

医用口罩原材料聚丙烯的生物降解研究进展

严馨, 赵建*

四川大学生命科学学院, 资源微生物及微生物生物技术重点实验室, 四川 成都
Email: *2018141241153@stu.scu.edu.cn

收稿日期: 2021年5月1日; 录用日期: 2021年5月13日; 发布日期: 2021年6月7日

摘要

新型冠状病毒的爆发使全球范围内医用口罩使用量剧增, 由此引发对该医疗垃圾处理问题的思考。医用口罩由无纺布、耳带、鼻梁条构成, 其主要组分均由聚丙烯加工而成。聚丙烯作为一种高疏水的聚合物, 极耐降解。传统聚丙烯回收再利用方法耗能大, 转换率低, 且难以从根本上消耗广泛使用的聚丙烯。大量聚丙烯塑料未经处理便通过垃圾填埋、倾倒入海等方式进入土壤、海洋生态系统, 形成微塑料污染环境。为更好地解决聚丙烯降解问题, 本文梳理了聚丙烯生物降解探索过程及最新进展, 分析了目前聚丙烯生物降解菌种、处理条件、反应过程的研究成果, 为进一步提高聚丙烯降解率, 改善环境污染等研究和应用工作提供参考。

关键词

聚丙烯, 生物降解, 医用口罩

Research Progress on the Biodegradation of Polypropylene, the Material for Medical Masks

Xin Yan, Jian Zhao*

Key Laboratory of Resource Microbiology and Microbial Biotechnology, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: *2018141241153@stu.scu.edu.cn

Received: May 1st, 2021; accepted: May 13th, 2021; published: Jun. 7th, 2021

Abstract

The outbreak of the new coronavirus has caused a sharp increase in the use of medical masks

*通讯作者。

worldwide, which has triggered thinking about the problem of medical waste disposal. Medical masks are composed of non-woven fabrics, ear straps, and nose bridge strips. The main components are all made of polypropylene. As a highly hydrophobic polymer, polypropylene is extremely resistant to degradation. The traditional polypropylene recycling method consumes a lot of energy, has a low conversion rate, and it is difficult to fundamentally consume the widely used polypropylene. A large amount of polypropylene plastic enters the soil and marine ecosystem through landfills and dumped into the sea without treatment, forming microplastics to pollute the environment. In order to better solve the problem of polypropylene degradation, this article combs the exploration process and the latest progress of polypropylene biodegradation, analyzes the current research results of polypropylene biodegradation bacteria, treatment conditions, and reaction processes. In order to further improve the degradation rate of polypropylene, Improve environmental pollution, and other research and application work to provide the reference.

Keywords

Polypropylene, Biodegradable, Medical Mask

Copyright © 2021 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

2019 年底至今, 新型冠状病毒引发的疫情在全球范围内爆发, 口罩防护作为一种有效的阻断病毒传播的方法, 使全球范围内口罩生产与使用量显著增加。粗略估计, 疫情期间全国口罩的日需求量约 5.3 亿只。2015 到 2019 年, 我国口罩行业的市场规模由 63.18 亿元增长到 102.35 亿元。其中, 医用口罩的产值占到整个口罩产业产值的 50%。工信部数据显示, 2019 年我国口罩全年产能约为 2000 万只[1]。新冠疫情爆发以来, 国家着力推动口罩行业增产、扩能, 2020 年 2 月 25 日, 我国口罩日产能达到 7285 万只, 2 月 29 日, 口罩日产能约 11,000 万只。2021 年 3 月 2 日, 国家发展改革委宣布, 我国口罩日产能产量均突破 1 亿只[2]。此外, 全球范围内多个国家还出现巨大的口罩需求缺口, 韩国一个月内的医用口罩需求量增幅 7650%, 美国每日医用口罩需求量约为 3 亿只, 需求量缺口达到 90% [1]。在口罩大规模供应不足的情况下, 2020 年全球口罩使用量仍然达到 1660 亿只。如按照全球每人每天一只口罩的用量计算, 每月口罩使用量将达到 1290 亿只[3]。

