胡婷婷, 陈家玮. 土壤中微塑料的吸附迁移及老化作用对污染物环境行为的影响研究进展[J]. 岩矿测试,2022,41(3):353 – 363.
HU Tingting, CHEN Jiawei. A Review on Adsorption and Transport of Microplastics in Soil and the Effect of Ageing on Environmental Behavior of Pollutants[J]. Rock and Mineral Analysis,2022,41(3):353 – 363. 【DOI: 10.15898/j.cnki.11 – 2131/td.202202180024】

土壤中微塑料的吸附迁移及老化作用对污染物环境行为的影响研究进展

胡婷婷, 陈家玮*
(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 微塑料(粒径小于 5mm 的塑料颗粒),由于其自身较强的迁移特性及对环境污染物较强的亲和力,会引发严重生态风险,受到广泛关注。微塑料可以通过地膜破损、垃圾填埋和大气沉降等方式汇集在土壤中。土壤中的微塑料不仅会向下迁移,吸附富集共存的污染物,还会在表生地球化学作用下发生老化,对环境安全造成更大的威胁。本文基于近年文献重点综述了土壤环境中微塑料的吸附迁移行为以及老化作用对污染物环境行为的影响。结果表明:①微塑料在土壤中的迁移行为受到其自身理化性质(大小、形状及官能团)及土壤环境条件的影响;②微塑料可以吸附携带外部环境污染物迁移,从而改变污染物在环境中的归宿与生物可利用性;③老化作用会改变微塑料理化性质,影响微塑料的吸附与迁移能力,加速内源污染物的释放,其中有机污染物邻苯二甲酸酯释放的浓度范围约为 50.3 ~ 6660ng/g,常见重金属 Pb^{2+} 的释放浓度范围约为 5.1 ~ 81.4μg/g。本文建议今后应加强三方面研究工作:①不同土壤环境中多因素耦合条件下,开展微塑料与环境污染物的相互作用机制研究,特别是不同土壤介质及环境因素对污染物在微塑料上的吸附/解吸/迁移行为的影响。②通过实验模拟手段,研究环境中不同老化作用对微塑料性质和环境行为的影响。③加强微塑料内源污染物在不同环境中的释放研究,揭示老化作用对内源污染物释放行为的影响。

关键词: 微塑料; 土壤; 迁移; 吸附; 污染物; 老化

要点:

(1) 微塑料的迁移行为受到自身理化性质以及土壤环境条件的影响。

(2) 微塑料可以吸附携带环境中重金属和有机污染物在土壤中共迁移。

(3) 老化作用对微塑料迁移行为、吸附能力以及内源污染物释放产生重要影响。

中图分类号: S151.93 **文献标识码:** A

塑料的需求和使用在过去几十年一直在不断增加,自 20 世纪 50 年代以来,全球塑料产量平均每年增长 8.6%,据统计只有不到 5% 的塑料被回收[1-2]。2020 年起,由于新冠疫情防控工作的需要,大量防护口罩及塑料防护服的生产使用,不可避免地会带来更多的塑料垃圾[3]。这些塑料暴露于环境中,经物理、化学、生物作用被破碎分解成更小的微粒[4],学者们将粒径小于 5mm 的塑料碎屑和颗粒定义为微塑料(Microplastics, MPs)。微塑料不仅包括大的塑料破碎分解产生的次级小尺寸塑料[5],也包括化妆品和医疗产品中人造的微米级尺寸的初级塑料[6]。由于这些微塑料难以降解,在环境系统中不断积累,易被不同营养水平的生物摄取,引起多种毒理反应,包括致死、生长发育受到抑制、氧化应激、遗传毒性等,会引发严重的生态环境风险[7-8]。因此,微塑料污染问题受到广泛关注。

收稿日期: 2022 – 02 – 18; **修回日期:** 2022 – 03 – 28; **接受日期:** 2022 – 04 – 30
基金项目: 国家自然科学基金项目(41731282)
第一作者: 胡婷婷,硕士研究生,从事环境地球化学研究。E – mail: 2001210098@email.cugb.edu.cn。
通信作者: 陈家玮,教授,博士生导师,从事环境地球化学研究。E – mail: chenjiawei@cugb.edu.cn。

微塑料作为一种新兴的污染物,其密度低、体积小,易通过水流和风进行迁移[9-10]。研究表明,微塑料可以通过地膜破损、垃圾填埋、施肥、污水灌溉、轮胎磨损、大气沉降等方式进入土壤[11-13]。例如,对澳大利亚悉尼某工业区土壤调查发现,90% 的土壤中含有微塑料,浓度介于 300 ~ 67500mg/kg[14];类似地,对中国 5 个省份 6 种不同土地利用类型土壤调查中,发现微塑料广泛存在,浓度范围为 2783 ~6366 个/kg[15]。因此,土壤是微塑料重要的汇集地[16],研究微塑料在土壤中的环境行为至关重要。但是,由于土壤介质中微塑料分离检测技术的局限性,相关研究还较少。前人研究表明,进入土壤中的微塑料不仅会改变土壤的性质、结构与功能,影响土壤动植物的生长和发育,还会发生一系列地球化学过程(如迁移、吸附与老化)。2017 年 Rillig 等[17]首次评述了土壤微塑料淋滤到地下水中的潜在风险。此后,董姝楠等[18]总结了多孔介质中微塑料迁移行为的研究,阐明了影响土壤 - 地下水中微塑料迁移的主要外部因素,为准确评价微塑料的分布归趋及环境风险提供了重要参考。

微塑料除了迁移外,对土壤中污染物的影响也非常重要。徐笠等[19]分析了微塑料对典型污染物(重金属及有机污染物)吸附/解吸的作用过程,指出微塑料可以自发吸附环境中的污染物,改变这些污染物的环境行为。微塑料吸附环境污染物后,可经土壤系统中动物和微生物的摄食在食物链中积累,威胁人类健康[20]。但是,微塑料与污染物之间的相互作用较弱,吸附在微塑料上的污染物容易再次释放到环境或生物体内[21]。此外,微塑料在环境中将不可避免地受到光照、氧化、风化等作用的影响而发生老化。Wang 等[22]强调了老化致使微塑料表面产生裂纹和含氧官能团,进而改变微塑料的吸附能力与迁移行为。同时,微塑料中所含的有害物质,如双酚 A(BPA)、邻苯二甲酸盐(PAEs)、多溴联苯醚(PBDEs)及用于着色的重金属,会在老化过程中释放到环境中,并通过淋溶作用进入土壤[23-24]。Luo 等[25]测定了不同老化程度的微塑料中内源污染物的释放量,发现在模拟胃液中,未老化的微塑料、老化 3 周的微塑料和老化 6 周的微塑料在 72h 内色素最大的释放量分别达到 1.45 mg/L、1.76 mg/L和 1.94mg/L。表明老化作用加速了微塑料内源污染物的释放,导致微塑料污染风险更加复杂。因此,不同老化过程对微塑料在土壤中的环境行为的影响需要引起重视。

