

Study on the Biodegradation of Plastic Mulch Film Residue of Farmland by *Galleria mellonella*

Caixia Lv^{1,2}, Bin Wang^{2*}, Jiusheng Sun², Hongtao Jia¹, Guolong Huai², Chen Sun², Xiaoyan Qiao²

¹College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

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

Email: wbx_wm@126.com

Received: Apr. 23rd, 2020; accepted: May 7th, 2020; published: May 14th, 2020

Abstract

In recent years, agricultural ecosystem and environmental problems, especially farmland residual plastic mulch film pollution and its treatment have been the focus of domestic and foreign research and attention. Plastic mulch film and its covering technology have been brought great economic benefits to people. The large amount of residual plastic mulch film accumulated in the farmland destroys the soil structure, harms the normal growth of crops, and causes crops to reduce production, thereby affecting farmers' poverty alleviation and income increase and farmland ecological environment. In response to the current situation of "white pollution" in farmland, a lot of research has been carried out at home and abroad. Among them, the use of insects and other methods of biodegradation of farmland residual mulch film has become a trend. The degradation of farmland residual mulch film using the biological characteristics of the *Galleria mellonella* at home and abroad has been summarized the relevant researches in this paper. It was prospected for the *Galleria mellonella* in indoor breeding technology and in-depth development and utilization of various fields. And, it was provided new ideas for sustainable use of farmland soil and environmental protection of farmland ecology.

Keywords

Galleria mellonella, Biodegradation, Plastic Mulch Film Residue of Farmland

大蜡螟对农田残膜的生物降解研究

吕彩霞^{1,2}, 王斌^{2*}, 孙九胜², 贾宏涛¹, 槐国龙², 孙晨², 乔小燕²

*通讯作者。

文章引用: 吕彩霞, 王斌, 孙九胜, 贾宏涛, 槐国龙, 孙晨, 乔小燕. 大蜡螟对农田残膜的生物降解研究[J]. 农业科学, 2020, 10(5): 255-262. DOI: [10.12677/hjas.2020.105039](https://doi.org/10.12677/hjas.2020.105039)

¹新疆农业大学草业与环境科学学院, 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

Email: wbx_wm@126.com

收稿日期: 2020年4月23日; 录用日期: 2020年5月7日; 发布日期: 2020年5月14日

摘要

近年来农业生态环境问题、尤其是农田残膜污染及其治理成为国内外关注和研究的重点。地膜及其覆盖技术给人们带来巨大经济效益的同时, 农田中大量累积的残膜破坏了土壤结构、危害了作物正常生长、造成了农作物减产, 从而影响到农民脱贫增收和农田生态环境。针对农田“白色污染”的现状, 国内外开展了大量的研究, 其中利用昆虫等生物降解农田残膜的方法, 成为了一种趋势。本文综述了国内外利用大蜡螟的生物学特性降解农田残膜的相关研究, 并对大蜡螟在室内养殖技术以及各领域的深度开发利用进行了展望, 旨在为农田土壤可持续利用和农田生态环境保护提供新思路。

关键词

大蜡螟, 生物降解, 农田残膜

Copyright © 2020 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

地膜覆盖种植技术带动了农业的增产增效, 但应用最为普遍的聚乙烯地膜在自然界几乎不能被降解[1], 在土壤中可稳定存在 200~400 年[2]。针对农田地膜残留问题, 日本、美国等发达国家已研制出各种具有降解性能的薄膜来替代聚乙烯塑料地膜, 但是国内广泛推广使用仍然有限[3] [4], 主要原因是: 一是技术不成熟, 其会影响作物质量等, 二是经济投入成本较大, 限制了其推广。这些难以降解的“白色污染”, 已成为全球性的农业环境问题[5] [6] [7] [8]。

