schroeder, G.N., Reynolds, S., Kosta, A., Collins, J.W., Mousnier, A. and Frankel, G. (2012) *Legionella pneumophila* Pathogenesis in the *Galleria mellonella* Infection Model. *Infection Immunity*, **80**, 2780-2790. <https://doi.org/10.1128/IAI.00510-12>
- [27] Mahar, A.N., Munir, M., Elawad, S., Gowen, S.R. and Hague, N.G.M. (2005) Pathogenicity of Bacterium, *Xenorhabdus Nematophila* Isolated from Entomopathogenic Nematode (*Steinernema carpocapsae*) and Its Secretion against *Galleria mellonella* Larvae. *Journal of Zhejiang University Science*, **6**, 457-463.
- [28] 胡福良, 李英华. 大蜡螟的生物学特性和防治方法[J]. 养蜂科技, 2000(1): 4-6.
- [29] 刘瑞, 刘奇志. 国内外大蜡螟研究与产业发展现状及展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(28): 280-284.
- [30] 薛琪琪, 门丽娜, 张倩, 祁靖宇, 柳春雨, 冯丹丹, 张宇宏, 张志伟. 饲养密度对大蜡螟实验种群生命表参数的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(7): 69-78.
- [31] Kwadha, C.A., Ong'amo, G.O., Ndegwa, P.N., Raina, S.K., Fombong, A.T., Stout, M.J., Davis, J., Diaz, R., Beuzelin, J.M. (2017) The Biology and Control of the Greater Wax Moth *Galleria mellonella*. *Insects*, **8**, Article No. 61. <https://doi.org/10.3390/insects8020061>
- [32] 杨爽, 张学文, 宋文菲, 苗春辉, 赵慧婷, 姜玉锁. 大蜡螟生物学特性及其防治研究概述[J]. 中国蜂业, 2016, 67(3): 33-37.
- [33] 赵军. 大蜡螟的室内人工饲养技术及生物学观察[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(10): 38-40+119.
- [34] 刘位芬, 梁铖, 宋文菲, 苗春辉, 张学文, 杨爽. 一种易于实验室批量繁殖大蜡螟的方法[J]. 中国蜂业, 2016, 67(6): 34-35.
- [35] 熊延坤, 张青文, 徐静, 段灿星, 周明群. 大蜡螟工厂化生产流程及环境因素的控制[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(5): 85-89.
- [36] Jyothi, J.V.A. (2006) Effect of Lighting Conditions and Substratum on Egg Laying Behaviour of *Galleria mellonella* (L). *Zoological Society of India*, **5**, 97-105.
- [37] 蒲恒浒, 刘奇志. 不同饲料配方对大蜡螟生长影响评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(28): 13647-13648+13668.
- [38] 吴艳艳, 周婷, 王强, 代平礼, 龚星鑫, 罗其花等. 大蜡螟饲料配方的优化[J]. 昆虫知识, 2010, 47(2): 409-413.
- [39] 黄诚华, 潘雪红, 黄冬发, 王伯辉, 魏吉利. 大蜡螟人工饲料配方筛选试验[J]. 广西农业科学, 2010, 41(7): 672-674.
- [40] 张俊俊, 王桂珍, 尹志龙, 刘平臻, 汪正威. 大蜡螟卵粒快速计数法[J]. 养蜂技术, 2020, 71(7): 24-26.
- [41] 杨爽, 刘位芬, 梁铖, 张祖芸, 苗春辉, 徐凯, 等. 蜂群中大蜡螟蛹及成虫雌雄的鉴别方法[J]. 蜜蜂杂志, 2017, 37(3): 8-10.
- [42] Yang, J., Yang, Y., Wu, W.M., Zhao, J. and Jiang, L. (2014) Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Wax Worms. *Environmental Science and Technology*, **48**, 13776-13784.

<https://doi.org/10.1021/es504038a>

- [43] 胡亚楠, 贺旭, 亚森·沙力, 罗明, 张宇宏, 张帅. 大蜡螟和黄粉虫肠道菌中聚乙烯地膜降解细菌的筛选及其降解性能[J]. 微生物学通报, 2020, 47(12): 4029-4041.
- [44] Saikia, S.S., Borah, B.K., Baruah, G., Rokozeno and Deka, M.K. (2022) Characterization of the Gut Microbes of Greater Wax Moth (*Galleria mellonella* L.) Shows Presence of Potential Polymer Degraders. *Folia Microbiologica*, **67**, 133-141. <https://doi.org/10.1007/s12223-021-00925-6>
- [45] Asal, P., Hedayat, B., Leonid, G., Nadieh, D.J. and Lund, N.J. (2021) Mastication of Polyolefins Alters the Microbial Composition in *Galleria mellonella*. *Environmental Pollution*, **280**, Article ID: 116877
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116877>
- [46] 唐瑞, 林佳倚, 劳乔斌, 徐梓锐, 谭梓铭, 吴正伟. 取食聚乙烯微塑料对大蜡螟生长发育的影响[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(23): 93-96.
- [47] 唐启河, 董志祥, 李还原, 陈奕霏, 郭军. 昆虫降解塑料的机制及其研究方法[J]. 生物学杂志, 2021, 38(5): 96-100.