

# 土壤环境中微塑料与重金属的复合污染研究进展

李巧云<sup>1</sup>, 吴娟娟<sup>1</sup>, 杨 婵<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 齐文博<sup>1</sup>, 杨歆宇<sup>1</sup>, 宋凤敏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>陕西理工大学化学与环境科学学院, 陕西 汉中

<sup>2</sup>秦巴生物资源与生态环境国家重点实验室(培育), 陕西 汉中

收稿日期: 2023年5月1日; 录用日期: 2023年5月31日; 发布日期: 2023年6月7日

## 摘要

微塑料作为新型污染物, 广泛存在于土壤环境中, 与土壤中的重金属污染物之间存在相互作用, 所造成的复合污染已经成为近年来的研究热点。本文阐述了土壤中微塑料与重金属的相互作用以及所造成的生态毒性效应, 旨在为微塑料与重金属的相互作用机理和对生态环境污染的防治与治理提供有效信息。

## 关键词

微塑料, 重金属, 复合污染, 毒性效应

# Progress of Research on the Composite Pollution of Microplastics and Heavy Metals in Soil Environment

Qiaoyun Li<sup>1</sup>, Juanjuan Wu<sup>1</sup>, Chan Yang<sup>1</sup>, Pengfei Li<sup>1</sup>, Wenbo Qi<sup>1</sup>, Xinyu Yang<sup>1</sup>, Fengmin Song<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Chemistry and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of Qinba Biological Resources and Eco-Environment (Cultivation), Hanzhong Shaanxi

Received: May 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: May 31<sup>st</sup>, 2023; published: Jun. 7<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As a new pollutant, microplastic is widely found in the soil. The interaction between microplastic and heavy metal pollutants in the soil could cause combined pollution, it has become a hot re-

文章引用: 李巧云, 吴娟娟, 杨婵, 李鹏飞, 齐文博, 杨歆宇, 宋凤敏. 土壤环境中微塑料与重金属的复合污染研究进展[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 471-478. DOI: 10.12677/aep.2023.133059

search topic in recent years. In this paper the interaction and the resulting ecotoxic effect was described, which aimed to provide an effective information for understanding the interaction mechanisms, prevention and treatment of ecological pollution.

## Keywords

Microplastic, Heavy Metals, Combined Pollution, Ecotoxic Effects

Copyright © 2023 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

塑料因其具备轻便、可塑性强、性质稳定、耐用、廉价等特点,在农业、工业、日常生活等领域广泛应用,给人类带来了巨大的便利,因此它的产量在不断的上升。据统计,2020年全球塑料产量为3.67亿吨,预计到2050年,产量将达到11亿吨[1]。但同时塑料在环境中难降解、易累积,而带来了严重的环境污染问题。中国已经成为全球最大的塑料消费国,2021年塑料消费量约13543.8万吨,同时产生的废塑料约6200万吨,塑料回收率仅为31% [1]。因此,只有少部分塑料被回收循环利用,而大部分的废弃塑料以不同形式释放到环境中,并在生物或非生物作用下进一步破碎为微塑料颗粒(MPs) [2]。微塑料作为一种新型污染物,在2004年被首次提出,并定义为直径 < 5 mm 的塑料碎片或颗粒[3],而研究人员在1972年的海域表层水体中已经发现了粒径为0.1~2 mm 的聚苯乙烯小球[4],微塑料污染已逐渐引起学者的关注。

土壤是人类生存的基础,土壤质量关乎人类的健康发展。但当前的土壤环境的突出问题是土壤污染和荒漠化,尤其是以重金属为主要污染物的土壤污染问题是土壤环境恶化的一个重要原因。重金属在土壤中不能被微生物分解,在土壤中逐渐积累,能够被植物吸收,进而通过食物链对人类造成一定危害[5]。而微塑料作为新型污染物通过各种途径进入土壤环境,其化学性质稳定,难降解,能与土壤中的重金属污染物长期共存;且微塑料具有比表面积大、疏水性强、孔隙发达等特点,可以吸附重金属,作为重金属在土壤中存在的载体;此外,因微塑料粒径小,极易被生物体摄食和吸收,可在食物链的传递作用下,负载重金属的微塑料被释放到新的地点或者传向更高营养级生物,成为重金属污染土壤环境、造成生态、人体影响的新渠道[6]。