大蜡螟(*Galleria mellonella*)属于鳞翅目(*Lepidoptera*)、螟蛾科(*Pyralidae*)昆虫[9], 富含丰富的蛋白质, 具有生长周期短、食料来源丰富、易于大量繁殖等优点, 可以食用和饲用, 也可以作为试验昆虫用于昆虫病原线虫、寄生蜂、新型隐球菌、抗菌肽、抗菌免疫机制等方面的研究[10] [11]。研究显示[12] [13] [14], 一些有害昆虫能够咀嚼和取食塑料包装, 包括聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)制造的塑料包装袋。有研究者发现[15] [16], 印度谷螟幼虫可以降解 PE 塑料薄膜, 并且从其肠道内分离出 2 株可以降解 PE 的菌株: 阿氏肠杆菌 Y11 (*Enterobacter asburiae* Y11)和芽孢杆菌 YP1 (*Bacillus* sp. YP1)。螟类昆虫在一定程度上减小农田残膜对农业生产的影响和对农田环境的污染, 本文综述了国内外利用大蜡螟的生物学特性降解农田残膜的相关研究, 并对大蜡螟在室内养殖技术以及各领域的深度开发利用进行了展望。

2. 大蜡螟生物学特性

2.1. 大蜡螟的地理分布

大蜡螟的发生与纬度、海拔等温度因素有很大关系, 地理分布与蜜蜂的分布大致相同, 在低温地区, 大蜡螟危害往往较轻或没有危害, 而在东南亚热带与亚热带低纬地区危害相当严重[17] [18]。

2.2. 大蜡螟的发育阶段与特性

大蜡螟的发育分为卵、幼虫、蛹和成虫四个连续的阶段。食物和温度的差异使其发育程度不同,因此其发育过程可持续 6 个星期至 6 个月[19]。

卵一般发生在不易被蜜蜂破坏的蜂箱箱底或缝隙的蜡屑处,卵期一般为 8~23 d [17]。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,由乳白色逐渐变为灰白色,随孵化时间增长,逐渐出现褐色阴影。

大蜡螟危害以幼虫期为主,幼虫容易在长时间不清扫的蜂群和长时间存放不加以处理的巢脾上滋生[18]。幼虫共 8 龄,每龄期 4~7 d,初孵幼虫呈白色,1~2 龄幼虫喜食液体饲料,幼虫自 2 龄开始外形会发生很大变化,在隧道壁上吐丝,虫体保藏在丝织物中,成熟幼虫体增长,重量增加。大蜡螟幼虫发育至 5~6 龄后,食量猛增,对巢房破坏加剧,最后聚集或潜入蜂箱缝隙中结茧、化蛹、羽化[20]。

蛹期 6~55 d,蛹呈纺锤形,长 12~14 mm,黄褐色,背面有两个排成一排、大而扁平的齿状突起[10]。大蜡螟成虫口器退化,在成虫期不取食,雌蛾下唇须向前延伸,头部成钩状。颜色和大小在个体间有相当大的差别,这主要取决于幼虫期的食物组成和不同发育阶段持续时间的长短。雌蛾体长 18~20 mm,前翅呈长方形。雄蛾较小,体长 14~16 mm,前翅近扇形,外缘有凹陷[20]。

2.3. 大蜡螟的室内培养条件

由于大蜡螟在蜂业上重要的经济地位以及作为试验昆虫的广泛应用,其大规模饲养显得尤为重要。要得到大量生长发育良好、生理标准一致的大蜡螟,只有通过人工大量饲养才能实现。而人工大量饲养的关键问题是要有合适的饲料和适宜的环境条件[21]。大蜡螟的养殖一般在 30℃,60%~70% RH,全黑暗条件下。取食蜜蜂巢,易于群体人工饲养[10],在大蜡螟饲料配方的研究过程中[22],Warren 等[23]和 Boldt 等[24]研究出的 2 种配方成分较多,成本昂贵,因此未能广泛应用;熊延坤[22]、刘长明等[21]和张刚应等[25]分别对以面粉、酵母粉和奶粉等为主要原料的配方进行了研究,得到其成本较低,来源广泛,饲养效果好,可大规模饲养的常规饲料。