本文根据近年国内外研究成果,总结了微塑料在环境中的吸附迁移行为的影响因素,重点分析了微塑料和环境污染物(重金属、有机污染物)的相互作用,并强调了老化作用对微塑料迁移、吸附/释放污染物等环境行为的影响。相关内容有助于人们理解微塑料及相关环境污染物在土壤中的迁移、转化和归宿行为,并对今后开展微塑料环境行为相关研究提供依据和建议。

1　土壤中微塑料的环境行为

1.1　微塑料在土壤中的迁移行为

自然环境中微塑料分布广泛,在水体、土壤、沉积物、动植物中都有检出,意味着微塑料具有易迁移的特性。微塑料自身大小、形状及表面物理化学性质是影响其迁移能力的重要因素。微塑料大颗粒具有更强的阻塞效应,小尺寸颗粒更容易长距离迁移[26]。塑料微球或微粒比超细纤维更容易在土壤中迁移至深部,因为超细纤维容易与土壤细颗粒纠缠在一起形成大的块体[27]。微塑料表面带电性和疏水性在迁移过程中发挥重要作用。例如,带—COOH的比带—NH_2的微塑料更容易在饱和海水的砂土中运移[28],这是由于带正电荷的—NH_2微塑料与带负电荷的沙粒存在静电吸引作用。表面亲水性更强的聚苯乙烯(PS)微塑料在土壤介质中也表现出更高的迁移能力[29]。

除了微塑料自身性质,地球化学作用和土壤环境因素在微塑料的迁移过程中也扮演着重要角色。例如,土壤表层的微塑料会借助风和径流发生长距离迁移,土壤深部的微塑料可能会随着孔隙流体的运动发生垂向迁移[30]。对于土壤环境因素的影响来说,一方面,土壤的内部结构及组成(如矿物质含量和天然有机质等),影响着微塑料的迁移。研究表明,当塑料粒径小于土壤孔隙尺寸时,微塑料可能会通过土壤孔隙和裂缝向下运动[31-32]。当微塑料粒径较大时,则无法通过土壤的小孔隙,较稳定地滞留在土壤中[30-31]。干燥的土壤环境条件下,膨胀性黏土矿物(如蒙脱石)会促使土壤出现裂缝,微塑料颗粒会沿着这些裂缝迁移至更深的土层[17]。尽管微塑料密度小,但它与土壤矿物发生团聚效应会导致密度增加,有助于其向下运移[33]。若土壤中带正电荷的 Fe/Al 氧化物与带负电荷的微塑料发生作用相互吸引,极易使其滞留在土壤中[34]。此外,土壤中的天然有机质会增加微塑料与多孔介质之间的排斥能,从而促进微塑料的迁移性[28,35]。另一方面,

土壤系统中动植物对微塑料的迁移行为也发挥着重要作用。例如,蚯蚓可以通过摄食、挖洞、排泄等活动,或身体附着的方式,将微塑料运移到土壤深层,并且更细小的微塑料可以被带至更深的地方[36-37]。有研究发现不同物种对微塑料运移距离的影响存在显著差异,白符跳虫(*Folsomia candida*)和异跳虫(*Proisotoma minuta*)这两种弹尾虫(*Collembola*,土壤微节肢动物)均以腐烂物质为食,弹跳灵活,但体型更大的白符跳虫能够比异跳虫将微塑料运输更远的距离[38]。基于单一物种对微塑料迁移作用的研究,Zhu 等[39]构建了一个食物链模型来研究捕食者-被捕食者的关系在微塑料迁移中的作用,结果表明,当捕食性螨与被捕食者弹尾虫在土壤中共存时,微塑料的迁移增加了 40%,这说明与单一物种相比,生态系统中复杂的食物链会更大程度地影响微塑料的环境迁移行为。此外,土壤中植物根系也会对微塑料的迁移有显著影响,根系的生长可以将微塑料推向更深的土层[40]。

值得指出的是,以往的研究主要集中在单一因素对微塑料颗粒迁移的影响,需要进一步研究在多因素共同作用下微塑料的迁移与滞留行为。此外,室内实验很难反映真实土壤环境的复杂性,因此还需要开展野外试验,对微塑料的环境归趋进行定量化研究。

1.2　微塑料对污染物环境行为的影响

微塑料自身的迁移行为会带来生态安全风险,更需要引起重视的是,微塑料能够吸附携带环境污染物进行共迁移,因此存在更大的环境污染风险隐患。近年来,基于微塑料对重金属及有机污染物的吸附能力,微塑料对污染物环境行为的影响成为研究热点。

1.2.1　微塑料对重金属的影响

重金属不可降解、毒性大,在环境中分布广泛[41]。微塑料被认为是积累和运输重金属的重要载体,这是因为微塑料对重金属有较强的亲和力。例如,Wang 等[42]通过吸附动力学与等温吸附实验研究了聚乙烯微塑料对 Cu^{2+} 的吸附机制,发现 Cu^{2+} 在静电引力的作用下聚集在微塑料表面或孔结构中。Dong 等[43]也强调了静电吸引对 As(Ⅲ)等物质在四氟乙烯(PTFE)微塑料上吸附的重要作用。除静电作用外,表面络合和阳离子-π 键作用也会控制微塑料对重金属的吸附。Zhou 等[44]通过分析微塑料吸附前后官能团的变化,发现含氧官能团(如 C—O 和 C=O)和阳离子-π 键相互作用参与了对 Cd^{2+} 的吸附。尽管这些吸附研究是在水溶液中开展的,但相关认识有助于研究人员了解土壤环境中微塑料对重金属离子的吸附机理。