微塑料和重金属在土壤中组成的新型复合污染,是当前土壤环境面临的新挑战。但已有研究大多集中于水环境中微塑料的研究,有关土壤环境中微塑料的研究还相对较少,微塑料与重金属共存污染物的交互作用机制、生态毒性及健康影响等问题仍未充分解决。因此,本文基于国内外已有研究结果,综述了土壤环境中微塑料与重金属污染物的交互作用以及相关毒性效应,旨在为微塑料与重金属的复合污染研究以及污染治理提供参考。

## 2. 土壤环境中微塑料与重金属的复合污染

长期共存于土壤环境中的微塑料及重金属污染物,二者不可避免的发生相互作用并共同影响土壤环境,引发一定的复合污染效应。而微塑料对重金属的吸附作用是产生复合污染的重要原因;同时,微塑料性质(尺寸、表面性质、老化程度等)、重金属性质(种类、浓度等)以及环境因素(土壤 pH、共存离子等)

均会影响微塑料对重金属的吸附。

## 2.1. 微塑料对重金属的吸附作用

微塑料具有粒径小、比表面积大和疏水性强等特点，暴露于土壤环境中极易吸附土壤中的重金属，已有大量研究证明土壤微塑料表面负载有重金属污染物。

目前，对吸附过程的研究主要利用吸附动力学模型和等温吸附模型来模拟，通过等温吸附模型可以揭示二者的相互作用；而动力学模型可以用来描述吸附速率、确定吸附机理[7]。可将微塑料与重金属的吸附机制大致分为疏水分配作用和金属阳离子与微塑料表面的极性区或氧负离子的络合作用[8]。例如，Hodson 等[9]研究发现微塑料 HDPE 在磨损过程中表面易带电荷，进而对  $Zn^{2+}$  产生吸附，该吸附过程符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程，而且微塑料作为载体增加土壤中重金属吸附的潜力。付东东等[10]结果表明，微塑料聚苯乙烯对 Cu 的吸附速率受吸附机理的影响，该吸附过程较复杂，包括内部扩散、疏水分配作用、表面吸附等，为微塑料表面的活性吸附位点起主导作用的多分子层化学吸附。Wang 等[11]研究了高密度聚乙烯(HDPE)微塑料对 Cd 的吸附特性，吸附动力学符合准二级模型，吸附等温线在较大程度上遵循 Langmuir 模型；吸附过程没有新官能团的生成，物理吸附占主导作用。

尽管已有研究涉及微塑料与重金属的相互作用，但二者的作用机制并未明确，加之微塑料性质及诸多环境因素的影响，其吸附作用存在差异，仍值得进一步研究。

## 2.2. 影响微塑料吸附重金属的因素

### 2.2.1. 微塑料的影响

由于不同类型的微塑料具有不同的理化特性，其结构，官能团及带电性等均有一定差异，这些因素都会影响微塑料对重金属的吸附[12]。

微塑料的尺寸。一般认为，微塑料尺寸越小，比表面积越大，其活性吸附位点越多，吸附能力也更强。Lin 等[13]研究了三种微塑料 PE、PVC、PS 对  $Pb^{2+}$  的吸附，发现 PVC 因具有更大的比表面积，显示出比 PE、PS 更强的吸附能力。通过研究粒径分别为 1~2 mm、0.6~1 mm 和 100~154  $\mu m$  的高密度聚乙烯(HDPE)微塑料对 Cd 的吸附，发现 100~154  $\mu m$  的 HDPE 对 Cd 具有最高吸附量[11]。此外，土壤中的微塑料还会进一步发生破碎，而转化为尺寸更小的纳米塑料，对金属具有更高的吸附量，可以作为金属的有效载体。

