

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜峰峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展

侯宇晴, 李冰*, 王金花*, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生

(山东农业大学资源与环境学院, 山东省高校农业环境重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 作为一种新型环境持久性污染物, 微塑料除自身能够对生态系统产生不良影响外, 其也可与周围环境中的共存污染物形成复合污染, 从而产生更高的生态风险和健康风险。基于农业生态系统视角, 聚焦重金属、农药和抗生素这 3 种农田土壤典型污染物与微塑料的复合污染, 综述了重金属、农药和抗生素在微塑料上的吸附-解吸行为, 探讨了微塑料的结构与性质、污染物的理化性质以及环境条件对重金属、农药和抗生素在微塑料上吸附-解吸行为的影响, 阐述了微塑料对农田土壤中重金属、农药和抗生素生物有效性的影响及内在机制, 指出了当前研究存在的问题和不足并对未来研究方向进行了展望, 可为微塑料与农田土壤典型污染物复合污染的生态风险评估提供科学参考。

关键词: 土壤; 微塑料; 复合污染; 吸附-解吸; 生物有效性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1196-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202302126

Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils

HOU Yu-qing, LI Bing*, WANG Jin-hua*, SONG Wen-hui, WANG Lan-jun, WANG Jun, ZHU Lu-sheng

(Key Laboratory of Agricultural Environment in Universities of Shandong, College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, China)

Abstract: As a new type of environmental persistent pollutant, microplastics can not only have adverse effects on the ecosystem but also form complex pollution with co-existing pollutants in the surrounding environment, resulting in higher ecological and health risks. Based on the perspective of agroecosystems, this study focused on the combined pollution of heavy metals, pesticides, and antibiotics, which are three typical pollutants of farmland soil, as well as microplastics and discussed the adsorption-desorption behavior of heavy metals, pesticides, and antibiotics on microplastics. The influence of the structure and properties of microplastics, the physicochemical properties of pollutants, and environmental conditions on the adsorption and desorption behavior of heavy metals, pesticides, and antibiotics on microplastics was discussed. The influence of microplastics on the bioavailability of heavy metals, pesticides, and antibiotics in farmland soil and the internal mechanism were expounded. The existing problems and shortcomings of current research were pointed out, and the future research direction was proposed. This study can provide a scientific reference for ecological risk assessment of the combined pollution of microplastics and typical pollutants in farmland soil.

Key words: soil; microplastics; combined pollution; adsorption-desorption; bioavailability

塑料因具有质轻便携、性能优良及成本低廉等优点而被广泛应用于工农业生产和日常生活。由于塑料制品化学性质稳定, 在自然环境中难以降解, 并且塑料制品多为一次性使用, 回收率低, 因此随着塑料制品的大量使用, 塑料污染日益严重。据统计, 1950~2017 年期间全球累计产生约 92 亿吨塑料。其中, 79% 的塑料废弃物被填埋或进入自然环境, 12% 的塑料废弃物被焚烧, 仅有 9% 的塑料废弃物被回收利用^[1]。环境中的大块废弃塑料制品在物理、化学和生物等的共同作用下可进一步破碎、裂解成细小颗粒或碎片, 当尺寸小于 5 mm 时即称为微塑料^[2]。此外, 为了满足人类需求而直接生产的小尺寸塑料颗粒, 例如家用清洁剂、化妆品和个人护理品中的塑料微珠以及作为工业原料的塑料颗粒, 也是环境中微塑料的一个重要来源^[3]。因微塑料具有尺寸小、数量多、分布广以及毒理特点复杂等特点, 微塑料污染引起了全球范围内的广泛关注^[4, 5]。在 2015 年召开的第二届联合国环境大会上, 微塑料污染被列入环境与生态科学研究领域的第二大科学问题, 成为与全球

气候变化和臭氧耗竭等并列的全球重大环境问题。

继海洋和淡水环境后, 土壤环境微塑料污染也逐渐受到重视^[6, 7]。近年来, 有研究者指出微塑料可通过废弃塑料制品的破碎和裂解、污泥农用、有机肥料施用、农业灌溉、轮胎磨损以及大气沉降等途径进入土壤环境^[8-10]。土壤, 尤其是农田土壤, 可能是比海洋更重要的微塑料的汇。农田土壤中微塑料的逐年积累将会对农田土壤生态系统产生重要影响, 进而对粮食的生产安全和质量安全构成潜在威胁^[11-13]。因此, 农田土壤微塑料污染作为一种新型环境问题逐渐受到重视, 并成为现今人们研究的热点。微塑料对农田土壤生态系统产生的上述影响不仅是由微塑料自身引起的, 其也可与农田土壤中存在的污染物形成复合污染, 从而对农田土壤生态系统产

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277039, 42177266); 泰山学者工程专项(tstp20221118)

作者简介: 侯宇晴(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染物的环境行为与生物效应, E-mail: 1627507396@qq.com

* 通信作者, E-mail: libing201709@sdau.edu.cn; wjh@sdau.edu.cn

生更高的风险。

本文基于农田生态系统视角,聚焦重金属、农药和抗生素这3种农田土壤典型污染物与微塑料的复合污染,论述了重金属、农药和抗生素在微塑料上的吸附-解吸行为,探讨了微塑料的结构与性质、污染物的理化性质以及环境条件对重金属、农药和抗生素在微塑料上吸附-解吸行为的影响,阐述了微塑料对农田土壤中重金属、农药和抗生素生物有效性的影响及内在机制,指出了当前研究存在的问题和不足并对未来研究方向进行了展望,以期微塑料与农田土壤典型污染物复合污染的生态风险评估提供科学参考。

1 农田土壤中典型污染物在微塑料上的吸附-解吸行为

吸附和解吸是决定污染物在土壤中赋存状态的一对关键过程,能够影响土壤中污染物的生物有效性,污染物向大气、地下水与地表水的迁移以及化学反应活性。众多研究已表明,微塑料具有粒径小、比表面积大、疏水性强等特性,对环境中的多环芳烃、