不同环境条件下,微塑料对重金属的吸附效果也不尽相同。Hodson 等[45]研究了微塑料对 Zn^{2+} 的吸附行为,发现直径 1mm 的高密度聚乙烯(PE)对 Zn^{2+} 的吸附特性与土壤相似,而在模拟蚯蚓肠道环境中,微塑料对 Zn^{2+} 的解吸量(40% ~60%)高于土壤(2% ~15%),证实了微塑料可以作为重金属载体,增加蚯蚓体内的重金属暴露。同时,也表明吸附在微塑料上的重金属可能会再次释放。类似地,Zhou 等[44]研究了不同条件下 Cd 在微塑料上的解吸行为,结果表明土壤中的腐植酸会促进微塑料上 Cd 的解吸,而在模拟肠道环境中,重金属的解吸率更高。由此可知,微塑料的吸附/解吸行为可能会增强重金属污染的生态风险。但在不同环境条件下(如腐植酸、共存离子等),重金属在微塑料上的吸附/解吸过程仍不清楚。为了准确评估二者共存时的生态风险,需要更多的研究来考察不同环境因素对微塑料吸附/解吸重金属离子行为的影响。此外,微塑料的存在会导致土壤的某些特性发生改变,进而间接影响重金属在土壤中的环境行为。例如,Zhang 等[46]发现添加聚乙烯的土壤对 Cd 的吸附能力降低,导致 Cd 在土壤中迁移性增强,从而引发环境风险。在此基础上,Ma 等[47]研究了聚丙烯(PP)微塑料对不同土壤固相组分吸附重金属 Cd 的影响,结果表明聚丙烯微塑料促进了矿物组分对 Cd 的吸附能力,但抑制了土壤中颗粒有机物(POM)、有机矿物质(OMC)的吸附能力。因此,微塑料对不同固相组分比例土壤吸附 Cd 的影响不同。再如,高密度聚乙烯微塑料会降低土壤 pH 值,进而提高土壤中 H^+ 含量,H^+ 会与重金属竞争吸附点位,使得土壤对于重金属的吸附减少,增强了重金属的迁移与有效性[48-49]。Liu 等[50]发现微塑料的存在会促进大分子量类腐植质在土壤中积累。类腐植质能与重金属络合生成水溶性复合物,导致可溶性重金属形态的增加,从而增强重金属的迁移性和生物有效性[51]。

可以看出,微塑料会促进重金属在土壤中的迁移转化,进而影响重金属生物有效性和生态安全性。但目前对于不同的土壤介质环境条件下,不同来源的微塑料类型对重金属环境行为的影响,还有待开展系统研究。

1.2.2　微塑料对有机污染物的影响

微塑料与环境中有机污染物的相互作用是近年关注的热点。大量研究表明微塑料能够通过疏水分配作用、静电作用、氢键作用、π-π 作用、范德华分

子间作用力等吸附多环芳烃、农药、除草剂及抗生素等多种类型有机物[52-53]。Šunta 等[54]研究了两种微塑料(聚酯纤维和聚丙烯)与三种农药(啶虫脒、氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺)在冲积土环境中的相互作用,结果表明农药在土壤中微塑料上的吸附现象普遍存在,吸附效果取决于辛醇/水分配系数,吸附量最高的是疏水性最强的农药,这意味着存在农药通过微塑料在土壤系统中进行迁移的风险。类似地,Liu 等[55]研究了纳米级塑料微粒作为污染物载体发生共运移的潜在环境风险,发现低浓度聚苯乙烯纳米颗粒增强了非极性化合物(芘)和弱极性化合物(2,2,4,4-四溴二苯醚)的迁移,但对其他三种极性化合物(双酚 A、双酚 F 和 4-壬基酚)基本没有影响。这可能是因为极性化合物倾向于表面吸附,在微塑料迁移过程中解吸;而非极性/弱极性化合物更倾向于吸附在聚苯乙烯玻璃状聚合结构的内部基质中,与微塑料纳米颗粒共迁移。Chen 等[55]通过研究聚乙烯和聚苯乙烯微塑料以及土壤颗粒对三氯生(TCS)的吸附行为,揭示了在微塑料-土壤体系中,三氯生更倾向于吸附在微塑料上,但由于相互作用较弱,吸附在微塑料上的三氯生易解吸到土壤溶液中,从而证实了微塑料可能是土壤中三氯生的来源载体并会加重土壤污染。因此,有必要进一步研究微塑料是否会增强土壤中农药的毒性及微塑料吸附农药后对土壤动物的联合毒性效应。

土壤环境因素会影响微塑料对有机物的吸附,并影响有机物的环境行为。例如,当环境 pH 值超过了微塑料的零电荷点,微塑料表面带负电荷,会通过静电作用吸引正电荷有机污染物;如果环境 pH 值超过有机污染物的解离常数时,这些有机污染物会被去质子化,引起静电排斥,从而抑制微塑料的吸附[56-57]。Zhu 等[58]根据聚乙烯微塑料在砂壤土和水溶液中对十溴二苯醚(BDE-209)的吸附动力学和热力学实验,揭示了吸附过程发生在聚乙烯微塑料非均质表面及内部,而腐植酸分子作为大分子化合物,可以优先覆盖微塑料表面并占据吸附位点,从而抑制微塑料对 BDE-209 的吸附。

基于上述研究可以得出,微塑料对污染物的吸附/解吸作用会极大影响其环境行为,在污染控制和环境治理时必须考虑微塑料及污染物的共存状况下的相互影响作用。但是,目前关于不同土壤介质及环境因素对污染物在微塑料上的吸附/解吸/迁移行为的影响还缺乏系统的对比研究,相关作用机制也同样需要进一步深入探究。

2　老化作用对微塑料环境行为的影响

2.1　老化作用对微塑料迁移行为的影响

微塑料在自然环境中不可避免地会经历老化,这些老化作用包括物理磨损(物理风化)、紫外线辐射(光氧化)、生物降解(土壤微生物作用),以及化学氧化(热氧化、臭氧氧化)等[59-60]。

微塑料的物理化学性质,如尺寸、形貌、疏水性、表面官能团等,会随着老化过程发生变化,从而影响其迁移行为[18,61]。Ren 等[62]对比了过硫酸盐氧化(PS)、紫外线光照(UV)和紫外线-过硫酸盐氧化(UVPS)三种老化作用对聚苯乙烯微塑料在砂壤土和黏壤土中迁移特征的影响,发现老化后的微塑料比老化前表现出更强的迁移能力,这是因为老化作用增加了微塑料表面的含氧官能团(如—COOH),从而增强与土壤颗粒之间的静电斥力。