巨大的口罩生产量与使用量也带来口罩降解的问题。使用量最大的常规医用口罩的结构包括纺粘无纺布、熔喷无纺布、耳带、鼻梁条。其起过滤作用的主体部分, 由三层无纺布形成纺粘无纺布 - 熔喷无纺布 - 纺粘无纺布结构, 内外两层无纺布由聚丙烯专用树脂制成, 中间熔喷无纺布由驻极处理后的高熔融指数聚丙烯专用树脂制成。鼻梁条能够弯曲变形, 使口罩被固定在鼻梁上, 绝大部分由聚烯烃树脂加工得到, 少量由金属条制成。耳带用于口罩穿戴, 由无纺布或热塑性聚氨酯弹性体橡胶(Thermoplastic polyurethanes, TPU)材质的松紧带制成[4]。

口罩大量使用的原材料为聚丙烯材料, 聚丙烯是包装、零部件、建筑家具等领域内使用最广泛的塑料之一, 占塑料总需求的 19.3%。2019 年, 我国聚丙烯进口量达到 349 万吨, 聚丙烯的广泛使用也带来环境处理的问题。目前我国还不具备成熟的回收处理聚丙烯塑料的能力, 相比于欧洲废旧塑料 45% 以上的平均利用率(德国利用率达 60%), 中国对塑料的利用率仅有 25% [5]。由于新冠病毒仍然在全球范围内传播, 短时间内, 口罩仍然会是日常消耗品。快速增长的口罩产量、用量, 与不完善的垃圾回收处理系

统, 将使大量未被妥善处理的废旧聚丙烯被送往垃圾填埋场或流向海洋形成微塑料, 被浮游生物等食物链低端的生物吞食, 进入生态循环系统, 造成长久的危害。

2. 聚丙烯的回收再利用

传统的聚丙烯处理方式包括焚烧回收热能、催化裂解制备燃料、分类加工直接利用、改性利用。

焚烧回收是利用焚烧炉使聚丙烯释放大量热量, 催化裂解是利用热能使聚丙烯发生断裂, 形成相对分子质量低的化合物, 制成燃料。若在裂解过程中混入低温煤焦油、页岩油等物质, 可进一步提高聚丙烯的导热性, 均衡反应温度, 进而提高产物收率[6]。

聚丙烯的分类加工利用是将成分单一、并且老化程度较低的聚丙烯材料进行分类, 然后直接进行加工再利用, 得到的产物成本耗费低, 但其性能下降较大, 仅能制成低端产品。改性利用是将聚丙烯与其他高分子或非高分子材料(如聚乙烯、橡胶、滑石粉等)混合, 改变聚丙烯原本物理性能与力学性能的资源化处理方式, 可以按照生产需求对聚丙烯进行性能改造, 并且可用于生产高端产品, 是目前最为常用、最有效的聚丙烯处理方式[5]。

传统聚丙烯处理方法普遍存在能耗较高, 回收利用率较低的问题。且国内目前缺乏完善的垃圾分类系统, 聚丙烯单独分类回收耗费成本高, 大量废旧聚丙烯并未得到妥善处理就流入土壤、海洋等系统, 形成微塑料持续影响生态环境[7]。

3. 聚丙烯的生物降解

相较于非生物降解, 生物降解聚丙烯能够自发减少环境中聚丙烯含量, 使高分子化合物被吸收利用, 重新进入生态循环系统。若能开发出高效降解聚丙烯的模式微生物, 聚丙烯塑料污染问题可大为改观。但是目前发现的对聚丙烯具有较高生物降解能力的微生物种类较少。由于聚丙烯碳链中高度重复的亚甲基(-CH₂-)会产生高度疏水的结构, 并且每个单体中重复存在甲基侧链(-CH₃), 使其极耐降解。未经任何处理的聚丙烯由于其结构阻碍微生物在聚丙烯表面附着, 所以往往更难进行生物降解。在进行微生物降解前, 往往会进行预处理。目前研究所用的预处理方法包括向聚丙烯中加入共混物、热处理、紫外线处理、加入助氧化剂等减少聚丙烯的疏水性。