多氯联苯、重金属、农药和抗生素等多种污染物具有较强的吸附能力,其吸附机制包括疏水相互作用、静电相互作用、氢键作用、表面络合、阳离子- π 键相互作用、 π - π 相互作用、范德华力以及微孔填充^[14-19](图1)。一般认为,吸附态污染物只有通过解吸过程重新从吸附剂相中释放出来才能被生物利用,从而具有生态风险。已有研究指出,当环境条件发生变化或微塑料被动物摄食进入动物消化系统后,吸附在微塑料上的污染物又会解吸下来,重新释放进入环境或动物消化道内^[14,20]。并且,与污染物在微塑料上的吸附过程相比,污染物在微塑料上解吸强度决定污染物从微塑料表面的再释放程度,进而直接影响污染物在环境中的流动性和生物有效性^[21]。微塑料的结构与性质(种类、粒径、结晶度与玻璃化温度以及老化程度等)和污染物的理化性质是影响污染物在微塑料上吸附-解吸过程的关键因素。同时,不断变化的环境条件[pH、盐度以及溶解性有机质(DOM)等]也会对污染物在微塑料上的吸附-解吸过程产生重要影响^[14,15]。

1.1 重金属在微塑料上的吸附-解吸行为

农田土壤中重金属主要包括汞(Hg)、镉(Cd)、

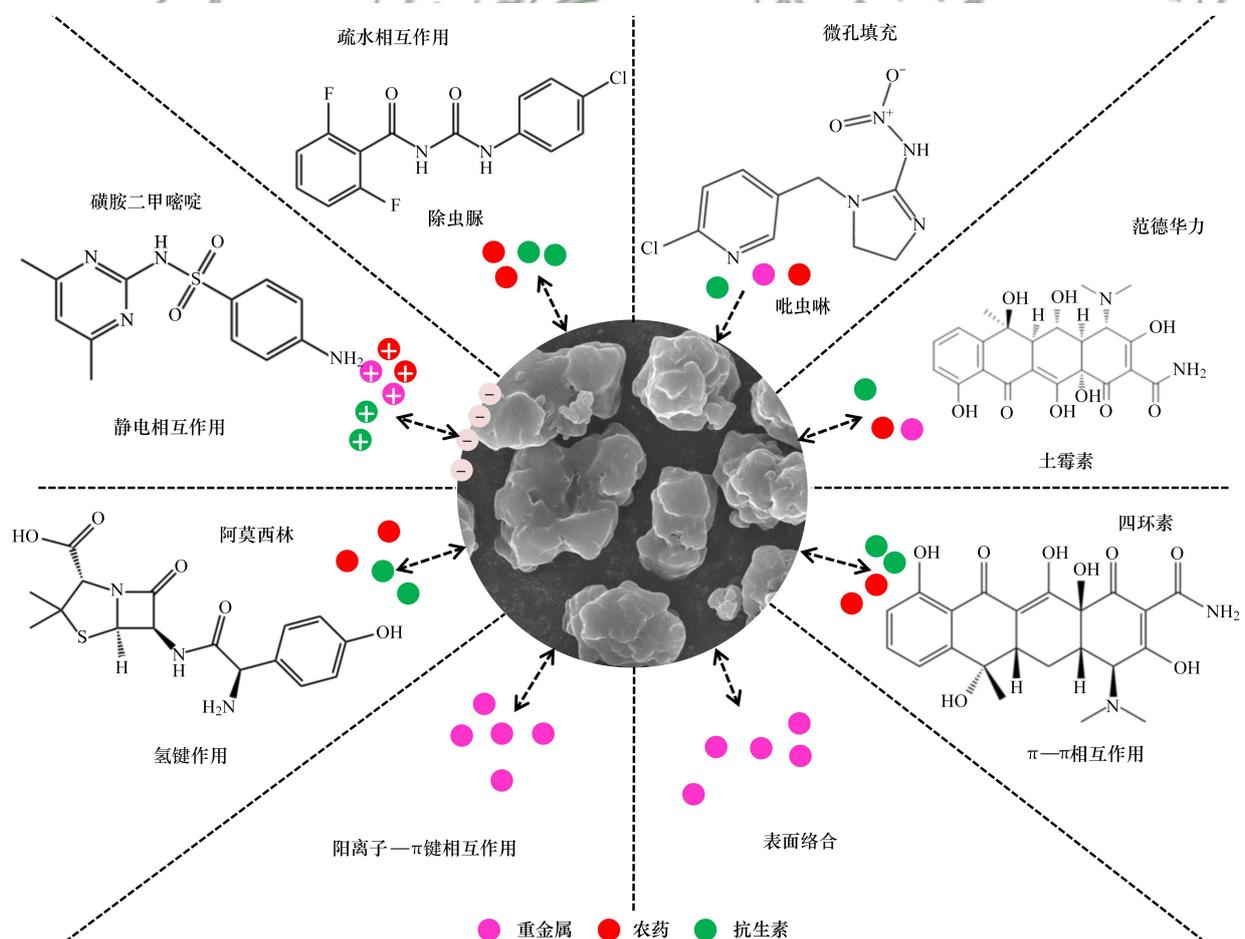


图1 微塑料对重金属、农药及抗生素的吸附机制

Fig. 1 Adsorption mechanism of microplastics to heavy metals, pesticides, and antibiotics

铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)和镍(Ni)等,主要来自于成土母质和成土过程以及工农业生产等.已有研究表明,微塑料对土壤中的多种重金属具有较强的吸附能力,其吸附机制主要包括静电相互作用、表面络合、阳离子- π 键相互作用、范德华力和微孔填充等(表1).例如,Guo等^[22]研究表明,Cd在聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)和聚苯乙烯(PS)微塑料上的吸附符合准二级动力学模型,Henry模型和Freundlich模型较Langmuir模型能够更好地拟合Cd在PE、PP、PVC和PS微塑料上的吸附等温线,并且吸附作用受表面吸附和分布效应的控制.Zhou等^[23]研究表明,准二级动力学模型能够较好地描述Cd在PVC、PS、聚酰胺(PA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯

(ABS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)微塑料上吸附过程, Freundlich模型较Langmuir模型能够更好地拟合Cd在PVC、PS、PA、ABS和PET微塑料上的吸附等温线,并且静电相互作用和 π - π 相互作用是微塑料吸附Cd的主要吸附机制,含氧官能团在微塑料吸附Cd的过程中也起着至关重要的作用. Li等^[24]研究表明, Freundlich模型较Langmuir模型能够更好地拟合Cr在紫外照射老化与未老化PE、PS和PA微塑料上的吸附等温线,并且静电相互作用、表面络合以及范德华力在PE、PS和PA微塑料吸附Cr过程中起着重要作用.