除了光老化和氧化老化,土壤胶体(天然有机质、矿物等)与微塑料之间的异质聚集,也会导致微塑料表面性质及结构发生改变而老化,进而影响微塑料的迁移行为。Wu 等[63]发现腐植酸能够附着在微塑料表面,为微塑料提供更多的负电荷,并通过静电吸引促进带正电荷的微塑料异质聚集。Ma 等[64]通过柱实验证实了天然有机质能够附着在微塑料和石英砂上,致使微塑料与多孔介质间发生静电排斥作用,从而促进微塑料的迁移。Li 等[65]探究了不同的条件下,微塑料-膨润土异质团聚体的形成对微塑料迁移的影响,发现在低离子强度条件下形成的小的微塑料-膨润土异质聚集体,增加了微塑料作为移动载体的迁移量;而高离子强度条件下形成的大尺寸异质聚集体,导致微塑料迁移率降低,并发现腐植酸可以抑制更大粒径微塑料-膨润土异质聚集体的形成。据报道,高岭石、赤铁矿和针铁矿等矿物也会与微塑料形成异质聚集体,改变微塑料的迁移量[66-67]。虽然已有的研究表明,吸附在微塑料上的土壤胶体会改变微塑料表面电荷分布与粒径,但实际上异质聚集对微塑料迁移的影响,以及主导因素在很大程度上还不清楚,这需要进一步的调查。

此外,Yan 等[33]指出自然老化过程可以改变微塑料尺寸和形状,进而影响其迁移行为,并在土壤淋洗试验中证实了较小的杆状塑料纤维的迁移距离最远。生物降解在微塑料的老化过程中发挥着重要的作用。不同的环境气候条件产生不同的微生物群落,从而影响微塑料的生物降解,致使其老化特性不尽相同[68]。但是,很少有学者研究不同表生地球化学作用下,微塑料的老化特性及相应迁移行为的变

化。仅 Alimi 等[69]通过模拟寒冷气候条件,发现冻融循环会促使聚苯乙烯微塑料发生团聚,降低其在土壤中的迁移能力。同时,雨水淋滤、干湿循环、冻融循环等过程会弱化土壤基质,促进微塑料的迁移[69-71]。因此,要综合考虑不同气候条件造成的微塑料老化及土壤结构改变这两方面因素对微塑料迁移行为的影响。

如上所述,不同老化过程的微塑料具有不同的老化特性,且经历不同老化过程的微塑料在土壤中的迁移机制存在差异。因此,深入研究微塑料的多种老化机制,明确老化作用对微塑料迁移行为的影响,有助于更好地理解微塑料的环境归趋。

2.2　老化作用对微塑料吸附环境污染物的影响

老化过程显著改变了微塑料物理化学性质,进而会影响与环境污染物的相互作用。一般来说,老化作用可以增加微塑料表面负电荷,影响其与污染物之间的静电相互作用。Lang 等[72]根据不同氧化老化时间的聚苯乙烯微塑料吸附重金属实验,揭示了微塑料对 Cd^{2+} 的吸附主要发生在表面,随着老化作用加剧,更多的吸附位点随之暴露,从而明显增强了微塑料对 Cd^{2+} 的吸附。Jiang 等[73]对比了紫外线照射(UV)、紫外线结合双氧水($UV + H_2O_2$)等老化条件下,磺胺类化合物(SAs)在原始和老化微塑料[热塑性聚氨酯(TPUs)、聚酰胺(PAs)]上的吸附行为,发现老化作用提高了 TPUs 的吸附能力,但降低了 PAs 的吸附能力。这是由于老化减弱了 PAs 的静电作用而增强了 TPUs 的氢键作用,说明老化作用对不同类型微塑料性能的影响存在差异,这方面应当引起研究者的重视。

除了影响静电相互作用,老化过程还能促进微塑料生成更多的含氧官能团从而降低其疏水性,进而增强对亲水性有机污染物的吸附,降低疏水性污染物的吸附量[52]。Liu 等[74]指出紫外老化会导致聚苯乙烯和聚氯乙烯(PVC)微塑料增强对亲水性环丙沙星(CIP)的吸附能力。Liu 等[29]发现紫外或臭氧老化可增加聚苯乙烯纳米级微塑料表面负电荷和亲水性,从而增强了与非极性和极性污染物的结合,由老化作用引起的表面性质变化也会通过极性相互作用(如氢键)导致污染物的不可逆吸附,并进一步增强了微塑料与有机污染物的共迁移能力。因此,开展不同类型老化微塑料与有机污染物之间的吸附行为对比研究具有重要意义。

上述研究表明,微塑料的老化作用对环境污染物的吸附和迁移产生重要影响,但是土壤环境中微塑料的老化过程较为复杂,目前在研究老化作用的影响时,采用的实验室模拟手段比较单一,因此,开发适宜的加速老化模拟手段并与实际环境相符尤为重要,同时考虑土壤环境条件(如含水率、矿物质、微生物和理化性质等)对微塑料老化过程的影响也非常必要。

2.3　老化作用对微塑料释放内源污染物的影响

微塑料与外部环境污染物发生相互作用,其迁移行为会带来环境风险。实际上,微塑料自身内源有害物质的释放带来的环境风险也不容忽视[75]。由于老化作用导致微塑料聚合物链的断裂,会使得添加剂或中间体浸出释放[76-77],如表 1 列举了微塑料老化后几种典型添加剂的释放情况。例如,Luo 等[78]分别测定了未老化、光老化两周(14 天)和光老化四周(28 天)微塑料浸出的 Pb^{2+} 和 Cr^{6+} 的浓度,其中 Pb^{2+} 的释放量分别为 17.3 ± 0.1μg/g、56.7 ± 3.2μg/g 和 81.4 ± 4.3μg/g,Cr^{6+} 的释放量分别为 2.3 ± 0.1μg/g、6.9 ± 0.4μg/g 和 12.1 ± 0.6 μg/g,结果表明,光老化促进了微塑料中铬酸铅的释放,且老化时间越长,Cr 和 Pb 的释放量越多。Rani 等[79]研究发现,在阳光照射下,暴露于自然开阔海面的泡沫聚苯乙烯(EPS),会向海水中释放大量六溴环十二烷(HBCDD)。而且风化作用会导致 EPS 表面进一步的侵蚀和破碎,增强了 HBCDD 的浸出。邻苯二甲酸酯(PAE)是塑料中的最主要添加剂,其在环境中的广泛污染已引起全球关注。Cao 等[83]研究了不同种类微塑料释放邻苯二甲酸酯的能力,释放的浓度范围在 50.3 ~ 6660ng/g,发现聚乙烯微塑料释放的 PAE 浓度最高,而聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯微塑料的释放浓度较低。此外,Wang 等[42]则指出在紫外线照射下聚乙烯微塑料能够释放 PAE,说明在实际环境中,微塑料中邻苯二甲酸酯的释放不仅与塑料内部特性有关,还受外部环境因素的影响。