2.4. 大蜡螟的研究现状

大蜡螟在昆虫生理生化、杀虫剂筛选、昆虫毒理学和作为繁殖天敌的食物等研究领域应用广泛[26] [27];在生理生化和分子生物学领域中,研究主要集中在蜕皮激素、保幼激素和丝腺等方面[28];其幼虫体细胞也可作为生物工程中基因的表达载体[22];在线虫学领域中,它是重要的供试昆虫[29] [30];在昆虫病原线虫研究领域,大蜡螟是重要的供试昆虫,常用于线虫诱集、线虫活体繁殖、线虫回收及线虫产品质量的检测。也可作为细菌、真菌和病毒的活体寄主[31];另外,可作为农药学上的生测昆虫。

前人曾对自然变温条件下大蜡螟的发育历期作了报道。由于不同的环境条件(如温度、湿度、饲料等)对发育有较大的影响,故所得结果也各不相同。另一些研究者对恒温条件下的大蜡螟生物学特性也作过一些报道,结果也各不相同[32]。Beck [33]报道过 26℃时产卵最多,30℃以上产卵时量迅速下降。Jyothi [34]报道 33℃时产卵量最高。笔者认为在恒温条件,对大蜡螟的生长发育及产卵等生物学特性进行研究,以了解其基本生物学特性,将为生物测定打下良好的基础。

3. 大蜡螟与农田残膜降解

3.1. 农田残膜的危害

地膜覆盖技术在农业领域的应用于 20 世纪 50 年代,日本首次在草莓种植中采用覆膜技术,随后推广至其他作物[35]。1978 年该技术引入我国,覆膜具有促进作物早熟、增温保墒、抑制杂草和防治病虫害

害等诸多优点[36]-[41],应用规模逐年扩大[42],在农业生产和水土资源高效利用方面发挥了重要作用[43]。

目前我国农用塑料地膜产量和用量均居世界首位,是其他所有国家总和的 1.6 倍。我国农田平均地膜残留量 50~260kg/hm² [44],新疆农田平均地膜残留量已经达到 253.2 kg/hm²,是我国平均水平的 4-5 倍,经过 30 多年的“累积”,曾经被称为农业发展“助推器”的农用地膜已经带来了新忧患,目前新疆已成为我国乃至世界上残膜污染最严重的区域之一[45]。研究发现[46] [47] [48],随着覆膜年限的增加,残留在农田里的地膜逐年增加,破坏了农田生态环境和土壤结构,对作物生长发育造成了不良影响,已经成为严重的污染问题[49] [50]。据调查,因地膜残留物造成棉花等农作物根系坏死,导致缺苗断垅影响出苗率平均达 14% 以上,烂种烂芽率平均达 7.8% 以上,使棉花、小麦、玉米等十多种作物减产达 11% 以上[51]。总体而言,地膜残留量越多对农作物产量影响就越大。因此,解决农田残膜污染,是农业可持续发展,完成美丽乡村建设任务的重要前提。

新疆 9 个重点使用地膜的州地州农田残膜密度差异较大。其中,昌吉、喀什和博尔塔拉等地州农田残膜密度最大;塔城、阿克苏、巴音郭勒和吐鲁番等地州次之,阿勒泰地区和伊犁州最小。昌吉州农田残膜密度已达 263.3 kg/hm²,伊犁州农田残膜密度只有 20.1 kg/hm²,昌吉州农田残膜密度是伊犁州的 13 倍。综上所述,新疆农田残膜分布各地区差异明显,表现为北疆与南疆最高,东疆次之。新疆 12 个主要使用地膜的作物,农田残膜密度差异较大。其中,棉花、玉米和辣椒作物的农田残膜密度较高,马铃薯、制种玉米的农田残膜密度较低。棉田残膜量达到 197 kg/hm²,而马铃薯田只有 38 kg/hm²,棉田是马铃薯田残膜密度的 5.2 倍。综上所述,新疆不同作物农田残膜分布差异明显。综合残膜密度和作物种植面积看,棉田的残膜问题最为突出[52]。