微塑料对土壤中重金属的吸附作用主要受微塑料的结构与性质(种类、粒径、结晶度与玻璃化温度

表1 重金属在微塑料上的吸附行为及机制¹⁾

Table 1 Adsorption behavior and mechanism of heavy metals on microplastics

微塑料类型	重金属	微塑料粒径	吸附动力学模型	吸附等温线模型	吸附机制	文献
PE、PP、PVC和PS	Cd	约74 μm	准二级动力学模型	Henry模型和Freundlich模型	范德华力、静电相互作用、 π - π 相互作用和疏水相互作用	[22]
PVC、PS、PA、ABS和PET	Cd	43 μm 和74 μm	准二级动力学模型	Freundlich模型	静电相互作用、 π - π 相互作用,含氧官能团在微塑料吸附重金属中也发挥了重要作用	[23]
PE、PS和PA(原始、老化)	Cr	约150 μm	—	Freundlich模型	静电相互作用、范德华力和表面络合	[24]
PS和PVC(老化)	Cu	75 μm	准二级动力学模型(PS) 准一/二级动力学模型(PVC)	Freundlich模型(PS) Langmuir模型(PVC)	静电相互作用和表面络合	[25]
PS和PET	Cu	25 μm 和180 μm	准二级动力学模型	Freundlich模型	物理吸附	[26]
PE(原始、老化)	Cu	75 ~ 140 μm	颗粒内扩散模型	Freundlich模型(原始、大气环境老化) Langmuir模型(水环境、土壤环境老化)	表面络合和静电相互作用	[27]
PS(含六溴环十二烷)	Cd	—	准二级动力学模型	Langmuir模型	静电相互作用	[28]
PP	Pb、Zn、Cu和Cd	850 μm	准二级动力学模型	Langmuir模型(Pb) Freundlich模型(Cd) Henry模型(Cu、Zn)	—	[29]
HDPE	Cd	48 ~ 58 μm 、100 ~ 154 μm 、 0.6 ~ 1.0 mm和1.0 ~ 2.0 mm	准二级动力学模型	Langmuir模型	—	[30]
聚乙烯醇(PVA)	Cu、Cd和Pb	2 ~ 5 mm和0.3 ~ 2 mm	准二级动力学模型	Langmuir模型	静电相互作用和表面络合	[31]
PS(原始、老化)	Cu	900 ~ 450、450 ~ 250和250 ~ 70 μm	准二级动力学模型(原始) (老化)	Langmuir模型(原始) Freundlich模型(老化)	疏水相互作用和静电相互作用	[32]
PE(地膜源、老化)	Cd	0.6 ~ 1.0、1.0 ~ 2.0和2.0 ~ 5.0 mm	准二级动力学模型	Langmuir模型	—	[33]
PE、PP和PVC(薄膜源)	Cr、Pb和Cd	< 0.2、1 ~ 2和>2 mm	准二级动力学模型	—	静电相互作用	[34]
PA(原始、老化)	Cr	156 ~ 269 μm (原始) 135 ~ 252 μm (老化)	准二级动力学模型(原始) 准一级动力学模型(老化)	Freundlich模型(原始) Langmuir模型(老化)	物理吸附和化学吸附(原始) 物理吸附(范德华力和微孔填充)(老化)	[35]

1)“—”表示文章中没有相关数据

以及老化程度等)的影响。不同类型的微塑料具有不吸附能力存在显著差异^[23, 36]。对于微塑料粒径而言,通常随着微塑料粒径的减小,其比表面积增大,表面吸附位点的数量增加,其对重金属的吸附能力也随之增强^[37]。同时,由于聚合单体化学组成和聚合方式的不同,不同类型微塑料的结晶度也存在很大差异。已有研究表明,聚合物结晶区的分子链排布紧密且高度有序;而无定形区的分子链排布疏松且杂乱,存在大量的自由体积和孔结构,是吸附重金属的重要区域。因此,聚合物中无定形区域所占的比例是影响重金属在微塑料上吸附的一个重要因素^[16]。此外,老化过程中微塑料自身结构与性质会发生一系列变化,如粒径减小、比表面积增大、表面生成大量含氧官能团、亲水性增加、表面形成生物膜、表面电荷以及结晶度发生变化等,进而影响其对重金属的吸附能力^[38, 39]。

不同土壤环境条件(如pH、盐度和DOM等)也会对重金属在微塑料上的吸附产生重要影响。pH值的变化会改变微塑料表面所带电荷,进而影响其对重金属的吸附能力^[23, 40]。一般地,当pH值高于微塑料表面零电荷点(pH_{PZC})时,微塑料表面带负电;当pH值低于 pH_{PZC} 时,微塑料表面带正电荷。高浓度H⁺也会与重金属阳离子发生竞争吸附,导致微塑料对重金属的吸附能力降低。此外,重金属的存在形态也会随着pH值的改变而改变。对于盐度而言,一方面,溶液中的阳离子可能会通过静电相互作用吸附在微塑料表面,与金属阳离子产生竞争吸附,进而降低金属阳离子在微塑料上的吸附;盐度的升高也会压缩微塑料双电层,降低微塑料之间的排斥力,导致微塑料的凝聚或聚集,进而导致比表面积减小,从而降低其吸附性能^[16, 38]。此外,DOM也会对重金属在微塑料上的吸附产生重要影响,并且与微塑料类型、重金属种类以及DOM性质密切相关。DOM可以直接与重金属竞争微塑料上的吸附位点,从而降低微塑料对重金属的吸附;DOM可以覆盖在微塑料表面并改变其表面电荷和疏水性,从而改变微塑料对重金属的亲合力;DOM也可以进入微塑料孔隙,进而抑制微塑料对重金属的吸附;由于DOM含有羧基、酚羟基和酰胺基等多种活性官能团,使得其易与重金属形成络合物,进而影响重金属在微塑料上的吸附^[16, 41-44]。