微塑料的结晶度。一般认为，微塑料因分子链的无序排列区域少，具有较高结晶度，表面活性较低，对金属吸附能力弱；而分子链随机排列的聚合物对金属具有较强的吸附能力[14]。王俊杰等[15]研究表明，微塑料的结晶度与其对  $Cd^{2+}$  的吸附呈负相关，主要受结晶度和官能团的综合影响。然而，通过对比两种结晶度的微塑料对  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附，结果显示高结晶度的 PE 微塑料对金属离子的吸附能力更强[16]。因此，微塑料的结晶度对吸附的影响需要与其他因素共同考虑。

微塑料的表面性质。不同类型微塑料的表面形貌、孔隙率、官能团均会对吸附作用产生影响，其中表面官能团的差异是影响微塑料吸附重金属的关键因素[17]。对比表面光滑的微塑料，表面粗糙的微塑料更容易吸附重金属。Li 等[18]研究表明，具有更粗糙和更多孔的污泥基微塑料对 Cd 的吸附能力可提升 10 倍。相较于其他种类微塑料，PA 由于表面 C-O 和 N-H 官能团的存在以及自身较大的比表面积，对  $Cu^{2+}$  的吸附能力更强[19]。

微塑料的老化。释放到环境中的微塑料在紫外照射、热降解、生物降解等外界作用下发生老化，主要通过改变微塑料的理化特性(表面形貌、表面官能团等)和吸附机制进而影响微塑料对重金属的吸附[20]。Lang 等[21]发现 PS 经  $H_2O_2$  和 Fenton 试剂老化处理后，其表面裂纹增多，且表面暴露了更多的吸

附位点、出现了更多的含氧官能团,对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附量明显增多;而紫外照射老化后的 PS 对  $\text{Cd}^{2+}$  吸附能力下降,原因是其表面官能团与水分子形成了氢键,吸附位点减少。通过 UV 照射 HDPE、PVC、PS 等 3 种微塑料,使微塑料表面更容易负载负电荷,提高了对金属 Cu 和 Zn 的吸附量[22]。

### 2.2.2. 重金属的影响

同种微塑料对不同重金属的吸附能力也存在差异,重金属的性质(如离子半径等)以及重金属浓度的改变都会影响微塑料与重金属的吸附行为。Zou 等[16]研究了三种二价金属离子在同种微塑料上的吸附过程,结果表明同种微塑料对不同金属离子表现出不同的吸附能力,吸附强度依次为  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ ,对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附过程为静电作用主导, $\text{Pb}^{2+}$  具有最小的水合离子半径因而与微塑料的静电作用最强,表现出更强的吸附亲和力;而  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的吸附过程由静电作用和络合作用共同决定,二者与微塑料之间的静电作用相当,但  $\text{Cu}^{2+}$  的络合能力相较  $\text{Cd}^{2+}$  高,因而  $\text{Cu}^{2+}$  相对多的吸附在微塑料表面。高丰蕾等[23]研究了不同浓度铅溶液中微塑料对铅离子的吸附行为,结果表明随着铅离子浓度增大,微塑料对金属铅离子的吸附速率呈先升后降的趋势;可能由于在低浓度(0.1~0.1 mg/L)下,微塑料表面吸附位点较多,利于微塑料对铅离子的吸附;当浓度继续增大(0.5~3.0 mg/L),微塑料表面和重金属间有定位关系,微塑料表面吸附位点达到一定覆盖率后影响后续的吸附,致使吸附速率缓慢。

### 2.2.3. 环境因素的影响

环境 pH 值、共存离子、环境中的其他物质等因素,通过影响微塑料表面官能团质子化程度、与金属离子的络合、以及离子之间的竞争吸附等,进而影响微塑料对重金属的吸附。

环境 pH 值对吸附作用的影响主要通过改变微塑料表面官能团质子化程度以及重金属污染物的化学性质和存在形式。例如,在酸性 pH 范围内,微塑料对重金属的吸附能力随 pH 增大而增强,影响机制可能为当 pH 值较小时,微塑料表面官能团质子化程度较高,与金属阳离子间的静电排斥较强,且  $\text{H}^+$  与金属离子发生竞争吸附,最终减少微塑料对金属的有效吸附;当 pH 增大时,微塑料表面电负性增强,可以吸附更多的金属离子[24]。同时,过高的 PH 可能会导致金属离子发生络合作用产生沉淀,影响微塑料对金属的吸附[24]。Wang 等[25]发现,随着 pH 增大,PS 和 PET 对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量增多;当 pH 大于 7 时,金属离子易产生沉淀,对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量减少。