3.1. 聚丙烯降解菌筛选

最早对聚丙烯生物降解菌进行研究的是 Cacciari, 他运用含淀粉的聚乙烯富集培养基, 从土壤样品中筛选到 4 个能够在此培养基上生长的微生物群落。将微生物群落孵育 175 天后, 用二氯甲烷萃取降解产物, 萃取物的重量为初始萃取重量的 40%, 但是其中仅有 10%的萃取物为碳氢化合物(C₁₀H₂₂ 至 C₃₁H₆₄), 其余 90%为芳香族酯(聚丙烯中所添加增塑剂的降解产物)。结果表明, 该微生物群落可能少量降解聚丙烯(降解产物为碳氢化合物) [8]。

Cheng 等在研究高密度聚乙烯和聚丙烯塑料对土壤和威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*)肠道菌群的影响时, 发现聚丙烯微塑料暴露在土壤中 28 天后, 气单胞菌科(*Aeromonadaceae*)和假单胞菌科(*Pseudomonadaceae*)的相对丰度显著增加, 亚硝基球菌科(*Nitrososphaeraceae*)和两个与变形杆菌(*Proteobacteria*)有关的菌种相对丰度则显著下降。此发现为筛选高效降解聚丙烯的微生物提供了方向[9]。

3.2. 聚丙烯材料预处理方法探索

Arkatkar 等分别将未进行预处理与 80℃下热处理 10 天的 0.05 mm 厚度的聚丙烯薄膜与土壤微生物共培养 12 个月。结果表明, 热处理后的聚丙烯质量减少 10.7%, 未进行预处理的聚丙烯质量仅减少 0.4%。在共培养 12 个月后, 从培养基中分离出单一菌落, 经鉴定为弯曲芽孢杆菌(*Bacillus flexus*) [10]。为进一

步探究不同菌种对聚丙烯的降解能力, Arkatkar 等人分别对 0.05 mm 厚度的聚丙烯薄膜进行王水 (Aquaregia) 预处理 3 天、Fenton 试剂预处理 7 天、100°C 烘箱热处理 8 天、225 nm 紫外照射 6 天, 再分别与固氮假单胞菌 (*Pseudomonas azotoformans*)、施氏假单胞菌 (*Pseudomonas stutzeri*)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 和弯曲芽孢杆菌 (*B. flexus*) 共培养。结果表明, 固氮假单胞菌和枯草芽孢杆菌疏水性更好, 能够在聚丙烯表面产生生物表面活性剂, 并形成生物膜, 对聚丙烯具有更好的降解性。并且, 仅在进行预处理的聚丙烯中观察到生物氧化, 未进行预处理的聚丙烯仅发生非生物氧化。紫外线预处理后与弯曲芽孢杆菌共培养的聚丙烯降解率最高, 达到 2.5% [11]。