当土壤环境条件发生变化或微塑料被土壤动物摄食而进入土壤动物消化系统后,吸附在微塑料表面的重金属又可解吸下来,重新释放进入环境中或动物消化道内,进而增加其生态风险^[45]。一般来说,微塑料上吸附态污染物的解吸过程是由污染物与微塑料之间界面结合力的强度决定的,因此污染物在

同的官能团以及表面理化特性,导致其对重金属的微塑料上的解吸过程同样也受微塑料的结构与性质、污染物的理化性质和土壤环境条件的影响^[23]。Li等^[46]研究发现,不同粒径PP和PS微塑料上吸附态的Pb和Cd均能够在纯水和模拟胃肠液中解吸下来,并且Pb和Cd在模拟胃肠液中的解吸率显著高于纯水中的解吸率,微塑料种类、粒径以及在模拟胃肠液中的保留时间都能影响重金属在微塑料上的解吸。Zhou等^[23]研究表明,在模拟消化液和CaCl₂溶液中Cd在PA、PVC、PS、ABS和PET微塑料上的解吸均存在解吸迟滞性,模拟蚯蚓消化液中Cd在PA、PVC、PS、ABS和PET微塑料上的解吸率显著高于CaCl₂溶液,并且腐殖酸的存在显著促进了模拟蚯蚓消化液和CaCl₂溶液中Cd在上述微塑料上的解吸;同时,不同类型微塑料上Cd的解吸程度也存在差异,遵循PA>PVC>PS>ABS>PET的顺序。此外,微塑料老化过程也能够影响重金属在微塑料上的解吸过程。例如,赵蕾^[47]研究表明,老化后(紫外老化、热老化以及自然老化)PP、PE和PA微塑料对Cu和Pb的解吸率较未老化微塑料显著升高。

1.2 农药和抗生素在微塑料上的吸附-解吸行为

除重金属外,农药和抗生素也是农田土壤中最常见的污染物。已有大量研究表明,微塑料能够通过疏水相互作用、静电相互作用、氢键作用、 $\pi-\pi$ 相互作用、范德华力以及微孔填充等吸附农药和抗生素^[14, 15, 48](表2)。例如,Wang等^[49]研究发现,多菌灵、敌百虫、除虫脲、马拉硫磷和苯醚甲环唑在PE地膜源微塑料上的吸附过程符合准二级动力学模型,Freundlich模型能较好地拟合上述5种农药在PE地膜源微塑料上的吸附等温线,并且5种农药在PE地膜源微塑料上的吸附系数 K_f 与农药的正辛醇-水分分配系数($\lg K_{ow}$)呈正相关,表明上述5种农药在PE地膜源微塑料上吸附的主要机制是疏水相互作用。Freundlich模型同样能较好地描述克百威和多菌灵在PE和PP微塑料上的吸附过程以及吡虫啉、噻嗪酮和苯醚甲环唑在PE微塑料上的吸附过程,其中PE和PP微塑料对克百威和多菌灵的吸附机制以分子间范德华力和静电相互作用为主^[50],而吡虫啉、噻嗪酮和苯醚甲环唑在PE微塑料上的吸附过程则主要受分子间范德华力和微孔填充机制的驱动^[51]。Guo等^[52]关于磺胺二甲嘧啶在PA、PE、PET、PP、PS和PVC微塑料上吸附的研究表明,磺胺二甲嘧啶在PA、PE、PVC和PP上的吸附过程符合准一级动力学模型,而在PS和PET上的吸附过程则更符合准二级动力学模型,Henry模型较Freundlich模型能够更好地拟合磺胺二甲嘧啶在PA、PE、PET、PP、PS和PVC微塑

料上的吸附等温线,并且指出范德华力和静电相互作用是主要的吸附机制.也有研究发现, Freundlich 模型和 Langmuir 模型均能够较好地拟合环丙沙星、甲氧苄啶和四环素在 PE、PVC、PS、PP 和 PA 微塑

料上的吸附等温线,而线性模型则更适合描述磺胺嘧啶和阿莫西林在上述 5 种微塑料上的吸附过程,表明不同种类微塑料对不同种类抗生素的吸附机制不同^[53].

表 2 农药和抗生素在微塑料上的吸附行为及影响因素¹⁾

Table 2 Adsorption behavior and influencing factors of pesticides and antibiotics on microplastics

