

土壤中微塑料污染控制及治理研究进展

刘在平

湖北万绿生态环境科技有限公司, 湖北 荆门

收稿日期: 2024年4月2日; 录用日期: 2024年5月4日; 发布日期: 2024年6月17日

摘要

微塑料由于其回收难、降解难等特点, 导致进入土壤环境中的微塑料长期存在并对土壤、动植物和微生物等产生毒害作用, 对土壤环境造成严重的生态污染, 甚至对人体产生一定的负面影响。同时, 微塑料由于其性质、表面结构和表面疏水性, 容易与土壤环境中的其他污染物产生相互作用, 造成复合污染, 进一步危害土壤环境。文章叙述了土壤中微塑料的污染特征, 包括其本身存在的污染特性及与土壤中其他污染物相互作用形成的复合污染。针对微塑料污染, 给出了土壤中微塑料污染控制及非生物和生物治理方法, 重点分析了生物降解微塑料机理, 并对将来重点研究内容进行了预测, 以期为今后土壤微塑料污染治理提供一定的理论基础。

关键词

土壤, 微塑料, 控制, 治理

Research Progress on Control and Treatment of Microplastics Pollution in Soil

Zaiping Liu

Hubei Wanlv Ecological Environmental Technology Co. Ltd., Jingmen Hubei

Received: Apr. 2nd, 2024; accepted: May 4th, 2024; published: Jun. 17th, 2024

Abstract

Due to the characteristics of difficult recycling and degradation of microplastics, microplastics entering the soil environment exist for a long time and have toxic effects on soil, animals, plants and microorganisms, causing serious ecological pollution to the soil environment and even having a certain negative impact on the human body. At the same time, due to its properties, surface structure and surface hydrophobicity, microplastics are easy to interact with other pollutants in the soil environment, causing composite pollution and further endangering the soil environment. This

文章引用: 刘在平. 土壤中微塑料污染控制及治理研究进展[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(3): 488-495.

DOI: 10.12677/aep.2024.143067

paper describes the pollution characteristics of microplastics in soil, including their own pollution characteristics and the composite pollution formed by interaction with other pollutants in soil. In view of microplastic pollution, the control and abiotic and biological treatment methods of microplastic pollution in soil were given, and the mechanism of biodegradation of microplastics was analyzed, and the key contents of future research were predicted, in order to provide a certain theoretical basis for the future control of soil microplastic pollution.

Keywords

Soil, Microplastics, Control, Governance

Copyright © 2024 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

微塑料是一种新型污染物，是指大块塑料经过紫外线照射和风化等变为粒径小于 5 mm 的塑料微粒。常见的微塑料种类有聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)、聚酰胺(PA)等[1]。全球年产的塑料回收利用率仅 6%~26% [2] [3]，其余则进入土壤和水体等环境中成为污染物，这些微塑料通过食物链部分进入人体，有报道在人的胚胎及幼儿体内检测到微塑料[4]，这引起人们对微塑料的广泛关注。目前，土壤中微塑料研究集中在对动植物和土壤理化性质的影响，作为一种存在于土壤中的新污染物，2022 年国家将其纳入重点管控新污染物清单中，但国内外对其污染控制及治理研究较少[5]。文章叙述了土壤中微塑料污染特征、污染控制及治理进展，为未来土壤微塑料污染控制及治理提供方法。

2. 土壤中微塑料污染特征

2.1. 微塑料自身存在的污染

2.1.1. 自身特性

粒径较小的塑料易被动物误食，被摄入体内后无法消化，将对其产生损伤，造成进食器官堵塞，阻碍动物进食，或引起假饱腹感，最终导致动物摄食效率降低、生长缓慢，甚至死亡。Wegner 等[6]发现，紫贻贝在微塑料污染的水里暴露 48 d 后，在其血淋巴中发现有微塑料的存在，并降低其滤食效率。Stephanie 等[7]在研究海洋中蠕虫时也得出相同的结论，由于微塑料的存在，蠕虫摄食减少、食物消化时间增加，导致其能量储备量降低 50%。此外，微塑料在环境中不易分解，生物体内的微塑料不断地通过食入引起生物积累，最终危害生物健康。