多金属离子存在的复合体系会引起离子间竞争吸附或者离子形式的变化。例如,在  $\text{Ca}^{2+}$  或者  $\text{Mg}^{2+}$  存在时,PA 和 PMMA 对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量均减少,原因是共存的金属离子占据了微塑料表面吸附位点[19]。当  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  共存时, $\text{Zn}^{2+}$  水解生成  $[\text{Zn}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_3] \text{NO}_3$ ,抑制了  $\text{Cu}^{2+}$  的水解,反而利于 PS 对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附[10]。

环境中其他物质的存在对微塑料吸附重金属也有一定影响。富里酸(FA)存在时,由于 FA 可附着在微塑料表面,其活性基团与  $\text{Cd}^{2+}$  发生络合作用以及离子交换作用,间接的提高了微塑料对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力;但当 FA 的浓度增大到一定值, $\text{Cd}^{2+}$  的吸附量基本保持不变,表明 FA 的存在也会阻碍微塑料与  $\text{Cd}^{2+}$  的接触,减少了对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附[23]。Yang 等[18]研究了土壤中 4 种低分子有机酸(LMWOAs)对 PA 和 PMMA 吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的影响,表明柠檬酸显著降低了 PA 对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附;草酸显著抑制了 PMMA 对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附,不同浓度柠檬酸表现出“低促高抑”的结果;而酒石酸和苹果酸几乎不会影响微塑料对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附。

## 3. 微塑料与土壤重金属污染物的毒性效应

一旦土壤环境中微塑料与重金属发生相互作用,负载重金属的微塑料可以通过土壤动物摄食、植物吸收等途径对土壤生态系统产生干扰,甚至通过食物链传递进入人体,对人类健康造成潜在威胁。因此,对微塑料与重金属复合污染的毒性效应研究是十分有必要的。

### 3.1. 土壤生物摄食与毒性效应

微塑料在土壤环境中广泛存在,土壤动物容易通过摄食行为将微塑料摄入体内并积累。由于微塑料和重金属都很难降解,负载重金属的微塑料一旦进入生物体内,在肠道内停留较长时间。一方面,动物摄食后会增加饱腹感,降低其正常的进食行为,引起生长繁殖及代谢问题,甚至造成动物的死亡;另一方面,进入体内的微塑料和重金属之间存在有协同或拮抗作用,表现出不同的毒性效应。

土壤中微塑料与重金属复合污染的生物毒性效应主要以蚯蚓作为研究对象。廖苑辰等[26]研究了聚苯乙烯微塑料和镉元素对蚯蚓的毒性效应,结果表明,无论有无微塑料的存在,蚯蚓的死亡率与镉浓度呈正相关;微塑料与镉的共同暴露会降低蚯蚓的生长速率、破坏活性氧自由基的产生与消除平衡而引起氧化系统损伤以及 DNA 受损;同时,微塑料在一定程度上减轻了重金属镉对蚯蚓的毒害作用,这可能是由于微塑料吸附了金属镉而减少了滤纸上镉的沉积量,降低了镉的生物有效性。Huang 等[27]研究发现在聚乙烯微塑料的存在下,蚯蚓体内 Cd 的生物积累量增大,造成蚯蚓体重减轻、繁殖能力降低以及一定程度的 DNA 损伤。而 Wang 等[28]研究则表明微塑料可以降低砷 As(V)对蚯蚓的毒性,原因在于微塑料对 As(V)的吸附作用以及降低了 As(V)向 As(III)的转化率,进而减少肠道及组织内的金属积累,削弱了重金属的生物有效性。