综上,紫外光、氧环境、温度等可通过加速微塑料老化,促进内源污染物的释放[80]。目前已经开展的关于微塑料内源污染物的浸出研究,大多局限于海洋环境,很难见到微塑料内源物质在陆地生态系统中的释放研究。最新(2021 年)仅有一例报道,Meng 等[84]研究了氧化加速老化与水稻土中自然老化对聚氯乙烯(PVC)微塑料中内源重金属释放的影响,结果表明氧化加速老化和自然老化都会导致聚氯乙烯中 Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的释放。因此,老化作用对土壤中微塑料内源有害物质释放的影响是今后需要关注的重点领域。

表 1　微塑料老化过程中添加剂的释放行为相关研究

Table 1　Study on release behavior of additives during microplastics ageing

塑料类型	老化方式	老化时间	浸出物质	释放浓度	参考文献
聚乙烯	氙灯老化	28 天	Cr^{6+}	12.1μg/g	[78]
		28 天	Pb^{2+}	81.4μg/g	
泡沫聚苯乙烯	日照	180 天	六溴环十二烷(HBCDD)	34.4μg/g	[79]
	海面暴露	180 天	六溴环十二烷(HBCDD)	42.9μg/g	
聚乙烯	海水侵蚀及光照	90 天	邻苯二甲酸二异丁酯(DsBP)	83.4ng/g	[80]
		90 天	邻苯二甲酸二正丁酯(DnBP)	120.1ng/g	
聚氯乙烯	海水侵蚀及光照	90 天	邻苯二甲酸二甲酯(DMP)	9.5 ± 1.4ng/g	[80]
		90 天	邻苯二甲酸二乙酯(DEP)	68.9 ± 10.3ng/g	
聚氯乙烯	水沙侵蚀老化	20 天	Pb^{2+}	5.1μg/g	[81]
苯乙烯	热老化(350℃)	/	乙烷	1922.8μg/g	[82]

3　结论与展望

本文对近年土壤中微塑料相关研究进行总结,在吸附迁移行为、老化作用影响等方面获得以下认识。①干燥气候及土壤生物活动造成的土壤开裂、土壤矿物及有机质对微塑料静电排斥作用以及异质聚集带来的密度增加,都会促进微塑料垂直迁移;②微塑料能够吸附携带相关污染物共迁移,将污染物运移到不同的地点,甚至是生物体内;③长期的风化作用、紫外线照射、物理磨损以及生物降解,会导致微塑料表面电性及疏水性发生变化,微塑料的迁移吸附特性也随之改变。上述老化作用还会促使微塑料聚合物链的断裂,加速内源有害物质的释放,带来更严重的生态风险。因此,在评估微塑料的环境风险时,必须要综合考虑微塑料的吸附迁移特性及老化过程的影响。

然而,相关研究存在一定的局限性。目前有关微塑料迁移的研究多在实验室条件下开展,实验时间和空间有限,不能很好地代表实际环境的复杂性。此外,研究对象大多以聚苯乙烯微球作为代表,其他类型和来源的塑料颗粒需要更多地被考虑。与此同时,微塑料在迁移过程中对污染物的吸附/解吸会带来更大的环境风险,但人们对共迁移的研究通常是二元体系下(微塑料和特定污染物)进行的,忽略了环境因素(如 pH、天然有机质等)的影响。基于此,建议今后加强以下几个方面的研究工作。

(1) 不同土壤环境中多因素耦合条件下,各种微塑料迁移行为的研究。

(2) 不同环境条件下,微塑料与环境污染物的相互作用机制研究。特别是加强不同土壤介质及环境因素对污染物在微塑料上的吸附/解吸/迁移行为的影响研究。

(3) 微塑料的老化对其吸附能力和迁移性有显著影响,需要通过实验模拟手段,研究环境中不同老化作用对微塑料性质和环境行为的影响。

(4) 加强微塑料内源污染物在不同环境中的释放研究,揭示老化作用对内源污染物释放行为的影响。

4　参考文献

[1] Geyer R. Production, use, and fate of synthetic polymers [M]//Plastic waste and recycling. Academic Press, 2020:13 - 32.

[2] Sutherland W J, Clout M, Isabelle M, et al. A horizon scan of global conservation issues for 2010[J]. Trends Ecology & Evolution, 2010, 25(1):1 - 7.

[3] Abuwatfa W H, AI - Muqbel D, AI - Othman A, et al. Insights into the removal of microplastics from water using biochar in the era of COVID - 19: A mini review[J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2021, 4:100151.

[4] Padervand M, Lichtfouse E, Robert D, et al. Removal of microplastics from the environment: A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18 (3): 807 - 828.

[5] Akdoan Z, Guven B. Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs[J]. Environmental Pollution, 2019, 254 (Part A):113011.

[6] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. Science of the Total Environment, 2017, 586:127 - 141.

[7] Lahive E, Walton A, Horton A A, et al. Microplastic

particles reduce reproduction in the terrestrial worm Enchytraeus crypticus in a soil exposure [J]. Environmental Pollution,2019,255:113174.

[8] Jiang X F, Chen H, Liao Y C, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant Vicia faba[J]. Environmental Pollution,2019,250:831.

[9] Klein M, Fischer E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany [J]. Science of the Total Environment,2019,685:96 – 103.

[10] Siegfried M,Koelmans A A,Besseling E,et al. Export of microplastics from land to sea: A modelling approach [J]. Water Research,2017,127:249 – 257.

[11] Rochman C M. Microplastics research – from sink to source [J]. Science,2018,360(6384):28 – 29.

[12] 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.
Hao A H,Zhao B W,Zhang J,et al. Research progress on pollution status and ecological risk of microplastics in soil [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (4): 1100 – 1111.