2.1.2. 塑料添加剂

在塑料制造时，常加入增塑剂、阻燃剂、抗氧化剂等使其具有特殊物理性质，以提高塑料性能、延长使用寿命，这些添加剂经过长期磨损会从微塑料中浸出，对环境造成危害[8]。

邻苯二甲酸酯(Phthalate acid esters, PAEs)是常用增塑剂，主要用于 PVC 生产，PAEs 进入环境中会对土壤动物造成毒性作用[9]，若人食入含 PAEs 的植物，则会对人体健康造成影响。Wang 等[10]研究南京市城郊附近的菜园土壤中 6 种 PAEs，总 PAEs 在 0.15~9.68 mg/kg 之间。另外，Kong 等[11]对天津城郊的 4 中土壤中的优先 PAEs 分析，显示总 PAEs 在 0.05~10.4 µg/g 之间，土壤中 PAEs 浓度表现为果园 < 农田 < 废弃土壤 < 菜地。

多溴二苯醚、四溴双酚 A 和六溴环十二烷等溴化阻燃剂在塑料工业中被广泛使用, Jang 等[12]研究发现塑料可渗出六溴环十二烷($C_{12}H_{18}Br_6$), 其渗出能导致向生物体内转移。Pablo 等[13]研究海洋贻贝幼虫受到微塑料及其浸出液的毒性作用时, 结果显示其浸出液对生物的毒性大。

为了增加塑料使用寿命, 生产时添加抗氧化剂, 双酚 A 和壬基酚(NP)为具有一定的毒性的抗氧化剂, 是公认的内分泌干扰物, 也是研究者经常关注的塑料添加剂, 双酚 A 添加剂已被证实会影响甲壳类、端足类的发育并诱发畸变[14], NP 会从塑料瓶中滤出[15]。

2.2. 微塑料与土壤典型污染物的复合污染

微塑料可作为土壤中其他污染物的载体, 影响环境污染物的传输行为, 其可作为有机污染物、重金属和抗生素等典型污染物的载体与其发生复合作用, 对土壤产生复合污染。

2.2.1. 微塑料与有机污染物

微塑料表面可附着多氯联苯、多环芳烃、杀虫剂和除草剂等有机污染物。邓爱琴[16]研究发现, PE 能够与有机污染物菲共存于土壤环境中, 彼此之间发生作用, 形成复合污染, 对土壤理化性质等产生影响, 进而降低土壤植物对菲污染物的吸收积累, 降低土壤中菲的降解率。

微塑料吸附有机污染物的机制包括表面吸附、极性作用、小孔填充及其他作用, 表面吸附是由于微塑料具有较强的疏水性和静电作用, 能够以物理或化学吸附作用附着于微塑料表面。Wang 等[17]研究发现 PVC、PE、PS 的比表面积越大, 其对芘的吸附量越大。Teuten [18]研究显示, 土壤中的有机污染物浓度远低于微塑料表面, 表明微塑料与有机污染物的复合污染对土壤产生协同威胁。

PP 和 PE 吸附有机污染物通过范德华力作用, PS 通过 π - π 作用来增强其吸附芳香族化合物能力, 微塑料对有机污染物的表面吸附作用以及解吸作用不仅与微塑料本身类型、粒径、老化程度、疏水性等有关, 还与复杂的土壤环境有关, 如土壤中有机物质、pH、盐度、温度和离子强度等[19], 这些因素对其吸附产生的影响不容小觑。

2.2.2. 微塑料与重金属污染物

土壤中的重金属主要有镉、铜、铅、锌、镍和钴等, 主要来自矿物质、岩石以及人类活动等, 这些重金属可以在动植物器官积累, 还可以穿过细胞膜进入到动植物的细胞体内, 发挥毒性作用, 影响生物体的生命活动[20]。微塑料在自然环境中由于受到风化、紫外照射等, 会使其表面带有电荷, 进而吸附土壤中的重金属离子使其达到电荷平衡[21]。