目前的相关研究表明微塑料与重金属通过机械性损伤、氧化应激、免疫损伤等多机制影响土壤动物的生长发育、繁殖等[9] [29];但由于真实土壤环境复杂、土壤生物多样、微塑料尺寸、微塑料与重金属种类及暴露浓度差异等因素,二者的相互作用极其复杂,表现出互相协同或拮抗的毒性效应,相关毒性机制还需要进一步探究。

此外,微生物作为土壤生物的重要组成部分,对土壤理化性质、土壤物质循环、植物生长等起着重要的作用,但有关微塑料-重金属复合污染对土壤微生物的影响研究还较缺乏。Feng 等[30]研究了不同剂量(0.2%、2%)的六种微塑料释放于 Pb-Zn 污染的土壤中对微生物所造成的影响,研究表明微塑料-重金属的共同暴露降低了细菌群落的丰富度和多样性,改变了微生物群落组成,导致特定类群的特殊富集;且高剂量的微塑料表现出更明显的作用。微塑料与重金属的共同暴露通过影响微生物多样性和功能,从而对土壤生态系统的多功能性造成潜在威胁。

### 3.2. 植物的吸收积累与毒性效应

复合污染对植物的毒性效应主要体现在两方面:微塑料会影响重金属在植物体内的积累;进入植物体内的微塑料和重金属的相互作用影响其生长。

当微塑料与重金属共同暴露于土壤中,对植物的作用可能存在以下几种情况:微塑料的存在对植物的种孔或根毛表层造成物理堵塞,阻碍对水分及养分的吸收,影响植物种子的萌发、根部的生长;同时也产生与重金属争夺根表面位点的现象,阻碍植物对金属的吸收,影响金属对植物的毒性作用。微塑料与重金属发生吸附作用,土壤中植物可吸收的重金属减少,毒性效应有一定程度的减弱。当微塑料尺寸小至可以进入植物体内时,负载重金属的微塑料通过根际被植物吸收富集,同时重金属离子在植物体内被释放,对植物根系甚至通过在植物体内的传输对植物茎叶等均产生影响作用。例如,冯天联等[31]结果表明对比单一污染,微塑料与金属 Cd 的复合污染对小麦萌发、根和芽的生长起到一定的促进作用,二者之间存在拮抗作用,降低了作物对 Cd 的吸附,减轻单一污染对作物的毒害效应。宁瑞艳等[32]研究表明 PS-Cd 处理条件下,微塑料促进 Cd 在植物体内的吸收,增强了 Cd 对东南景天的生长抑制;二者在植物体内主要通过植物组织、植物对营养物质的吸收及转运、植物的光合作用等途径产生影响。

由于复合污染的毒性效应受微塑料自身性质(如尺寸、种类、浓度)、重金属种类和浓度、植物种类等多因素影响,最终表现出不同的正面或负面结果。因此,关于实际土壤环境中对植物的复合效应仍需要

展开更深入、更广泛的探索。

### 3.3. 食物链传递与毒性效应

已有学者证明微塑料可以通过陆地食物链(土壤 - 蚯蚓 - 鸡 - 人体)来进行传递和富集[33], 结合土壤动物与植物受微塑料与重金属复合污染的毒性效应来看, 人类作为最高营养级生物, 最终可能会受到二者联合作用的影响。

研究者 Liang 等[34]通过消化系统体外实验进行评估微塑料与金属 Cr 的联合作用, 发现 PLA 微塑料对 Cr<sup>6+</sup>的生物可及性在胃阶段达最大值(19.9%), 显著高于小肠和大肠阶段, 口腔阶段则未检测到微塑料释放金属。但有关二者的联合效应最终对人体所造成的健康威胁等研究还较欠缺, 这也是研究者们近年来研究的重点。