[13] 杨杰,李连祯,周倩,等. 土壤环境中微塑料污染:来源、过程及风险[J]. 土壤学报,2021,58(2):281 – 298.
Yang J, Li L Z, Zhou Q, et al. Microplastics contamination of soil environment: Sources, processes and risks [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 281 – 298.

[14] Fuller S,Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. Environmental Science & Technology,2016,50(11):5774 – 5780.

[15] Wang J, Li J Y, Liu S T, et al. Distinct microplastic distributions in soils of different land – use types:A case study of Chinese farmlands [J]. Environmental Pollution,2021,269:116199.

[16] Ee – Ling N, Esperanza H L, Simon M E, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2018,627:1377 – 1388.

[17] Rillig M C,Ingraffia R,de Souza Machado A A. Micro – plastic incorporation into soil in agroecosystems [J]. Frontiers in Plant Science,2017,8:1805.

[18] 董姝楠,夏继红,王为木,等. 土壤 – 地下水中微塑料迁移的影响因素及机制研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(14):1 – 8.
Dong S N,Xia J H,Wang W M,et al. Review on impact factors and mechanisms of microplastic transport in soil and groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(14):1 – 8.

[19] 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,2021,29(6):961 – 969.
Xu L,Li H X,Han L H,et al. Research progress on the adsorption and desorption of typical pollutants on microplastics[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2021,29(6):961 – 969.

[20] Lwanga E H,Vega J M,Quej V K,et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. Scientific Reports,2017,7(1):1 – 7.

[21] McDougall L,Thomson L,Brand S,et al. Adsorption of a diverse range of pharmaceuticals to polyethylene microplastics in wastewater and their desorption in environmental matrices [J]. Science of the Total Environment,2022,808:152071.

[22] Wang T,Ma Y N,Ji R. Aging processes of polyethylene mulch films and preparation of microplastics with environmental characteristics [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107:736 – 740.

[23] Xu S Y,Zhang H,He P J,et al. Leaching behaviour of bisphenol A from municipal solid waste under landfill environment [J]. Environmental Technology, 2011, 32 (11):1269 – 1277.

[24] Roy P K,Hakkarainen M,Varma I K,et al. Degradable polyethylene: Fantasy or reality [J]. Environmental Science & Technology,2011,45(10):4217 – 4227.

[25] Luo H W,Zhao Y Y,Li Y,et al. Aging of microplastics affects their surface properties, thermal decomposition, additives leaching and interactions in simulated fluids [J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136862.

[26] Dong Z Q,Qiu Y P,Zhang W,et al. Size – dependent transport and retention of micron – sized plastic spheres in natural sand saturated with seawater [J]. Water Research,2018,143(1):518 – 526.

[27] Zhang G S,Zhang F X,Li X T. Effects of polyester micro – fibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment [J]. Science of the Total Environment,2019,670:1 – 7.

[28] Dong Z Q, Zhu L, Zhang W, et al. Role of surface functionalities of nanoplastics on their transport in seawater – saturated sea sand [J]. Environmental Pollution,2019,255(1):113177.

[29] Liu J,Zhang T,Tian L L,et al. Aging significantly affects mobility and contaminant – mobilizing ability of

nanoplastics in saturated loamy sand[J]. Environmental Science & Technology,2019,53(10):5805 – 5815.

[30] Zhang M,Xu L H. Transport of micro – and nanoplastics in the environment: Trojan – Horse effect for organic contaminants[J]. Environmental Science and Technology, 2020,52(5):1 – 37.

[31] Blasing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. Science of the Total Environment,2018,612(1):422 – 435.

[32] Ren Z F,Gui X Y,Xu X Y,et al. Microplastics in the soil – groundwater environment: Aging, migration, and co – transport of contaminant—A critical review [J]. Journal of Hazardous Materials,2021,419:126455.

[33] Yan X Y,Yang X Y,Tang Z,et al. Downward transport of naturally – aged light microplastics in natural loamy sand and the implication to the dissemination of antibiotic resistance genes[J]. Environmental Pollution, 2020,262:114270.

[34] Wu X L,Lyu X Y,Li Z Y,et al. Transport of polystyrene nanoplastics in natural soils: Effect of soil properties, ionic strength and cation type[J]. Science of the Total Environment,2020,707:136065.

[35] Hou J,Xu X Y,Lan L,et al. Transport behavior of micro polyethylene particles in saturated quartz sand: Impacts of input concentration and physicochemical factors[J]. Environmental Pollution,2020,263:114499.

[36] Lwanga E H,Gertsen H,Gooren H,et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of Lumbricus terrestris [J]. Environmental Pollution, 2017, 220: 523 – 531.

[37] Rillig M C,Ziersch L,Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. Scientific Reports, 2017, 7 (1):1 – 7.

[38] Maaβ S,Daphi D,Lehmann A. Transport of microplastics by two collembolan species[J]. Environmental Pollution, 2017,225:456 – 459.

[39] Zhu D,Bi Q F,Xiang Q,et al. Trophic predator – prey relationships promote transport of microplastics compared with the single Hypoaspis aculeifer and Folsomia candida [J]. Environmental Pollution,2018,235:150 – 154.

[40] Chae Y, An Y J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review [J]. Environmental Pollution, 2018, 240: 387 – 395.

[41] 贺灵,吴超,曾道明,等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. 岩矿测试,2021, 40(3):384 – 396.
He L, Wu C, Zeng D M, et al. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China[J]. Rock and Mineral Analysis,2021,40(3):384 – 396.

[42] Wang Y,Wang X J,Li Y,et al. Biofilm alters tetracycline and copper adsorption behaviors onto polyethylene microplastics[J]. Chemical Engineering Journal,2020, 392:123808.

[43] Dong Y M, Gao M L, Song Z G, et al. Adsorption mechanism of As (Ⅲ) on polytetrafluoroethylene particles of different size[J]. Environmental Pollution, 2019,254(Part A):112950.

[44] Zhou Y F, Yang Y Y, Liu G H, et al. Adsorption mechanism of cadmium on microplastics and their desorption behavior in sediment and gut environments: The roles of water pH, lead ions, natural organic matter and phenanthrene [J]. Water Research, 2020, 184: 116209.

[45] Hodson M E, Duffus – Hodson C A, Clark A, et al. Plastic bag derived – microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates[J]. Environmental Science & Technology,2017,51(8):4714 – 4721.

[46] Zhang S W, Han B, Sun Y H, et al. Microplastics influence the adsorption and desorption characteristics of Cd in an agricultural soil [J]. Journal of Hazardous Materials,2019,388:121775.