微塑料对重金属的吸附能力受其种类、官能团和重金属种类等因素的影响, 高丰蕾等[22]研究了 Pb^{2+} 被 PVC 和 PP 吸附现象, 结果 PVC 对 Pb^{2+} 的富集能力比 PP 的强 2.1 倍, 吸附量达到 $1.32 \mu g/g$ 。Kim 等[23]揭示了 Ni^{2+} 与含氧官能团的微塑料相结合能力更强, 因此, 带羧基官能团的 PS 与 Ni^{2+} 更易结合。老化后的微塑料表面粗糙程度会增加, 含氧官能团的数量发生变化, 且由于侵蚀、矿化等原因导致微塑料比表面积增大, 分子极性改变, 因而对重金属的吸附量也相应增加[24]。

微塑料对不同重金属其吸附能力也有差异, 张宇恺[25]研究显示, 微塑料对铅和镉的吸附率分别为 7.5%和 6.9%。Dennis 等[26]研究发现微塑料与不同金属离子的亲和力不同, 主要是由于微塑料不同基团和化学键的作用差异, PVC 和 PP 微塑料对 Zn^{2+} 的吸附量均低于 Cu^{2+} 。研究还发现, 共存多种重金属会在微塑料表面的吸附点位形成竞争, 从而影响吸附能力, 高丰蕾等[22]在共存 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 实验中, 2 种离子存在竞争吸附现象, 即微塑料对 Pb^{2+} 的吸附能力减弱。另外, 微塑料对重金属的吸附能力还会受到环境因素(如温度、pH 和盐度等)的影响, Luke 等[27]研究发现, 微塑料对 Cd^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附量随着盐度的增加而降低, 原因可能是在高盐度条件下重金属离子发生了聚集或者络合行为, 从而使离子活性减弱, 导致吸附量减少。

2.2.3. 微塑料与抗生素

抗生素因可有效地杀灭病原菌而被广泛地应用于临床医疗、水产以及畜禽养殖中。常见的抗生素有四环素、环丙沙星和阿莫西林等，其中四环素使用广泛，在土壤中含量较高，这些抗生素以多种方式进入土壤积累，对土壤造成危害，从而影响到人体健康。存在于环境中的微塑料对抗生素有一定的吸附作用，两者可产生复合污染，微塑料对抗生素的吸附能力受到塑料种类和环境条件影响，杨杰等[28]研究了微塑料对四环素的吸附行为，结果显示，对四环素的吸附强弱表现为 $PE > PS > PA$ ，且条件不同吸附量也有较大差异。Pasqualina 等[29]研究发现微塑料可以作为多种抗生素传播的载体，其表面能定殖很多耐药细菌。

由上述可知，微塑料与土壤其他污染物的相互作用形成复杂的复合污染，其相互作用的复合污染机理需进一步深入研究。

3. 微塑料污染控制及治理

土壤中微塑料污染越来越凸显，对土壤及其生物甚至人类的危害也暴露出来，可通过微塑料污染控制及治理来有效处理土壤微塑料污染。

3.1. 微塑料污染控制

3.1.1. 源头控制

可通过制定并严格执行相关法律法规在生产开端控制微塑料污染。我国自 2008 年实施了将一次性塑料袋从无偿变为有偿、生产可生物降解塑料和禁止塑料吸管的使用等相关限塑令政策，但是由于可降解塑料成本高等问题，目前只在超市使用，很多小型商店依旧提供无偿塑料袋。2021 年，国家发改委和环境保护部共同印发了发改环资(2021) 1298 号文件，不断加大对相关政策的执行力度，进一步完善治理体系，减少塑料制品对环境的污染。我国可参考意大利、法国和瑞典等国家禁止个人护理品中添加塑料微珠，从法律角度全面禁止微塑料在护理品中的使用。另外，在禁止生产及使用的同时，应该研发新的可代替品。目前，市场上虽已出现了一定量的新型替代品，如液体木材、见水即溶塑料等，但由于制造成本高等问题而未被大量使用。2018 年，英国使用植物木质素制造出能被降解的微塑料颗粒，其可替代当前添加在护理品当中的塑料微珠，进而减少微塑料进入土壤。