在 Arkatkar 研究的基础上, Jeyakumar 等人详细地探究了各种不同预处理方法对聚丙烯生物降解率的影响。他们创新性地选取了两种真菌作为实验材料, 分别是 *Phanerochaete chrysosporium* NCIM 1170, *Engyodontium album* MTP091。实验所用聚丙烯按照不同样品组合分为纯聚丙烯 [PP], 淀粉聚丙烯共混物 [ST-PP], 金属离子聚丙烯共混物 [MI-PP], 并对不同组合分别进行紫外线照射 10 天、100°C 热处理 10 天。样品与真菌共同培养 12 个月后, 检测聚丙烯失重量。结果发现, 预处理样品的重量损失均高于未处理的聚丙烯, 紫外线处理的 [MI-PP] 降解率为 18.8% (*E. album*) 和 9.42% (*P. chrysosporium*)。并且, 加入金属离子助氧化剂的聚丙烯降解量更高, 其次是加入淀粉的聚丙烯, 降解率最低的为未加任何组分的纯聚丙烯。聚丙烯金属离子共混物与淀粉共混物的降解方式存在显著差异。加入金属离子后, 金属离子在聚丙烯表面产生自由基, 并与氧反应生成羰基, 而加入的淀粉直接氧化聚丙烯, 从而导致氧的插入形成羰基。氧化后的聚丙烯疏水性降低, 有助于微生物粘附在聚合物上, 从而更易被降解 [12]。

3.3. 提高聚丙烯生物降解率的方法探索

在前期对不同菌种降解聚丙烯材料能力测定的基础上 [11], Arkatkar 又联合 Aravinthan 等人, 选取了对聚丙烯降解能力较强的菌种, 并设计了两种不同的微生物组合, 弯曲芽孢杆菌 + 固氮假单胞菌 (*B. flexus* + *P. azotoformans*, B1) 和弯曲芽孢杆菌 + 枯草芽孢杆菌 (*B. flexus* + *B. subtilis*, B2), 分别与紫外线处理与热处理的聚丙烯共培养 12 个月。结果表明, B1 组合菌对紫外线预处理后的聚丙烯降解率最高, 达到 22.7% [13]。Arkatkar 团队在筛选聚丙烯降解菌的过程中做出了显著贡献, 并采用混合菌降解的思路以进一步提高降解量, 为进一步筛选降解菌落打下了基础。

Jeon 等利用以低分子量聚丙烯为碳源的培养基从土壤中分离出了嗜温聚丙烯降解菌, 并鉴定其为嗜麦芽窄食单胞菌 (*Sanotrophomonas panacihumi* PA3-2)。为研究真实的聚丙烯生物降解量, Jeon 未对聚丙烯进行任何预处理。常温放置 90 天后, *S. panacihumi* PA3-2 对 LMWPP-1 (Mn: 2 800, Mw: 10 300) 降解率为 $20.3\% \pm 1.39\%$, 对 LMWPP-2 (Mn: 3 600, Mw: 19 700) 的降解率为 $16.6\% \pm 1.70\%$ (Mn 为数均分子量, Mw 为重均分子量)。结果表明, 聚丙烯分子量越高, 生物降解率越低 [14]。此发现为提高聚丙烯降解率提供了新的思路, 通过前期预处理使聚丙烯聚合度降低或许能够加速聚丙烯的生物降解过程。

Skariyachan 等人对奶牛喂食了塑料废物, 并在 24 小时后采集牛粪样品, 从中分离出 23 株对塑料适应性强的菌株, 并将分离后的菌株组合成 10 种不同的混合菌群。所有组合中降解塑料能力最强的 CB3 组合 (分离株 IS1, IS2, IS3) 在 160 天的时间内, 对低密度聚乙烯、聚丙烯的降解率为 $64.25\% \pm 2\%$ 和 $63\% \pm 2\%$ 。进一步地, Skariyachan 对三株分离株进行鉴定, 结果显示其分别为肠杆菌、阴沟肠杆菌、铜绿假单胞菌 (*Enterobacter* sp. nov. btDSCE-01, *Enterobacter cloacae* nov. btDSCE-02, *Pseudomonas aeruginosa* nov. btDSCE-CD03) [15]。