为了减缓残膜对农作物的不良影响,在耕作季结束后,需要对农田中的残膜进行回收处理。目前新疆地区主要采用人工捡拾、机械回收或两者组合方式。由于当前使用地膜厚度普遍在 0.008 mm~0.010 mm 之间,机械强度不大,人工和机械回收率仅能达到 60% 和 80% 左右。除了回收地膜外,能够自然降解的生物基塑料制品成了地膜领域研究的热门。可是这些被普遍看好的绿色可降解制品,在市场上却面临“推而不广”的局面。原因在于市面上大部分可降解地膜价格都比普通 PE 地膜贵 1.5~3 倍,而且实际使用效果并非全部优于聚乙烯 PE 地膜。2015 年,我国农业部颁发的《关于打好农业面源污染防治攻坚战实施意见》中明确了未来 5 年的农田残膜污染治理目标,即力争到 2020 年将农田残膜回收率提升至 80% 以上,实现农田残膜的资源化利用[53]。国家相关部门对农田残膜污染问题的重视程度的加强,将会促进农田土壤的可持续利用。

3.2. 农田残膜处理的研究现状

目前关于农田残膜对作物生长影响的研究逐渐增多,以新疆为代表的西部地区农田残膜污染尤为严重,农田中的残膜量已经达到 300 kg/hm² 甚至更高。随着农田中残膜量的逐年增加,给多种作物已经带来了负面效应,有的甚至能减产 10% [3]。随着覆膜年限的增加,地膜带来的增产效应将会被残膜的减产效应所抵消,残膜污染已经成为我国尤其是西部地区不可忽视的问题。虽然使用可降解地膜是未来的发展趋势,但在很长时间内仍然面临成本和使用效果的双重考验。过去及现在使用的地膜基本上都是聚乙烯材料,它的化学惰性极强,在材料学领域,被认为是几乎不能被自然降解的。

3.3. 大蜡螟在农田残膜生物降解中的作用

全世界每年累积约 4000 万吨的塑料废物,带来严重的“白色污染”。国外从上世纪八十年代就开展了聚乙烯的生物降解研究。研究表明聚乙烯的生物降解是微生物或酶切断聚合物分子链,在分子链水平上利用生化过程降解塑料的方法[54]。生物对塑料降解的过程初步可以分为 4 个阶段:生物黏附侵蚀

塑料；塑料经过生物氧化作用或酶水解成低聚物片段；塑料聚合键断裂，形成脂肪酸；脂肪酸的生物代谢利用，最终分解成为二氧化碳和水[55] [56]。国外在多种塑料的生物降解领域有了较快的进展[57] [58] [59]。如日本科学家从环境中筛选到一株艾德昂菌，其在 30℃下六周左右时间几乎完全降解了一块 PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯，常见于饮料包装瓶)薄片，最终产生二氧化碳和水。西班牙的科学家发现大蜡螟幼虫喜欢咬食聚乙烯塑料袋，且证明聚乙烯在昆虫肠道内降解为小分子物质，降解过程由肠道微生物主导，但具体代谢途径和降解产物仍未探明[60] [61] [62] [63]。

国内研究人员发现某些微生物和昆虫能够降解聚乙烯。随着研究逐步深入，发现通过生物制剂(微生物和酶)无害化降解农田中的聚乙烯地膜残留物在理论上成为可能，生物制剂降解策略极有可能成为减少农田“白色污染”的有效途径[64]。目前研究发现降解聚乙烯地膜的生物主要是真菌和细菌等微生物，真菌菌丝比孢子降解聚乙烯效果更好。青霉(*Penicillium simplicissimum* YK)能降解 M_w (分子量)为 4000~28000 的聚乙烯，并能使硝酸预处理氧化产生的-CC-键断裂；有些链霉菌(*Streptomyces* sp.)也能产生胞外水解酶在 3 周内降解经氧化预处理的聚乙烯淀粉。麦芽糖假丝酵母(*Candida maltosa*)、细菌中的奈瑟氏球菌科(*Neisseriaceae*)等细胞色素 P450 氧化还原酶能催化与聚乙烯结构类似的分子量较低的烷烃和聚乙烯蜡的降解[57]。北京航空航天大学的研究人员[65]发现面包虫和大蜡螟的肠道微生物(*Geobacillus* 菌、*Pseudomonas* 菌和 *Serratia* 菌)能够降解聚苯乙烯(PS)和聚乙烯(PE)塑料。面包虫仅靠啃食聚苯乙烯泡沫塑料能存活一个月以上，进食泡沫塑料 16 天后，将聚苯乙烯转化为二氧化碳和虫体组织的比例分别达到 47.7%和 0.5% [66]。