## 4. 结论与展望

微塑料和重金属来源广泛, 普遍存在于土壤环境中, 而土壤环境中微塑料的分离与富集技术、微塑料的识别以及高灵敏度的检测方法是未来技术发展的目标; 同时为实现对微塑料和重金属污染源的有效控制, 需要加强新型塑料的研发工作, 并基于已有的塑料垃圾处理技术、工业废物排放监控机制等, 进一步建立并完善有关污染治理体系。

其次, 由于进入土壤环境的微塑料与重金属间存在复合效应, 二者的交互作用为疏水分配作用、络合作用等多机制并存, 且受到微塑料性质、重金属种类及浓度、环境因素等影响; 同时考虑到复杂、多种不确定因素存在的自然环境条件, 对二者的相互作用过程及机理、作用前后微塑料与重金属性质的变化还需进行进一步的研究; 以为今后提供理论支撑并能更准确的对二者的环境行为、风险评估等进行预测。

最后, 微塑料和重金属复合作用对环境动植物、微生物甚至人类产生一定的毒性效应, 而所表现出的正向或负面结果同样受到微塑料自身性质(如尺寸、种类、浓度)、重金属种类和浓度、生物种类等多因素影响; 对土壤动植物、微生物的生物积累、毒性与健康效应还需展开更多实验探究, 为阐明二者毒性作用机理提供理论支撑; 同时, 人类作为高营养级生物, 负载重金属的微塑料通过食物链传递进入体内后, 对人体组织和器官的影响以及对人体造成的健康风险相较于其他生物还缺乏研究, 需要与已有的二者毒性效应数据及信息结合来进行综合评估。

## 基金项目

国家自然科学基金(22073059);

陕西省教育厅科研专项(20JY008, 20JS017);

陕西理工大学秦巴生物资源与生态环境重点实验室“市校共建”科研专项(SXJ-2016)。

## 参考文献

- [1] Luan, X.Y., Kou, X.H., Zhang, L., *et al.* (2022) Estimation and Prediction of Plastic Losses to the Environment in China from 1950 to 2050. *Resources, Conservation & Recycling*, **184**, Article ID: 106386. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106386>
- [2] 骆永明, 施华宏, 涂晨, 等. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. 科学通报, 2021, 66(13): 1547-1562.
- [3] Richard-Thomson, C., Ylva, O., Richard, P., *et al.* (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic. *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [4] Carpenter, E.J. and Smith, K.L. (1972) Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science*, **175**, 1240-1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>