3.4. 聚丙烯生物降解过程探究

Auta 等从马来西亚半岛的红树林沉积物中分离出八种细菌, 最终筛选出芽孢杆菌 *Bacillus gottheilii*,

其在 40 天内对经紫外线预处理的聚丙烯微塑料的降解率为 3.6% [16]。在进一步研究中, 他们又从红树林地区沉积物中分离出红球菌属与芽孢杆菌属细菌各一株(*Rhodococcus* sp. strain 36, *Bacillus* sp. strain 27), 与紫外线预处理的聚丙烯微塑料共培养 40 天后, 发现红球菌造成聚丙烯失重 6.4%, 芽孢杆菌造成失重 4.0%。该研究还测定了菌株对聚丙烯微塑料的吸收速率与半衰期(降解一半质量聚丙烯所用时间), 结果发现红球菌具有更高的吸收速率(0.002 K/天)和更短的半衰期(346.5 天), 芽孢杆菌的吸收速率为 0.001 K/天, 半衰期为 693 天。为验证结论的准确性, 他们对聚丙烯微塑料进行了扫描电子显微镜分析(Scanning electron microscopy analysis, SEM)、傅里叶变换红外光谱(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)分析, 从形态、结构、化学变化等方面验证了聚丙烯降解是由微生物引发的[17]。

Potrykus 等为验证城市垃圾填埋场中发生的聚丙烯生物降解过程, 从废弃填埋场中收集了一个塑料样品, 并将其鉴定为已丢弃 5 年的面包包装。随后, 他们对该样品进行了 FTIR 分析、DSC 分析(Differential Scanning calorimeter)、扫描电镜分析、荧光显微镜分析, 验证了该样品在填埋 5 年后仍然存在生物降解。随后, 他们对该聚丙烯样品表面菌群进行了鉴定, 分别采集无菌水洗过后的样品与未清洗的样品表面微生物, 发现清洗后样品表面的微生物种类与数量均少于未清洗, 且聚丙烯表面存在微生物附着[18]。但是 Potrykus 并未对附着的微生物菌群种类和该样品此时的降解速率进行定性与定量分析, 在今后的研究中着力于已被证实的自然界中聚丙烯生物降解过程, 或许对提高降解率会有所帮助。

Habib 等从南极土壤中分离出能在富含柴油的培养基上生长的假单胞菌(*Pseudomonas* sp. ADL15)和红球菌(*Rhodococcus* sp. ADL36), 将两种菌株与聚丙烯共同孵育 40 天后, 通过检测聚丙烯失重的百分比, 定量测定了两种南极菌株对未经处理的聚丙烯微塑料的利用率。结果表明, ADL15 菌株处理的聚丙烯质量减轻 17.3%, ADL36 处理的聚丙烯质量减轻 7.3% [19]。由于假单胞菌属能够形成具有相对高的疏水性的生物膜, 并且能够分泌有助于结合聚丙烯的胞外多糖, 使其在聚丙烯表面具有较强的附着能力。并且其能够分泌众多催化酶, 还具有适应降解聚丙烯等塑料的代谢机制[20], ADL15 菌株对聚丙烯具有较高的降解率。此外, 该研究发现 ADL36 菌株能够在添加少量聚丙烯的培养基中大量繁殖, 是一种良好的聚丙烯定殖细菌。

Oliveira 等人将黑曲霉(*Aspergillus niger*)和宛氏拟青霉(*Paecilomyces variotii*)构成的混合菌株分别与经过压缩处理的纯聚丙烯和聚丙烯/PBAT/热塑性淀粉共混物进行培养, 30 天后测定样品失重率(PBAT: 聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯)。结果显示, 纯的聚丙烯材料失重率-0.62%, 聚丙烯/PBAT/热塑性淀粉共混物失重率 2.32%。纯聚丙烯质量的增加可能是因为在样品表面形成生物膜的初始阶段, 霉菌的孢子、菌丝、以及分泌物等粘附在聚丙烯表面, 并且此时生物降解量较低。此外, Oliveira 等人还研究了挤压处理对聚丙烯生物降解的影响, 结果表明, 挤压循环次数对聚丙烯降解并无显著影响[21]。