4. 总结与展望

近些年来，随着对大蜡螟开发利用研究的不断深入，关于大蜡螟的经济利用价值受关注程度越来越高，大蜡螟在线虫学、细菌学、真菌学和病毒学的科学研究上是重要的实验昆虫[36] [37] [38] [39]，在农药学上可作为生测试虫，在分子生物学研究中是优良的生物反应器载体[27]，也还是淡水鱼类、鸟类、爬行类和两栖类动物的一种优良饵料[32] [67]。大蜡螟富含丰富的蛋白质，具有生长周期短、食料来源丰富、易于大量繁殖等优点，近几年研究重点逐步由对大蜡螟的防治转向农业应用和商品化生产上。

利用大蜡螟的生物学特性以及室内培养方法，在农田残膜污染治理方面进行深入探究，有望为农田土壤可持续提供一条新思路。在推动新疆农用地膜发展、残膜污染治理、农业生产水平提高、农民增收致富以及发展环境友好型农业产业方面都具有十分重要的影响。同时相关技术成果也可扩展到大众生活消费领域的塑料袋等白色垃圾的生物降解，综合农业与非农业技术辐射到全国将产生重大的生态效益和社会效益。

基金项目

自治区重点研发项目(2018B01006-1)；天山青年计划项目(2017Q006)；国家自然科学基金项目(41661075)。

参考文献

- [1] Srinivasa, R.M., Takefumi, Y., Tetsuji, O., *et al.* (2010) Feasibility Study of the Separation of Chlorinated Films from Plastic Packaging Wastes. *Waste Management (New York, N.Y.)*, **30**, 597-601. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.028>
- [2] 王频. 残膜污染治理的对策和措施[J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 185-188.
- [3] 王鑫, 胥国斌, 任志刚, 等. 无公害可降解地膜对玉米生长及土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 78-81.
- [4] 强小慢, 周新国, 李彩霞, 等. 不同水分处理下液膜覆盖对夏玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010,

26(1): 54-60.