3.1.2. 过程控制

加强微塑料污染方面的环保意识教育。例如在公共场所、学校、企事业单位和政府部门开展环保科普以及宣传教育活动，减少对塑料制品的使用，尽量选择不含塑料微珠的日化品、购买衣物时也尽量选择不含纤维(如涤纶)等制造的衣服，从而进一步推进绿色“低塑”生活。

3.1.3. 末端控制

首先，应该健全和完善垃圾分类制度及相关法律制度，减少塑料进入垃圾填埋场。细化垃圾分类，把塑料垃圾从生活垃圾中尽可能的分离出来，从而减少微塑料进入到土壤中。其次，加强塑料制品循环，提高回收技术，构建塑料再利用的循环体系，减少塑料制品量和废塑料产生量，从而降低土壤中微塑料的积累量。最后，对于无法再循环利用的废塑料，应采用焚烧等处理方式，进一步避免废塑料和微塑料在土壤环境中的积累。

3.2. 微塑料污染治理

3.2.1. 非生物降解

目前，关于微塑料的非生物降解包括吸附、过滤等物理方法和热氧化降解、光氧化降解等化学方法

[30]。自然界中,塑料降解最重要的途径是光降解,当微塑料进入土壤,暴露于光照下,可发生电子跃迁现象,参与氧化反应,降解聚合有机物,使其破碎,发生降解。Liu 等[31]研究了微塑料粒径和数量在紫外光老化过程中的动态变化,发现微塑料老化 24 h 后,其粒径由 4.8 μm 降至 1.3 μm ,塑料颗粒数量增加了 2 倍,表明光降解可以使聚合物高分子链断裂,减小粒径。热降解是指塑料受高温产生能量导致长聚合物断裂而发生的降解,是微塑料主要的非生物降解途径之一。热处理温度、微塑料类型等均是影响其降解效率的因素。热处理方式主要有热解、焚烧、水热和气化等[32]。

非生物降解虽能在一定程度上降解土壤环境中的微塑料,但采用物化方法处理微塑料过程中使用的有机物及降解过程中产生的二次污染会对环境再次造成影响,同时降解时间较长,应进一步研究较为清洁的降解方式。

3.2.2. 生物降解

近年来,随着微塑料污染所产生的影响日益显著,人类环保意识日益增强,寻求绿色、高效的微塑料降解方法尤为重要。生物降解作为一种绿色、环保、低成本且无二次污染等诸多优点备受关注。目前,自然界中存在多种可降解微塑料的生物,包括植物和微生物等。

植物降解是利用植物根际或植物茎叶吸收纳米微塑料的一种降解方式,研究发现,PS 可以在木质部导管的内壁部分积累,并随蒸腾流向地上部传输,从而吸收降解 PS [33]。同时,集中于植物根际或茎叶表面的微生物参与更多的降解过程。如红树林根部表面定殖的链格孢菌产生锰过氧化物酶和漆酶,从而对聚乙烯微塑料产生降解作用[34]。

动物降解是动物利用微塑料作为碳源,通过摄食、吸收消化微塑料以维持正常的生命活动,从而将微塑料转化为无害的化合物,实现降解。郭鸿钦[35]等研究发现,黄粉虫、大麦虫、大蜡螟虫将微塑料作为唯一的碳源,通过采食、咀嚼微塑料,进而实现生物降解。黄粉虫幼虫也能降解摄入体内的 PS 和 PVC [36]。