4. 讨论

由新型冠状病毒引发的全球性感染, 使医用口罩用量大幅增加。医用口罩的回收处理问题再次引发关注。其原材料聚丙烯极难降解, 并且现有回收再利用技术还未成熟, 使得聚丙烯含量在土壤、海洋等环境堆积, 对生态平衡造成损害, 人们面临着寻找高效降解聚丙烯方法的难题。

目前研究发现对聚丙烯降解率较高的菌种包括气单胞菌、假单胞菌、芽孢杆菌、肠杆菌等。实验结果表明, 通过添加助氧化剂、淀粉等其他聚合物形成聚丙烯共混物, 或进行紫外照射、加热处理可以使聚丙烯降解率提高。并且, 还可以通过将多种聚丙烯降解菌进行混合培养, 或减少聚丙烯分子量达到提高降解率的目的。进一步探究生物降解过程发现, 微生物可以通过产生疏水性生物膜、分泌催化酶、形成孢子、菌丝等方式增加其在聚丙烯表面的附着性, 加速聚丙烯降解。聚丙烯生物降解体系正在逐步完善, 未来聚丙烯微塑料污染或将得到改善。

与此同时, 环境的共同维护也需要从上游进行改变。广州、深圳等地方政府均出台了废旧口罩管理办法, 将医疗机构废弃口罩最为医疗废物处理, 普通市民废弃口罩按生活垃圾处理, 并增设多处口罩回收容器, 收集后口罩废物的运输、处理均由专职机构负责[22] [23]。此外, 开发可降解材料口罩也是减少污染的有效方法。无论是废旧物回收利用、生物降解还是生产可降解材料, 垃圾治理、环境改善仍然需要不懈地探索。

参考文献

- [1] 许光建, 黎珍羽. “新冠肺炎”疫情对我国口罩产业的影响[J]. 经济与管理评论, 2020, 36(3): 11-20.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府网. 我国口罩日产能产量双双突破 1 亿只[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-03/02/content_5485609.htm, 2020-03-02.
- [3] 封芳, 韩晓, 韦安磊. COVID-19 影响下我国城市 PPE 固体废弃物的塑料污染问题[C]//2020 年全国有机固废处理与资源化利用高峰论坛论文集. 北京: 中国环境科学学会、同济大学、清华大学、湖南农业大学, 2020: 5.
- [4] 陶永亮, 陈曦, 向科军. 聚丙烯材料在医用口罩中的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2020,46(8): 33-36.
- [5] 丁茜, 章自寿, 罗建新, 麦堪成. 废旧聚丙烯资源化技术的发展现状[J]. 塑料工业, 2017, 45(5): 16-19+23.
- [6] 张振文, 黄涛, 王兴平, 张思灯, 朱美芳. 废旧聚丙烯材料回收再利用技术的发展现状及前景[J]. 纺织导报, 2014(7): 89-92.
- [7] Raddadi, N. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.419>
- [8] Cacciari, I., Quatrini, P., Zirletta, G., Mincione, E., Vinciguerra, V., Lupattelli, P. and Giovannozzi Sermanni, G. (1993) Isotactic Polypropylene Biodegradation by a Microbial Community: Physicochemical Characterization of Metabolites Produced. *Applied and Environmental Microbiology*, **59**, 3695-3700. <https://doi.org/10.1128/aem.59.11.3695-3700.1993>
- [9] Cheng, Y., Song, W., Tian, H., Zhang, K., Li, B., Du, Z., Zhang, W., Wang, J., Wang, J. and Zhu, L. (2021) The Effects of High-Density Polyethylene and Polypropylene Microplastics on the Soil and Earthworm *Metaphire Guillelmi* Gut Microbiota. *Chemosphere*, **267**, Article ID: 129219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129219>
- [10] Arkatkar, A., Arutchelvi, J., Bhaduri, S., Uppara, P.V. and Doble, M. (2009) Degradation of Unpretreated and Thermally Pretreated Polypropylene by Soil Consortia. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **63**, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.06.005>
- [11] Arkatkar, A., Juwarkar, A.A., Bhaduri, S., Uppara, P.V. and Doble, M. (2010) Growth of *Pseudomonas* and *Bacillus* Biofilms on Pretreated Polypropylene Surface. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **64**, 530-536. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.06.002>
- [12] Jeyakumar, D., Chirsteen, J. and Doble, M. (2013) Synergistic Effects of Pretreatment and Blending on Fungi Mediated Biodegradation of Polypropylenes. *Bioresource Technology*, **148**, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.074>
- [13] Aravinthan, A., Arkatkar, A., Juwarkar, A.A. and Doble, M. (2016) Synergistic Growth of *Bacillus* and *Pseudomonas* and Its Degradation Potential on Pretreated Polypropylene. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, **46**,109-115. <https://doi.org/10.1080/10826068.2014.985836>
- [14] Jeon, H.J. and Kim, M.N. (2016) Isolation of Mesophilic Bacterium for Biodegradation of Polypropylene. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **115**, 244-249. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.08.025>
- [15] Skariyachan, S., Taskeen, N., Kishore, A.P., Krishna, B.V. and Naidu, G. (2021) Novel Consortia of *Enterobacter* and *Pseudomonas* Formulated from Cow Dung Exhibited Enhanced Biodegradation of Polyethylene and Polypropylene. *Journal of Environmental Management*, **284**, Article ID: 112030. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112030>
- [16] Auta, H.S., Emenike, C.U. and Fauziah, S.H. (2017) Screening of *Bacillus* Strains Isolated from Mangrove Ecosystems in Peninsular Malaysia for Microplastic Degradation. *Environmental Pollution*, **231**, 1552-1559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.043>
- [17] Auta, H.S., Emenike, C.U., Jayanthi, B. and Fauziah, S.H. (2018) Growth Kinetics and Biodeterioration of Polypropylene Microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. Isolated from Mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin*, **127**, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
- [18] Potrykus, M., Redko, V., Głowacka, K., Piotrowicz-Cieślak, A., Szarlej, P., Janik, H. and Wolska, L. (2021) Polypro-