- [5] Barnes, D.K., Galgani, F., Thompson, R.C., *et al.* (2009) Accumulation and Fragmentation of Plastic Debris in Global Environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **364**, 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- [6] Law, K.L., Moret Ferguson, S., Maximenko, N.A., *et al.* (2010) Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science*, **329**, 1185-1188. <https://doi.org/10.1126/science.1192321>
- [7] Andrés, C., Fidel, E., Ignacio, G.-G.J., *et al.* (2014) Plastic Debris in the Open Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 10239-10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>
- [8] Jambeck Jenna, R., Roland, G., Chris, W., *et al.* (2015) Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science (New York, N.Y.)*, **347**, 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- [9] 刘奇志, 田里, 蒲恒洙. 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.
- [10] 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(下半刊), 2010, 16(10): 38-40 + 119.
- [11] 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.
- [12] Gerhardt, P.D. and Lindgren, D.L. (1954) Penetration of Packaging Films: Film Materials Used for Food Packaging Tested for Resistance to Some Common Stored Product Insects. *California Agriculture*, **8**, 34.
- [13] Bowditch, T.G. (1997) Penetration of Polyvinyl Chloride and Polypropylene Packaging Films by *Ephesia cautella* (Lepidoptera: Pyralidae) and *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) Adults. *Journal of Economic Entomology*, **90**, 1028-1031. <https://doi.org/10.1093/jee/90.4.1028>
- [14] Riudavets, J., Salas, I. and Pons, M.J. (2007) Damage Characteristics Produced by Insect Pests in Packaging Film. *Journal of Stored Products Research*, **43**, 564-570. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.03.006>
- [15] Yang, J., Yang, Y., Wu, W.M., *et al.* (2014) Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic Eating Waxworms. *Environmental Science & Technology*, **48**, 13776-13784. <https://doi.org/10.1021/es504038a>
- [16] Yang, Y., Chen, J.W., Wu, W.M., *et al.* (2015) Complete Genome Sequence of *Bacillus* sp. YP1, a Polyethylene Degrading Bacterium from Waxworm's Gut. *Journal of Biotechnology*, **200**, 77-78. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.02.034>
- [17] 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.
- [18] 杨爽, 张学文, 宋文菲, 等. 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.
- [19] 蒲恒洙, 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): 3647-3648 + 3668.
- [20] 代平礼. 大蜡螟的研究概况及防治[C]//中国养蜂学会蜜蜂产品专业委员会、蜜蜂保护专业委员会、蜜蜂授粉专业委员会. 2005年中国养蜂学会蜜蜂产品专业委员会、蜜蜂保护专业委员会、蜜蜂授粉专业委员会联合工作会议和学术研讨会论文集. 乌鲁木齐, 2005: 6.
- [21] 刘长明, 沈乌洋, 陈可跃. 取食天然饲料与人工饲料的大蜡螟 *Galleria mellonella* 的生长发育差异比较[J]. 武夷科学, 1998(33): 136-138.
- [22] 熊延坤. 大蜡螟的体色遗传规律及其大规模养殖技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [23] Warren, L.O. and Huddleston, P. (1962) Life History of the Greater Wax Moth, *Galleria mellonella* L., in Arkansas. *Journal of the Kansas Entomological Society*, **35**, 212-216.
- [24] Boldt, P.E. and Marston, N. (1974) Eggs of the Greater Wax Moth as a Host for *Trichogramma*. *Environmental Entomology*, **3**, 545-548. <https://doi.org/10.1093/ee/3.3.545>
- [25] 张刚应, 杨怀文. 大蜡螟室内饲养技术[J]. 贵州农学院学报, 1996(1): 46-49.
- [26] 万航宇, 钱海涛, 董辉, 等. 芜菁夜蛾线虫和嗜菌异小杆线虫寄生特性的比较[J]. 昆虫知识, 2007(4): 545-548.
- [27] Andreas, V., Vladimir, M. and Gotz, P. (1997) Inhibition of Phagocytic Activity of Plasma Atocytes Isolated from *Galleria mellonella* by Entomogenous Fungi and Their Secondary Metabolites. *Insect Physiology*, **43**, 475-483. [https://doi.org/10.1016/S0022-1910\(96\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1910(96)00120-5)
- [28] Kolodziejczyk, R., Bujacz, G., Jakób, M., *et al.* (2008) Insect Juvenile Hormone Binding Protein Shows Ancestral Fold Present in Human Lipid-Binding Proteins. *Journal of Molecular Biology*, **377**, 870-881. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2008.01.026>
- [29] Ramirez, R.A., Henderson, D.R., Riga, E., *et al.* (2008) Harmful Effects of Mustard Biofumigants on Entomopathogenic Nematodes. *Biological Control*, **48**, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.10.010>
- [30] Foltan, P. and Puza, V. (2009) To Complete Their Life Cycle, Pathogenic Nematode-Bacteria Complexes Deter Sca-