微生物能够较强降解微塑料,其中细菌和真菌最具降解潜力。微生物降解微塑料是由于微塑料的比表面积较大,能够使微生物定殖于微塑料表面,多种菌株共同存在作用下微生物代谢产生多种多糖和蛋白质,形成生物膜黏附于微塑料表面,进而导致微塑料表面发生损害,降低聚合度,使得聚合力和持久度下降。同时,微生物分泌的酶类催化氧化反应,产生自由基,诱发聚合物结构发生变化,进而催化降解[37]。微塑料能够分离出降解菌种来提高对自身的降解。Moon 等[38]研究发现,AlkB 微生物家族的羟化酶可通过氧化增加含氧官能团,进而降解 LDPE。

在土壤环境中,微塑料可以作为细菌和真菌的碳源或者营养物质,激励基因表达,进而诱导酶反应,将长链微塑料分解成为短链的有机物,这些短链有机物可被微生物吸收,最终被细胞代谢为 H_2O 和 CO_2 ,从而达到降解作用。此外,还能从这些微生物体内提取出可降解微塑料的酶,其产生的降解酶一方面有助于微生物在微塑料表面定殖,另一方面将长链微塑料降解断裂为短链有机物,实现降解。微生物在降解微塑料过程中存在优势菌种,常见的有芽孢杆菌属和假单胞菌属等,Devi 等[39]分离出 140 个对 PE 微塑料有降解能力的菌种,对其降解效果最好的菌种为假单胞菌属和芽孢杆菌属。实际土壤中,微塑料降解既与微生物的种类和土壤环境有关,也与微塑料的种类、组成、分子量和聚合度等有关[40]。

目前,微塑料降解更多集中在单一微生物菌种对单一微塑料降解的研究,而多微生物菌种共存下对微塑料的降解研究较少。土壤环境中微生物菌群复杂,含有大量的不同种类的微生物,共降解作用更具潜力。研究表明,混合菌种共同存在下的共降解作用相对单一菌种的降解作用更强[41]。Skariya 等[42]从牛粪中分离出 IS1、IS2、LS3、IS4 菌株,分别将单一菌株培养和混合培养 120 d 后发现,复合菌株降解的聚乙烯微塑料是单一菌株降解的 4 倍多,表明多种菌株的共同作用可使微生物协同生长,可在有限

环境中利用仅有的营养源相互合作,以提高微塑料的降解效率,但微生物菌群之间的合作关系机理尚需进一步研究。

4. 结论与展望

作为一种新型污染物,微塑料污染防治研究起步较晚,目前处于初级阶段,为进一步探索土壤中微塑料污染特征与降解机制,本文总结以下几点,为今后土壤中微塑料降解、治理提供一定的研究思路。

(1) 目前重点研究土壤中微塑料与其他污染物产生的复合污染对土壤、动植物及微生物的毒理效应,但对其形成复合污染的作用机制还未深入探索,今后应加强复合污染对土壤产生毒理作用的机制研究。

(2) 加强对塑料生产、销售、回收、废物处置等过程的管理及微塑料源头控制,建立塑料全生命周期追踪、评价体系,提高塑料回收利用技术。建立健全微塑料环境治理技术先进体系,发展相对成熟的微塑料环境治理技术。

(3) 进一步探究生物降解微塑料机理,加强对微塑料高效降解菌种的研究。同时,探究混合菌株对微塑料的共降解作用研究,微生物共存条件下,对微塑料产生共降解的作用机理。