微塑料类型	农药/抗生素	微塑料粒径	吸附动力学模型	吸附等温线模型	吸附机制	文献
PE(地膜源)	多菌灵、敌百虫、除虫脲、马拉硫磷和苯醚甲环唑	< 5 mm	准二级动力学模型	Freundlich 模型	疏水相互作用	[49]
PE 和 PP	克百威和多菌灵	18、75、150、270 和 830 μm	准二级动力学模型	Freundlich 模型	范德华力和静电相互作用	[50]
PE	吡虫啉、噻嗪酮和苯醚甲环唑	0.71 ~ 0.85 mm	准二级动力学模型	Freundlich 模型	范德华力和微孔填充	[51]
PA、PE、PVC、PP、PS 和 PET	磺胺二甲嘧啶	100 ~ 150 μm	准一级动力学模型 (PA、PE、PVC 和 PP) 准二级动力学模型 (PS 和 PET)	Henry 模型	范德华力和静电相互作用	[52]
PA、PVC 和 PET(老化)	磺胺	150 μm	准二级动力学模型	Langmuir 模型 (PA、PVC) Freundlich 模型 (PET)	— ¹⁾	[54]
PE 和 PS(老化)	磺胺甲噁唑、磺胺二甲嘧啶和头孢菌素 C	0.5 ~ 1 mm	MO 动力学模型	Henry 模型	疏水相互作用、范德华力和静电相互作用	[55]
PE、PS、PP、PA 和 PVC	四环素、环丙沙星和甲氧苄氨嘧啶	75 ~ 180 μm	—	Freundlich 模型 Langmuir 模型	氢键、疏水相互作用、范德华力和静电相互作用	[56]
	磺胺嘧啶(SDZ)和阿莫西林(AMX)	75 ~ 180 μm	—	Henry 模型		
PBS、PS 和 PE	诺氟沙星	—	准二级动力学模型	Langmuir 模型	π - π 相互作用、氢键作用和静电相互作用	[57]
HDPE	环氧唑、戊唑醇、腈菌唑、啉菌酯、西玛津、特丁嗪、阿特拉津和异丙甲草胺	40 ~ 48 μm	准二级动力学模型	Freundlich 模型	范德华力	[58]
PE(地膜源、老化)	马拉硫磷、除虫脲、苯醚甲环唑和多菌灵	< 5 mm	准二级动力学模型	Freundlich 模型	π - π 相互作用、疏水相互作用和静电相互作用	[59]
PVC、PS、PP 和 PE	环丙沙星、阿莫西林和四环素	80 ~ 100 μm (PVC)、 50 ~ 100 μm (PS、PP) 和 30 ~ 70 μm (PE)	准二级动力学模型	Freundlich 模型	范德华力和微孔填充	[60]
PE、PET 和 PA-6	诺氟沙星和盐酸加替沙星	300 ~ 600、100 ~ 300 和 < 100 μm	准二级动力学模型	Freundlich 模型 Langmuir 模型	静电相互作用、疏水相互作用、范德华力和微孔填充	[61]
PE、PS、PP、PVC、PLA 和 PBS	氟虫腈	75 ~ 150 μm	准二级动力学模型	Langmuir 模型 (PE、PS、PP 和 PVC) Freundlich 模型 (PLA 和 PBS)	π - π 相互作用、疏水相互作用 (PE、PS、PP 和 PVC) 和氢键作用 (PLA 和 PBS)	[62]
PE、PS、PP、PVC、PLA 和 PBS	三唑酮和苯醚甲环唑	75 ~ 150 μm	准二级动力学模型	Henry 模型	疏水相互作用	
PE 和 PS	土霉素	180 ~ 250 μm (PE) 和 250 ~ 550 μm (PS)	准二级动力学模型	Freundlich 模型	范德华力和微孔填充机制	[53]
PE、PVC、PS、PP 和 PA	环丙沙星、甲氧苄啶和四环素	180 μm	—	Freundlich 模型 Langmuir 模型	氢键作用、疏水相互作用、范德华力和静电相互作用	[53]
PE、PVC、PS、PP 和 PA	磺胺嘧啶和阿莫西林	180 μm	—	Henry 模型		
PP 和 POM(聚甲醛)	诺氟沙星和左氧氟沙星	275 ~ 325 μm	准二级动力学模型 Elovich 模型	Freundlich 模型 Langmuir 模型	离子交换和疏水相互作用	[63]
PE、PP、PS 和 PVC	泰乐菌素	178 μm	准二级动力学模型	Henry 模型 Freundlich 模型	疏水相互作用和静电相互作用	[64]

1)“—”表示文章中没有相关数据

微塑料的结构与性质(种类、粒径、结晶度与玻璃化温度以及老化程度等)、有机污染物的理化性质和土壤环境条件(pH、盐度以及DOM等)是影响农药和抗生素在微塑料上吸附的三大主要因素。不同类型的微塑料具有不同的官能团结构及表面理化特性,这使得农药和抗生素在不同类型微塑料上的吸附行为存在很大差异^[53,56,65]。对于微塑料粒径而言,一般地,随着微塑料粒径的减小,微塑料比表面积增大,表面吸附位点数量增加,其对有机污染物的吸附能力也随之增强^[48,66,67]。聚合物无定形区域是吸附有机污染物的有效区域,其所占比例也是影响有机污染物在微塑料上吸附的一个重要因素^[68]。根据玻璃化转变温度的不同,可以将聚合物无定形区域进一步划分为玻璃态和橡胶态。橡胶态聚合物具有柔性结构、分子间有自由体积,其对有机污染物的吸附主要通过分配作用发生,吸附为线性和非竞争性,并且完全可逆;玻璃态聚合物具有刚性结构以及致密结构,其对有机污染物的吸附主要通过表面吸附和孔隙填充发生,吸附为非线性、竞争性,并且部分不可逆^[69]。通常橡胶态聚合物较玻璃态聚合物对有机污染物具有更高的亲和力^[65]。老化过程会使微塑料产生裂纹或破碎为更小的碎片,导致其粒径减小、比表面积增加,从而具有更多的吸附位点和更强的吸附能力;老化过程还能导致微塑料表面生成大量的含氧官能团,从而降低其疏水性,增强对亲水性有机污染物的吸附,降低对疏水性污染物的吸附;老化过程中表面含氧官能团的引入也能够增加微塑料表面的负电荷,从而影响微塑料与污染物之间的静电相互作用;老化过程中微塑料表面生物膜的形成也可以改变微塑料表面的理化性质,进而影响其对有机污染物的吸附能力^[70,71];老化过程也能够改变微塑料的结晶度进而影响其对有机污染物的吸附行为^[72,73]。

有机污染物的疏水性也是影响其在微塑料上吸附的一个重要因素。对于疏水性有机污染物而言,其在微塑料上的吸附量与自身疏水性呈现明显的正相关,即有机污染物的疏水性越强,其在微塑料上的吸附量越大^[14]。例如,PE地膜源微塑料对多菌灵、敌百虫、除虫脲、马拉硫磷和苯醚甲环唑的吸附能力与其 $\lg K_{ow}$ 呈正相关^[49]。PS微塑料对己唑醇、腈菌唑和唑菌醇的吸附^[74]也呈现出了相同的规律。对于某些可电离的有机污染物(如抗生素)而言,其在微塑料上的吸附则受其他多种因素影响,如pH、溶解性有机质等。