- vengers from Feeding on Their Host Cadaver. *Behavioural Processes*, **80**, 76-79. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2008.09.012>
- [31] Mariola, A., Magdalena, M.-D. and Teresa, J. (2009) Antibacterial Activity *in Vivo* and *in Vitro* in the Hemolymph of *Galleria mellonella* Infected with *Pseudomonas Aeruginosa*. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part B, Biochemistry & Molecular Biology*, **152**, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.10.008>
- [32] 周永富, 罗岳雄, 陈华生, 等. 大蜡螟的发生规律及其危害[J]. 昆虫天敌, 1989(2): 87-93.
- [33] Beck, S.D. (1986) Growth and Development of the Greater Wax Moth, *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Galleriidae). *Wisconsin Academy of Sciences Arts and Letters*, **49**, 147-148.
- [34] Jyothi, J.V.A. (1994) Rate of Oviposition and Egg Laying Pattern in Greater Wax Moth *Galleria mellonella* L. *Geobios Jodhpur*, **21**, 47-49.
- [35] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272.
- [36] 马丽, 李克福, 孙国军, 等. 新疆早熟棉品种覆膜与不覆膜栽培比较试验[J]. 棉花科学, 2015, 37(3): 27-30.
- [37] Espi, E., Salmeron, A., Fontecha, A., et al. (2006) Plastic Films for Agricultural Applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, **22**, 85-102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>
- [38] 王秀康, 李占斌, 邢颖颖. 覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 884-897.
- [39] 龚雪文, 李仙岳, 史海滨, 等. 番茄、玉米套种膜下滴灌条件下农田地温变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 489-496.
- [40] 董瑜皎, 袁江, 吕世华. 长期免耕覆膜栽培和氮水平对稻-油轮作田油菜季杂草群落多样性的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(3): 1027-1032.
- [41] 黄红宙, 赵飞, 马罡, 等. 以覆膜增温为主的综合技术对玉米丝黑穗病控制的初步研究[J]. 作物杂志, 2011(6): 86-90.
- [42] 马辉, 梅旭荣, 严昌荣, 等. 华北典型农区棉田土壤中地膜残留特点研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 570-573.
- [43] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97-103.
- [44] 李元桥, 何文清, 严昌荣, 等. 点源供水条件下残膜对土壤水分运移的影响[J]. 农业工程学报, 2015(6): 145-149.
- [45] 胡灿, 王旭峰, 陈学庚, 等. 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 宝哲, 雷蕾, 汤秋香. 新疆农田地膜污染防治路径探析[J]. 新疆农机化, 2019(6): 17-21.
- [49] Romic, D., Romic, M., Borosic, J., et al. (2003) Mulching Decreases Nitrate Leaching in Bell Pepper (*Capsicum annum* 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)
- [50] 邹小阳, 牛文全, 刘晶晶, 等. 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.
- [51] 侯书林, 张佳喜, 谢建华, 等. 残膜污染调研及机械化回收装备[J]. 新疆农机化, 2016(5): 12-14.
- [52] 周明冬, 侯洪, 董合干, 等. 新疆农用地膜应用与残留污染现状分析[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(12): 2058-2061.
- [53] 新疆废旧地膜回收率达 75% 以上面源污染治理初步取得成效[J]. 蔬菜, 2019(12): 62.
- [54] 姚学峰, 宋怡玲. 细胞外酶 MnP 降解聚乙烯的分子动力学研究[J]. 生物技术通报, 2009(Z1): 356-359.
- [55] 康秦宝, 郭见誉, 阮艳军. 低密度聚乙烯生物降解的研究进展[J]. 神华科技, 2016, 14(6): 75-77.
- [56] 刘秋, 张耀尹, 曹雪洁. 海洋石油降解微生物及其降解机理[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(1): 1-6.
- [57] 杨军, 宋怡玲, 秦小燕. 聚乙烯塑料的生物降解研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1165-1168.
- [58] 王磊. 浅谈废塑料的降解机理及应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(19): 190-191.
- [59] 李慧钰. 生物降解塑料缘何叫好不叫座[J]. 化工管理, 2013: 39-40.
- [60] Yang, Y., Yang, J., Wu, W.M., et al. (2015) Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science & Technology*, **49**, 12080-12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
- [61] Yang, Y., Yang, J., Wu, W.M., et al. (2015) Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating

Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *Environmental Science & Technology*, **49**, 12087-12093.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>

- [62] Ekaterina Pererva. 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.
- [63] Han, X., Liu, W.D., Huang, J.W., *et al.* (2017) Structural Insight into Catalytic Mechanism of PET Hydrolase. *Nature Communications*, **8**, 2106. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02255-z>
- [64] 冯静. 白浅灰链霉菌对聚乙烯降解效果研究及降解酶的基因克隆[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2016.
- [65] 江雷. 解密自然: 虫子吃塑料[C]//中国化学会环境化学专业委员会、中国仪器仪表学会原子光谱专业委员会. 全国环境纳米技术及生物效应学术研讨会摘要集. 厦门, 2016: 5.
- [66] 杨军, 杨宇, 吴唯民, 等. 黄粉虫啮食降解聚苯乙烯[C]//中国化学会. 中国化学会第30届学术年会摘要集. 大连, 2016: 79.
- [67] 熊延坤, 张青文, 徐静, 等. 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(5): 85-89.