[47] Ma X Y, Zhou X H, Zhao M J, et al. Polypropylene microplastics alter the cadmium adsorption capacity on different soil solid fractions [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2022, 16 (1): 1 – 12.

[48] Yu H Y,Liu C,Zhu J,et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. Environmental Pollution,2016,209(15):38 – 45.

[49] 刘冬,贺灵,文雪琴,等. 金衢盆地典型地区土壤 – 稻米重金属含量及土壤酸碱度的影响研究[J]. 岩矿测试,2021,40(6):883 – 893.
Liu D, He L, Wen X Q, et al. Concentration of heavy metals in soil and rice and its influence by soil pH in Jinqu Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40 (6):883 – 893.

[50] Liu H F,Yang X M,Liu G B,et al. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil [J]. Chemosphere, 2017, 185: 907 – 917.

[51] 曹宁,孙彬彬,曾道明,等. 珠江三角洲西部典型乡镇稻米与根系土重金属元素含量关系研究[J]. 岩矿测试,2020,39(5):739 – 752.

Cao N, Sun B B, Zeng D M, et al. Study on the relationship between the contents of heavy metals in rice and roots soils in typical townships in the western Pearl River Delta[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(5):739 – 752.

[52] 陈雅兰,孙可,高博. 微塑料吸附机制研究进展[J]. 环境化学,2021,40(8):2271 – 2287.
Chen Y L, Sun K, Gao B. Sorption behavior, mechanisms, and models of organic pollutants and metals on microplastics: A review [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(8):2271 – 2287.

[53] Fu L N, Li J, Wang G Y, et al. Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 217:112207.

[54] Šunta U, Prosenc F, Trebše P, et al. Adsorption of ace – tamiprid, chlorantraniliprole and flubendiamide on different type of microplastics present in alluvial soil [J]. Chemosphere, 2020, 261:127762.

[55] Chen X, Gu X N, Bao L J, et al. Comparison of adsorption and desorption of triclosan between microplastics and soil particles[J]. Chemosphere, 2021, 263:127947.

[56] Hu B Y, Li Y X, Jiang L S, et al. Influence of micro – plastics occurrence on the adsorption of 17β – estradiol in soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400: 123325.

[57] Wu P F, Cai Z W, Jin H B, et al. Adsorption mechanisms of five bisphenol analogues on PVC microplastics[J]. Science of the Total Environment, 2018, 650:671 – 678.

[58] Zhu Y F, Li X X, Wang L P, et al. Adsorption of BDE – 209 to polyethylene microplastics: Effect of microplastics property and metal ions[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2021, 232(12):1 – 10.

[59] Andrady A L. The plastic in microplastics: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119(1):12 – 22.

[60] Jahnke A, Arp H P H, Escher B I, et al. Reducing uncertainty and confronting ignorance about the possible impacts of weathering plastic in the marine environment [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, 4(3):85 – 90.

[61] Duan J J, Bolan N, Li Y, et al. Weathering of microplastics and interaction with other coexisting constituents in terrestrial and aquatic environments[J]. Water Research, 2021, 196:117011.

[62] Ren Z F, Gui X Y, Wei Y Q, et al. Chemical and photo – initiated aging enhances transport risk of microplastics in saturated soils: Key factors, mechanisms, and modeling [J]. Water Research, 2021, 202:117407.

[63] Wu J Y, Jiang R F, Lin W, et al. Effect of salinity and humic acid on the aggregation and toxicity of polystyrene nanoplastics with different functional groups and charges [J]. Environmental Pollution, 2019, 245:836 – 843.

[64] Ma J, Qiu Y, Zhao J Y, et al. Effect of agricultural organic inputs on nanoplastics transport in saturated goethite – coated porous media: Particle size selectivity and role of dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(6):3524 – 3534.

[65] Li M, Zhang X W, Yi K X, et al. Transport and deposition of microplastic particles in saturated porous media: Co – effects of clay particles and natural organic matter [J]. Environmental Pollution, 2021, 287:117585.

[66] Li M, He L, Zhang M Y, et al. Cotransport and deposition of iron oxides with different – sized plastic particles in saturated quartz sand [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(7):3547 – 3557.

[67] Li M, He L, Zhang X W, et al. Different surface charged plastic particles have different cotransport behaviors with kaolinite particles in porous media [J]. Environmental Pollution, 2020, 267:115534.

[68] Chen S S, Yang Y T, Jing X Y, et al. Enhanced aging of polystyrene microplastics in sediments under alternating anoxic – oxic conditions [J]. Water Research, 2021, 207:117782.

[69] Alimi O S, Farner J M, Tufenkji N. Exposure of nano – plastics to freeze – thaw leads to aggregation and reduced transport in model groundwater environments[J]. Water Research, 2021, 189:116533.

[70] Tong M P, He L, Rong H F, et al. Transport behaviors of plastic particles in saturated quartz sand without and with biochar/Fe_3O_4 – biochar amendment [J]. Water Research, 2020, 169:115284 – 115294.

[71] O'Connor D, Pan S, Shen Z, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet – dry cycles [J]. Environment Pollution, 2019, 249:527 – 534.

[72] Lang M F, Yu X Q, Liu J H, et al. Fenton aging signi – ficantly affects the heavy metal adsorption capacity of polystyrene microplastics [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722:137762.

[73] Jiang Z S, Huang L L, Fan Y X, et al. Contrasting effects of microplastic aging upon the adsorption of sulfonamides and its mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430(3):132939.

[74] Liu G Z, Zhu Z L, Yang Y X, et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater [J]. Environmental Pollution, 2019, 246:26 – 33.

[75] Prata J C, da Costa J P, Lopes I, et al. A one health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health [J]. Science of the Total Environment, 2020, 777: 146094.

[76] Hahladakis J N, Velis C A, Weber R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 179 – 199.

[77] Hermabessiere L, Dehaut A, Paul – Pont I, et al. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review [J]. Chemosphere, 2017, 182: 781 – 793.

[78] Luo H W, Li Y, Zhao Y Y, et al. Effects of accelerated aging on characteristics, leaching, and toxicity of commercial lead chromate pigmented microplastics [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113475.

[79] Rani M, Shim W J, Jang M, et al. Releasing of hexabro – mocyclododecanes from expanded polystyrenes in seawater – field and laboratory experiments [J]. Chemosphere, 2017, 185: 798 – 805.