不同土壤环境条件(如pH、盐度和DOM等)也会对农药和抗生素在微塑料上的吸附产生重要影响。一般地,当pH值高于微塑料 pH_{pzc} 时,微塑料表面带

负电,若此时农药或抗生素以离子形式存在并且带负电荷,则产生静电斥力,导致其在微塑料上的吸附量下降;当pH值低于 pH_{pzc} 时,微塑料表面带正电荷,若此时农药或抗生素以离子形式存在并且带负电荷,则可产生静电引力,导致其在微塑料上的吸附量升高;上述过程主要取决于微塑料 pH_{pzc} 、化合物 pK_a 以及土壤pH之间的相对关系^[75-77]。盐度对有机污染物在微塑料上吸附行为的影响与微塑料类型和有机污染物的理化性质密切相关。溶液中的金属阳离子可能会通过静电相互作用吸附在微塑料表面,与有机污染物阳离子产生竞争吸附,进而降低有机污染物在微塑料上的吸附;多价金属阳离子也可以作为有机污染物阴离子与表面带电负电荷的微塑料之间的桥梁,通过形成有机污染物-金属离子-微塑料三元体系,进而提高其在微塑料上的吸附^[78];盐度还可以通过影响非极性或弱极性有机污染物在溶液中的溶解度,进而影响其在微塑料上的吸附;溶液中盐度的增加会降低非极性或弱极性有机污染物的溶解度(盐析效应),进而通过疏水相互作用增强有机污染物在微塑料上的吸附^[48,49,74,79];此外,盐度的升高也会压缩微塑料双电层,降低微塑料之间的排斥力,导致微塑料的凝聚或聚集,进而导致比表面积减小,从而降低其吸附性能^[16,38]。但也有研究认为,若静电相互作用不是主要吸附机制,则盐度对有机污染物在微塑料上吸附的影响较小。例如,盐度的变化未对四环素在PE、PP和PS微塑料上的吸附^[76]以及磺胺甲噁唑在PE上的吸附^[80]产生显著影响。DOM对有机污染物在微塑料上吸附的影响可能涉及以下几个过程:DOM可以与有机污染物发生相互作用,也可以与有机污染物竞争微塑料上的吸附位点,进而降低有机污染物在微塑料上的吸附^[81];具有丰富官能团结构的DOM可以覆盖在微塑料表面,改变微塑料的疏水性和表面电荷,从而改变微塑料对有机污染物的亲和力;DOM也可以进入微塑料孔隙,进而抑制微塑料对有机污染物的吸附^[15,81,82]。也有研究认为,DOM能够通过氢键、 $\pi-\pi$ 共轭作用或阳离子络合等作用力结合到微塑料表面,从而在微塑料与有机污染物之间起到连桥作用,进而促进有机污染物在微塑料上的吸附^[83,84]。由此可见,DOM对有机污染物在微塑料上吸附行为的影响因微塑料种类、有机污染物理化性质以及DOM性质的不同而存在差异。

与吸附过程类似,农药和抗生素在微塑料上的解吸过程也受多种因素的影响。已有研究表明,玻璃态聚合物具有刚性结构以及致密结构,内部孔隙(纳米孔)的存在可为有机污染物提供强吸附位点,使得

有机物污染物解吸速率较低,存在解吸滞后性;与此相反,橡胶态聚合物具有柔性结构,分子间有自由体积,与玻璃态聚合物相比相对膨胀、柔性强,具有更大的迁移率和扩散性,其对有机污染物的吸附主要通过分配作用发生;因此,相较于玻璃态聚合物,有机污染物更易从橡胶态聚合物上解吸下来,不存在解吸滞后性^[4,85,86]. 刘学敏^[65]研究发现双酚 A 在 PA 微塑料上基本没有发生解吸,而双酚 A 在 PU 微塑料上则存在一定程度的解吸. Razanajatovo 等^[87]研究表明 48 h 内普萘洛尔和舍曲林在 PE 微塑料上的解吸率分别为 8% 和 4%,而磺胺甲噁唑在 PE 微塑料上的吸附则呈现出不可逆性. 由此可见,有机污染物在微塑料上的解吸过程与微塑料结构与性质以及有机污染物理化性质密切相关. 有机污染物在微塑料上的解吸过程也受环境条件的影响. 例如,肠道表面活性剂能够促进 DDT 在 PE 和 PVC 上的解吸,并且降低 pH、升高温度,能够促进上述污染物从 PE 和 PVC 表面的解吸^[88]. 此外,微塑料老化过程也会对有机污染物在微塑料上的解吸行为产生影响. 老化过程可以引起微塑料的表面官能团发生变化(如生成新的含氧官能团),使其可与有机污染物之间通过氢键作用发生不可逆吸附,进而减缓解吸过程;老化过程还可以改变微塑料的表观形貌并增加其孔隙体积,从而减缓有机污染物在微塑料表面的扩散速度及解吸过程;也有研究表明随着老化时间的延长微塑料结晶度降低,使得其内部自由空间及链段活性增大,从而降低微塑料中有机污染物在解吸过程中向外扩散的阻力. 进一步有研究指出,模拟消化液能够促进有机污染物在微塑料上的解吸,进而增加其生态风险^[88-90].

2 微塑料对农田土壤中典型污染物生物有效性的影响

微塑料进入环境后,可通过吸附-解吸以及共迁移等过程改变污染物在环境中的存在形态、局部浓度以及环境行为,进而对其生物有效性和生态风险产生重要影响. 关于水环境的研究已表明,微塑料既可以作为污染物载体促进污染物在水生生物体内的富集,进而增强其对水生生物的毒性^[91-93];也可通过吸附作用降低污染物在水环境中的浓度,进而降低其对水生生物的毒性^[94]. 由于土壤具有高度不均一性,使得污染物在土壤中的传质难度增大,导致微塑料进入土壤环境后对共存污染物环境行为和生物有效性的影响较水环境更为复杂(图 2).