-
- pylene Structure Alterations after 5 Years of Natural Degradation in a Waste Landfill. *Science of the Total Environment*, **758**, Article ID: 143649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143649>
- [19] Habib, S., Iruthayam, A., Abd Shukor, M.Y., Alias, S.A., Smykla, J. and Yasid, N.A. (2020) Biodeterioration of Untreated Polypropylene Microplastic Particles by Antarctic Bacteria. *Polymers* 2020, **12**, Article No. 2616. <https://doi.org/10.3390/polym12112616>
- [20] Wilkes, R.A. and Aristilde, L. (2017) Degradation and Metabolism of Synthetic Plastics and Associated Products by *Pseudomonas* sp.: Capabilities and Challenges. *Journal of Applied Microbiology*, **123**, 582-593. <https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- [21] Oliveira, T.A.D., Barbosa, R., Mesquita, A.B.S., Ferreira, J.H.L., Carvalho, L.H.D. and Alves, T.S. (2020) Fungal Degradation of Reprocessed PP/PBAT/Thermoplastic Starch Blends. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 2338-2349. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.065>
- [22] 深圳政府在线. 深圳市新型冠状病毒肺炎疫情防控指挥部办公室疫情防控组关于印发深圳市会展活动疫情防控工作指引的通知[EB/OL]. http://www.sz.gov.cn/szzt2010/yqfk2020/szxd/zcyy/fkzy/jtzy/content/post_7683228.html, 2020-05-29.
- [23] 广东省住房和城乡建设厅网. 广东省住房和城乡建设厅关于加强废弃口罩管理做好新型冠状病毒感染的肺炎防范有关工作的紧急通知[EB/OL]. http://zfcxjst.gd.gov.cn/cxjs/zcwj/content/post_2880113.html, 2020-01-29.