(4) 加大可降解塑料的研发与探索力度。研发、生产可快速降解塑料,进而替代传统塑料制品的使用,从源头上有效控制微塑料对土壤等环境的污染。

参考文献

- [1] 张皓, 刘海成, 陈国栋, 等. 微塑料吸附水环境中重金属的研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(4): 36-44.
- [2] Alimi, O.S., Budarz, J.F., Hernandez, L.M., et al. (2018) Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science & Technology*, **52**, 1704-1724. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>
- [3] 王文茜, 闫柯柯, 冯传意, 等. 废旧塑料的回收与利用[J]. 再生资源与循环经济, 2024, 17(1): 48-50.
- [4] Antonio, R., Alessandro, S., Criselda, S., et al. (2021) Plasticenta: First Evidence of Microplastics in Human Placenta-Science Direct. *Environment International*, **146**, Article 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- [5] 陈琢玉, 文昌淑, 李燕灵, 等. 土壤环境中微塑料的研究进展和展望[J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44(2): 52-57.
- [6] Wegner, A., Besseling, E., Foekema, E.M., et al. (2012) Effects of Nanopolystyrene on the Feeding Behavior of the Blue Mussel (*Mytilus edulis* L). *Environmental Toxicology & Chemistry*, **31**, 2490-2497. <https://doi.org/10.1002/etc.1984>
- [7] Wright, S.L., Rowe, D., Thompson, R.C., et al. (2013) Microplastic Ingestion Decreases Energy Reserves in Marine Worms. *Current Biology*, **23**, R1031-R1033. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.068>
- [8] 陈蕾, 高山雪, 徐一卢. 塑料添加剂向生态环境中的释放与迁移研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3315-3324.
- [9] Wang, J., Lv, S., Zhang, M., et al. (2016) Effects of Plastic Film Residues on Occurrence of Phthalates and Microbial Activity in Soils. *Chemosphere*, **151**, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.076>
- [10] Wang, J., Luo, Y.M., Teng, Y., et al. (2013) Soil Contamination by Phthalate Esters in Chinese Intensive Vegetable Production Systems with Different Modes of Use of Plastic Film. *Environmental Pollution*, **180**, 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.036>
- [11] Kong, S.F., Ji, Y.Q., Liu, L.L., et al. (2012) Diversities of Phthalate Esters in Suburban Agricultural Soils and Wasteland Soil Appeared with Urbanization in China. *Environmental Pollution*, **170**, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.06.017>
- [12] Mi, J., Joon, S.W., Myung, H.G., et al. (2016) Styrofoam Debris as a Source of Hazardous Additives for Marine Organisms. *Environmental Science & Technology*, **50**, 4951-4960. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05485>
- [13] Silva, P.P.G., Nobre, C.R., Resaffe, P., et al. (2016) Leachate from Microplastics Impairs Larval Development in Brown Mussels. *Water Research*, **106**, 364-370. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.016>
- [14] Wang, W., Ndungu, A.W., Li, Z., et al. (2017) Microplastics Pollution in Inland Freshwaters of China: A Case Study in Urban Surface Waters of Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, **575**, 1369-1374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.213>