2.1 微塑料对土壤中重金属生物有效性的影响

已有研究表明,微塑料对重金属的吸附能力一般低于土壤,向土壤中添加微塑料后可能会引发“稀释效应”,导致土壤-微塑料复合体系对重金属的吸附能力降低,并且能够提高土壤-微塑料复合体系对重金属的解吸能力,进而增加其在土壤中的流动性及生物有效性. 例如, Li 等^[95]研究发现, PE 微塑料对 Pb 和 Zn 的吸附能力显著低于土壤,但其对 Pb 或 Zn 的解吸能力显著高于土壤;向土壤中添加 10% (体积分数) PE 微塑料显著降低了土壤对 Pb 和 Zn 的吸附能力,同时显著提高了土壤对 Pb 或 Zn 的解吸能力,进而增加了 Pb 和 Zn 在土壤中的迁移. Zhang 等^[30]研究也表明,向土壤中添加 HDPE 微塑料降低了土壤对 Cd 的吸附能力,同时促进了 Cd 在土壤上的解吸,而微塑料的添加量、粒径、土壤环境 pH 则是影响这一过程的主要因素. Zhou 等^[96]研究表明,向土壤中添加 PP 微塑料

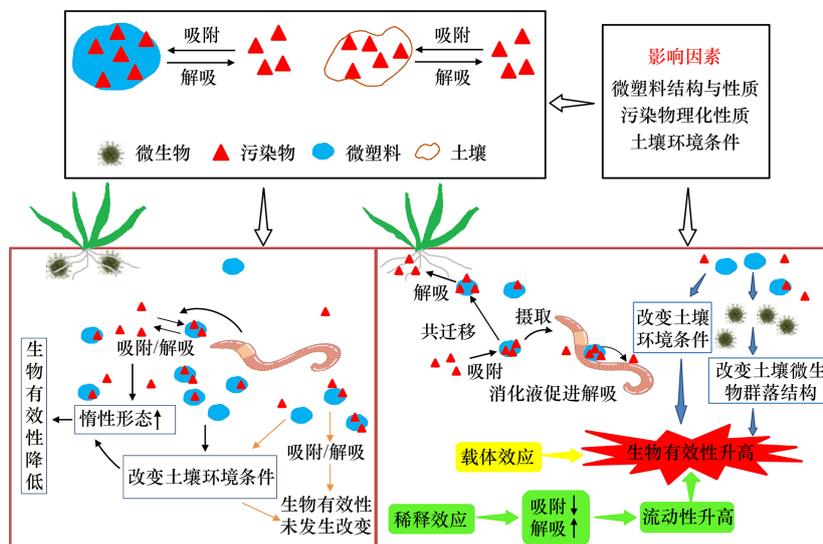


图 2 微塑料对土壤中污染物生物有效性的影响

Fig. 2 Effects of microplastics on the bioavailability of pollutants in soil

显著促进了Cd在蚯蚓体内的富集,并且随着PP微塑料添加量的增加,蚯蚓体内Cd的含量显著增加;进一步研究发现,蚯蚓体内Cd含量与蚯蚓体内微塑料的含量呈正相关,推测PP微塑料能够从土壤中吸附Cd,通过摄取过程进入蚯蚓消化道后,在蚯蚓消化液的作用下进一步解吸下来,从而被蚯蚓富集. Abbasi等^[97]研究发现,PET微塑料可作为Cd、Pb和Zn的载体,将其迁移至小麦根际并在此解吸,从而促进重金属向植物体中转移. 也有研究表明,PE微塑料促进了Cu和Pb向油菜植株体内的转移,并提高了Cu和Pb在油菜中的累积量^[98]. Zhao等^[99]研究表明高浓度聚氨酯微塑料(PUMPs)可通过改变土壤理化性质和微生物群落结构来提高Cd的生物有效性. Pinto-Poblete等^[100]研究则表明,与Cd单一暴露相比,PE微塑料与Cd复合暴露显著增加了草莓植物种植地重金属的积累,从而减少每株植物的果实总数和总生物量. Jiang等^[101]研究了微塑料与Cd复合污染对蚯蚓肠道细菌群落的影响,与单一暴露相比,复合暴露组蚯蚓肠道中拟杆菌门和厚壁菌门的相对丰度随着微塑料暴露浓度的增加而增加,微塑料可以增强Cd对蚯蚓肠道细菌群落的影响. 与此不同,Hodson等^[102]研究表明,HDPE微塑料(1 mm²)对Zn的吸附特性与土壤类似,但在土壤-微塑料复合体系中其对Zn的吸附量比土壤低1个数量级;并且在蚯蚓消化液中HDPE微塑料对Zn解吸率远高于土壤,以此推测微塑料可作为Zn的载体进而提高Zn在蚯蚓体内的富集;然而,HDPE微塑料与Zn复合暴露并未对蚯蚓的死亡率、体重以及蚯蚓体内Zn的积累量产生显著影响. Zong等^[103]研究也发现,PS微塑料的存在降低了Cu和Cd在小麦幼苗中的富集;与重金属单一暴露相比,微塑料与重金属复合暴露提高了小麦幼苗中叶绿素的含量,增强了光合作用,减少了活性氧簇的积累. Dong等^[104]研究也发现,PS微塑料可通过改变土壤中Proteobacteria、Firmicutes、Bacteroides和甲基转移酶基因的相对丰度、增加土壤中特异性吸附态砷的含量以及减少土壤中养分的含量进而增强土壤中As的挥发. 关于PS、聚四氟乙烯(PTFE)和As对水稻根际土壤理化性质及微生物多样性的研究也发现,As和PS、PTFE微塑料的相互作用降低了土壤中As(Ⅲ)和As(V)的含量,进而导致As的生物有效性降低,从而抑制了As对水稻根际土壤微生物的影响^[105]. Wang等^[106]研究发现As和PE微塑料复合暴露处理组蚯蚓体内As含量显著低于As单一暴露处理组,并且PE可以通过吸附As来缓解As对肠道细菌群落的不利影响.

此外,也有研究表明,微塑料会促进重金属向惰

性形态转化,从而降低重金属的生物有效性及其毒性. Wang等^[107]研究发现,PVC微塑料可通过吸附/结合的方式来降低As(V)的生物有效性,进而降低As在蚯蚓肠道中的富集并抑制As(V)向As(Ⅲ)的转化,从而降低其对蚯蚓的毒性. Yu等^[108]研究表明PE微塑料可通过直接吸附或间接改变土壤环境条件进而降低土壤中Cu、Cr和Ni的交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态部分,增加Cu、Cr和Ni的有机结合态部分,进而降低土壤中上述重金属的生物有效性.