[80] Paluselli A, Fauvelle V, Galgani F, et al. Phthalate release from plastic fragments and degradation in seawater [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53 (1): 166 – 175.

[81] Nakashima E, Isobe A, Kako S, et al. The potential of oceanic transport and onshore leaching of additive – derived lead by marine macro – plastic debris [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 107 (1): 333 – 339.

[82] Zhan F Q, Zhang H J, Cao R, et al. Release and transformation of BTBPE during the thermal treatment of flame retardant ABS plastics [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53 (1): 185 – 193.

[83] Cao Y R, Lin H J, Zhang K, et al. Microplastics: A major source of phthalate esters in aquatic environments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128731.

[84] Meng J, Xu B L, Liu F, et al. Effects of chemical and natural ageing on the release of potentially toxic metal additives in commercial PVC microplastics [J]. Chemosphere, 2021, 283 (4): 131274.

A Review on Adsorption and Transport of Microplastics in Soil and the Effect of Ageing on Environmental Behavior of Pollutants

HU Tingting, *CHEN Jiawei**

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

HIGHLIGHTS

(1) The transportation of microplastics can be affected by their inherent properties and the soil environments.

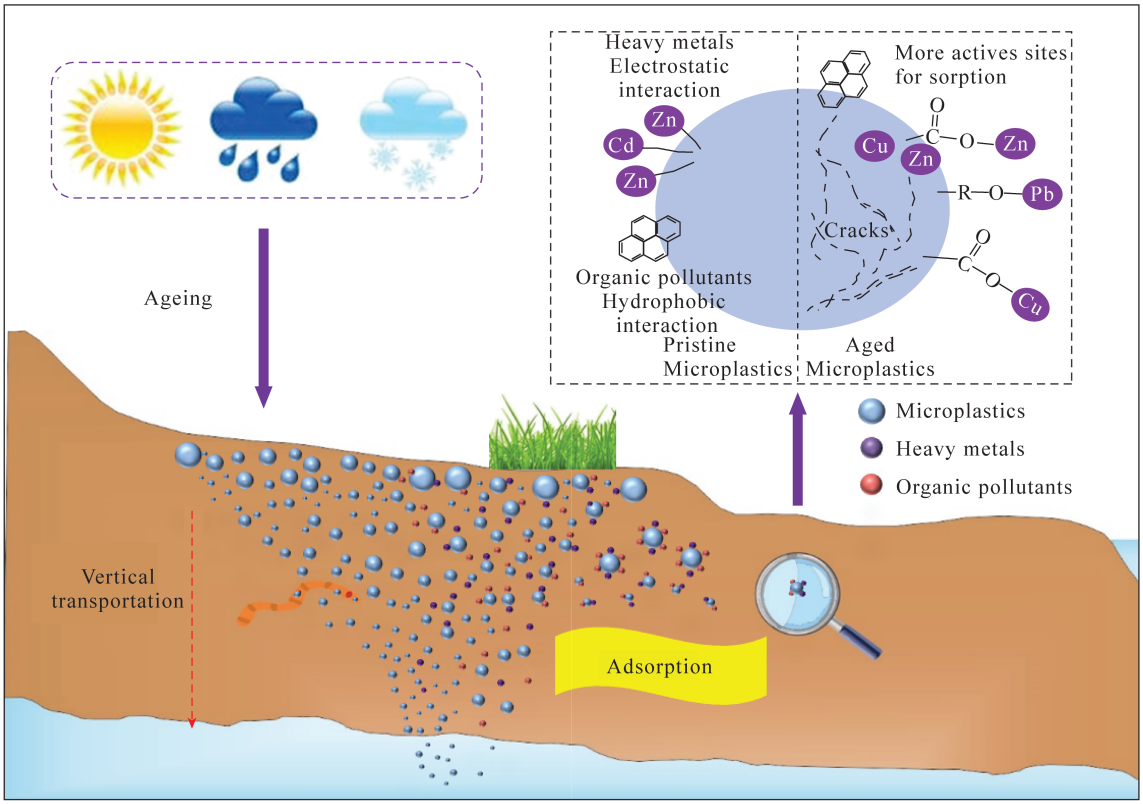
(2) Microplastics can adsorb heavy metals and organic pollutants and co – transport in soil.

(3) The ageing process can impact the microplastics mobility, adsorption capacity, and release of the associated contaminants derived from the microplastics.

ABSTRACT

BACKGROUND: Microplastics, defined as the plastic material with a size of <5mm, have been widely attracting attention due to the high mobility and strong affinity toward pollutants. Microplastics concentrate in soil through plastic film breakage, landfill and atmospheric deposition. Microplastics can migrate downward in soil, and adsorb co – existing pollutants. The ageing of microplastics due to surface geochemical processes, would result in a great threat to the environment.

OBJECTIVES: To comprehensively understand the environmental behavior of microplastics and their potential environmental risks.



METHODS: The key factors controlling vertical transport of microplastics in soil were summarized, including microplastics properties such as the size, shape and functional groups, and soil properties such as the porosity, organic matter and soil minerals. The adsorption of organic pollutants and heavy metals on microplastics and the effect of ageing were analyzed.

RESULTS: The results obtained from recent studies showed that: (1) The transportation of microplastics can be affected by their inherent properties and the soil environments. (2) Microplastics can adsorb heavy metals and organic pollutants, and co - transport in soil, which would change the environmental fate and bioavailability of pollutants. (3) The ageing process can impact the microplastics mobility, adsorption capacity, and the release of the associated contaminants derived from the microplastics. The release of endogenous organics phthalate esters from aged microplastics could reach 50.3 - 6660ng/g, and that of heavy metal Pb^{2+} reach 5.1 - 81.4μg/g.

CONCLUSIONS: In view of the current research and existing problems, this review gives guidance on microplastics transport, adsorption and ageing effect for future studies. (1) The interaction mechanisms between microplastics and pollutants should be elucidated under multi - factor coupling conditions in soil, especially for the influence of different soil types and environmental factors on the adsorption/desorption/migration of pollutants on the microplastics. (2) The effects of different ageing processes on the properties and environmental behavior of the microplastics should be studied by experimental simulation. (3) In order to uncover the effects of aging on the release behavior of endogenous pollutants, the study on the release of endogenous pollutants from microplastics in different ageing environment should be strengthened.

KEY WORDS: microplastics; soil; transport; adsorption; pollutants; ageing