- [15] Loyo-Rosales, J.E., Rosales-Rivera, G.C., Lynch, A.M., *et al.* (2004) Migration of Nonylphenol from Plastic Containers to Water and a Milk Surrogate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **52**, 2016-2020. <https://doi.org/10.1021/jf0345696>
- [16] 邓爱琴. 聚乙烯微塑料对黑麦草修复菲污染土壤的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [17] Wang, W. and Wang, J. (2018) Comparative Evaluation of Sorption Kinetics and Isotherms of Pyrene onto Microplastics. *Chemosphere*, **193**, 567-573. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.078>
- [18] Teuten, E.L., Rowland, S.J., Galloway, T.S., *et al.* (2007) Potential for Plastics to Transport Hydrophobic Contaminants. *Environmental Science & Technology*, **41**, 7759-7764. <https://doi.org/10.1021/es071737s>
- [19] 郭荣, 沈亚婷. 土壤中微塑料与环境污染物的复合作用及其对微生物的影响[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 1-15.
- [20] 王琮杰, 张勇, 陈雨, 等. 水体中微塑料的环境影响行为研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(4): 1500-1510.
- [21] 郝爱红, 赵保卫, 张建, 等. 土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1100-1111.
- [22] 高丰蕾, 李景喜, 孙承君, 等. 微塑料富集金属铅元素的能力与特征分析[J]. 分析测试学报, 2017, 36(8): 1018-1022.
- [23] Kim, D., Chae, Y. and An, Y.-J. (2017) Mixture Toxicity of Nickel and Microplastics with Different Functional Groups on *Daphnia magna*. *Environmental Science & Technology*, **51**, 12852-12858. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03732>
- [24] Holmes, L.A., Turner, A. and Thompson, R.C. (2011) Adsorption of Trace Metals to Plastic Resin Pellets in the Marine Environment. *Environmental Pollution*, **160**, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052>
- [25] 张宇恺, 樊丽, 谢帆, 等. 土壤微塑料污染及其分析方法[J]. 四川环境, 2021, 40(2): 246-253.
- [26] Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., *et al.* (2016) Microplastics as Vector for Heavy Metal Contamination from the Marine Environment. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, **178**, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- [27] Holmes, L.A., Turner, A. and Thompson, R.C. (2014) Interactions between Trace Metals and Plastic Production Pellets under Estuarine Conditions. *Marine Chemistry*, **167**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.06.001>
- [28] 杨杰, 仓龙, 邱炜, 等. 不同土壤环境因素对微塑料吸附四环素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2503-2510.
- [29] Laganà, P., Caruso, G., Corsi, I., *et al.* (2018) Do Plastics Serve as a Possible Vector for the Spread of Antibiotic Resistance? First Insights from Bacteria Associated to a Polystyrene Piece from King George Island (Antarctica). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **222**, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.08.009>
- [30] 余可, 陈蕾. 微塑料去除技术的研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(10): 3005-3011.
- [31] Liu, Z.Y., Zhu, Y.J., Lv, S.S., *et al.* (2022) Quantifying the Dynamics of Polystyrene Microplastic UV Aging Process. *Environmental Science & Technology Letters*, **9**, 50-56. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00888>
- [32] Lachos-Perez, D., Torres-Mayanga, P.C., Abaide, E.R., *et al.* (2022) Hydrothermal Carbonization and Liquefaction: Differences, Progress, Challenges, and Opportunities. *Bioresource Technology*, **343**, Article 126084. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126084>
- [33] 范桥辉, 骆永明. 微塑料在小麦幼苗体内的积累分布及其对小麦生长和生理的影响研究获进展[J]. 高科技与产业化, 2023, 29(6): 38.
- [34] 孙文潇, 杨帆, 侯梦宗, 等. 环境中的微塑料污染及降解[J]. 中国塑料, 2023, 37(11): 117-126.
- [35] 郭鸿钦, 罗丽萍, 杨宇航, 等. 利用昆虫取食降解塑料研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1546-1553.
- [36] Peng, B.-Y., Chen, Z., Chen, J., *et al.* (2020) Biodegradation of Polyvinyl Chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) Larvae. *Environment International*, **145**, Article 106106. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106106>
- [37] 李清筱. 生物降解微塑料的机制和研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 311-319.
- [38] Yoon, M.G., Jeon, H.J. and Kim, M.N. (2012) Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and AlkB Cloned Recombinant Cell. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, **3**, Article 145. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000145>
- [39] Devi, R.S., Ramya, R., Kannan, K., *et al.* (2019) Investigation of Biodegradation Potentials of High Density Polyethylene Degrading Marine Bacteria Isolated from the Coastal Regions of Tamil Nadu, India. *Marine Pollution Bulletin*, **138**, 549-560. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.001>
- [40] 黄志琴, 徐颂军, 秦俊豪. 微塑料降解的主要方法、影响因素及环境风险[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(2):

134-141.

- [41] Nzila, A. (2013) Update on the Cometabolism of Organic Pollutants by Bacteria. *Environment Pollution*, **178**, 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.042>
- [42] Skariyachan, S., Setlur, A.S., Naik, S.Y., *et al.* (2017) Enhanced Biodegradation of Low and High-Density Polyethylene by Novel Bacterial Consortia Formulated from Plastic-Contaminated Cow Dung under Thermophilic Conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 8443-8457. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8537-0>