- [5] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 460-476.
- [6] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(10): 1021-1030.
- [7] 陈守益. 微塑料的老化过程及其对污染物吸附的影响机制[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [8] 万红友, 王俊凯, 张伟. 土壤微塑料与重金属、持久性有机污染物和抗生素作用影响因素综述[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 643-650.
- [9] Hodson, M.E., Duffus-Hodson, C.A., Clark, A., *et al.* (2017) Plastic Bag Derived Microplastics as a Vector for Metal Exposure in Terrestrial Invertebrates. *Environmental Science & Technology*, **51**, 4714-4721. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00635>
- [10] 付东东, 张琼洁, 范正权, 等. 微米级聚苯乙烯对铜的吸附特性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4769-4775.
- [11] Wang, F.Y., Yang, W.W., Cheng, P., *et al.* (2019) Adsorption Characteristics of Cadmium onto Microplastics from Aqueous Solutions. *Chemosphere*, **235**, 1073-1080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.196>
- [12] 周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海河口潮滩中微塑料的表面风化和成分变化[J]. 科学通报, 2018, 63(2): 214-223.
- [13] Lin, Z.K.L., Hu, Y.W., Yuan, Y.J., Hu, B.W. and Wang, B.L. (2021) Comparative Analysis of Kinetics and Mechanisms for Pb(II) Sorption onto Three Kinds of Microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **208**, Article ID: 111451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111451>
- [14] Fred-Ahmadu, O.H., Bhagwat, G., Oluyoye, I., *et al.* (2020) Interaction of Chemical Contaminants with Microplastics: Principles and Perspectives. *Science of the Total Environment*, **706**, Article ID: 135978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135978>
- [15] 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 等. 老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2030-2038.
- [16] Zou, J.Y., Liu, X.P., Zhang, D.M. and Yuan, X. (2020) Adsorption of Three Bivalent Metals by Four Chemical Distinct Microplastics. *Chemosphere*, **248**, Article ID: 126064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126064>
- [17] 徐笠, 李海霞, 韩丽花, 等. 微塑料对典型污染物吸附解吸的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 961-969.
- [18] Li, X.W., Mei, Q.Q., Chen, L.B., *et al.* (2019) Enhancement in Adsorption Potential of Microplastics in Sewage Sludge for Metal Pollutants after the Wastewater Treatment Process. *Water Research*, **157**, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.069>
- [19] Yang, J., Cang, L., Sun, Q., *et al.* (2019) Effects of Soil Environmental Factors and UV Aging on Cu<sup>2+</sup> Adsorption on Microplastics. *Environmental Science and Pollution Research International*, **26**, 23027-23036. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05643-8>
- [20] 褚献献, 郑波, 何楠, 等. 微塑料与污染物相互作用的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(2): 427-435.
- [21] Lang, M.F., Yu, X.Q., Liu, J.H., *et al.* (2020) Fenton Aging Significantly Affects the Heavy Metal Adsorption Capacity of Polystyrene Microplastics. *Science of the Total Environment*, **722**, Article ID: 137762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137762>
- [22] Bandow, N., Will, V., Wachtendorf, V. and Simon, F.G. (2017) Contaminant Release from Aged Microplastic. *Environmental Chemistry*, **14**, 394-405. <https://doi.org/10.1071/EN17064>
- [23] 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.
- [24] 谢洁芬, 章家恩, 危晖, 等. 土壤中微塑料复合污染研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2431-2440.
- [25] Wang, X.X., Zhang, R.X., Li, Z.Y. and Yan, B. (2021) Adsorption Properties and Influencing Factors of Cu(II) on Polystyrene and Polyethylene Terephthalate Microplastics in Seawater. *The Science of the Total Environment*, **812**, Article ID: 152573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152573>
- [26] 廖苑辰, 王倩, 蒋小峰, 等. 聚苯乙烯微塑料和重金属镉对蚯蚓的联合毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 216-226.
- [27] Huang, C.D., Ge, Y., Yue, S.Z., Zhao, L. and Qiao, Y.H. (2021) Microplastics Aggravate the Joint Toxicity to earthworm *Eisenia fetida* with Cadmium by Altering Its Availability. *Science of the Total Environment*, **753**, Article ID: 142042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142042>
- [28] Wang, H.T., Ding, J., Xiong, C., *et al.* (2019) Exposure to Microplastics Lowers Arsenic Accumulation and Alters Gut Bacterial Communities of Earthworm *Metaphire californica*. *Environmental Pollution*, **251**, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.054>
- [29] Zhou, Y.F., Liu, X.N. and Wang, J. (2020) Ecotoxicological Effects of Microplastics and Cadmium on the Earthworm

*Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*, **392**, Article ID: 122273.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122273>

- [30] Feng, X.Y., Wang, Q.L., Sun, Y.H., Zhang, S.W. and Wang, F.Y. (2022) Microplastics Change Soil Properties, Heavy Metal Availability and Bacterial Community in a Pb-Zn-Contaminated Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **424**, Article ID: 127364. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127364>
- [31] 冯天朕, 陈苏, 陈影, 等. 微塑料与 Cd 交互作用对小麦种子发芽的生态毒性研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1892-1900.
- [32] 宁瑞艳, 刘娜, 程红艳, 等. 微塑料和镉及其复合对超富集植物生长和富集镉的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 415-425.
- [33] Huerta, L.E., Mendoza, V.J., Ku, Q.V., *et al.* (2017) Field Evidence for Transfer of Plastic Debris along a Terrestrial Food Chain. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- [34] Liao, Y.L. and Yang, J.Y. (2020) Microplastic Serves as a Potential Vector for Cr in an *in-vitro* Human Digestive Model. *Science of the Total Environment*, **703**, Article ID: 134805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134805>