2.2 微塑料对土壤中农药和抗生素生物有效性的影响

微塑料进入土壤后既可通过“叠加效应”提高土壤对污染物的吸附能力,也可通过“稀释效应”降低土壤对污染物的吸附能力,上述作用主要取决于微塑料对污染物亲和性的大小. Hu等^[109]研究发现,PE、PVC和PS微塑料对17 β -雌二醇的吸附能力显著高于土壤,向土壤中添加5%、10%、20%和30%(体积分数)PE、PVC和PS微塑料显著提高了土壤对17 β -雌二醇的吸附能力,并且随着微塑料添加量的升高,土壤对17 β -雌二醇的吸附能力显著升高,同时老化微塑料较未老化微塑料更能提高土壤对17 β -雌二醇的吸附能力. 赵雪君等^[110]研究也发现,PA和PMMA微塑料对异菌脉均具有较强的吸附能力,向土壤中添加2%(体积分数)的PA和PMMA微塑料后土壤对异菌脉的吸附能力显著增强. Li等^[111]研究则发现,向土壤中添加10%(体积分数)PA微塑料后土壤-微塑料复合体系对四环素的最大吸附容量由3.76 mg·g⁻¹降至2.32 mg·g⁻¹,从而提高了四环素在土壤中流动性. 向土壤中添加10%(体积分数)PE、PP和PS微塑料同样显著降低了土壤对地西洋的吸附能力,进而增加了地西洋在土壤中的流动性^[112]. Hüffer等^[113]关于PE微塑料对土壤中莠去津吸附行为影响的研究也得出了类似规律. 王佳青^[114]研究则表明,在土壤-微塑料(PE、PS、PP、PA和PVC)复合体系中磺胺甲噁唑的吸附主要以土壤的吸附为主,但土壤中微塑料含量的增加在一定程度上增加了混合体系对磺胺甲噁唑的吸附. 随后,微塑料上吸附态有机污染物的解吸过程会进一步影响有机污染物在土壤中的迁移转化以及生态风险,但该过程同样受多种因素的影响,并且影响规律尚不统一. 例如,王佳青^[114]研究发现,在抗生素污染的老化土壤中,PE和PS微塑料的添加会导致磺胺甲噁唑的解吸速率显著降低,在10~48 h之间出现明显的慢解吸过程. Chen等^[115]研究则发现,PS微塑料对三氯生的吸附能力与土壤相近,并且远低于PE微塑料;向土壤中添加PE微塑料

显著增加了土壤-微塑料复合体系对三氯生的吸附,而向土壤中添加PS微塑料则未产生显著影响;在微塑料-土壤复合体系中,三氯生更倾向于吸附在微塑料上,但由于其与微塑料的相互作用较弱,与土壤相比其更易从微塑料上解吸下来,解吸平衡量大小顺序为:PE微塑料>PS微塑料>土壤. Sun等^[116]研究发现,PS微塑料显著降低了温室土壤中四环素类抗生素的降解,同时也降低了细菌与噬菌体之间抗性基因(ARGs)的传播. Wang等^[117]研究也表明,与环丙沙星(CIP)单一污染相比,PE微塑料和CIP复合污染降低了土壤中CIP的降解,并且显著降低了土壤细菌的多样性.

微塑料进入农田土壤后可通过吸附-解吸过程以及共迁移等过程改变农药和抗生素的环境行为,进而对其生物有效性和生态风险产生影响,但上述过程受微塑料结构与性质、污染物理化性质以及土壤环境条件等多个因素的影响,结果也往往存在差异^[14]. 已有研究表明,土壤中的微塑料可通过载体效应增加有机污染物对土壤生物的暴露风险,并提高其对土壤生物的生物有效性和毒性效应^[118]. 例如, Sun等^[119]研究表明,向土壤中添加 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的微塑料能够显著增加毒氟磷在蚯蚓体内的富集,并且微塑料的存在显著增强了毒氟磷对蚯蚓的氧化损伤以及代谢谱干扰. 0.25%(体积分)PE地膜源微塑料,尤其是经过田间老化的PE地膜源微塑料,与莠去津复合暴露较莠去津单一暴露能够诱导蚯蚓产生更强的氧化胁迫效应和DNA损伤^[120]. 但也有研究指出,微塑料的存在降低了土壤中有机污染物的生物有效性,进而减弱了其对土壤生物毒性效应^[121, 122]. 此外, Ma等^[123]研究则表明,PA和PVC微塑料的存在并未显著增加四环素在*Enchytraeus crypticus*中的积累,并且PA和PVC微塑料与四环素未对*E. crypticus*微生物群落的多样性表现出协同毒性作用. Xiang等^[124]研究表明,与PS单一暴露相比,暴露于载有磺胺甲噁唑的PS微塑料时,会显著改变土壤跳虫(*Folsomia candida*)肠道微生物的多样性和群落结构以及抗生素抗性基因的分布. 目前,关于微塑料对土壤中有机污染物生物有效性及毒性效应影响的研究仍相对较少,内在机制尚不清晰,亟待更加深入和系统地探索.

3 农田土壤中微塑料复合污染研究存在的问题与展望

3.1 存在的问题

目前,关于微塑料与共存污染物复合污染的研究主要集中于海洋和淡水环境,由于土壤是一个复

杂而多相的物质系统,导致微塑料进入土壤环境后与共存污染物的复合污染效应较海洋和淡水环境更为复杂,然而相关研究十分匮乏.

(1)关于微塑料对重金属、农药和抗生素等农田土壤典型污染物吸附-解吸行为的研究还不够深入,不同土壤环境条件、微塑料结构与性质对上述过程的影响及其微观机制有待进一步揭示.

(2)微塑料附着生物膜的形成可能会改变微塑料的表观形貌、表面电荷、比表面积、密度和疏水性等理化性质,进而影响微塑料对共存污染物的吸附-解吸行为,已有研究主要关注海洋和淡水环境,关于土壤环境中微塑料附着生物膜的形成及其对共存污染物吸附-解吸行为的影响仍处于初级阶段,尚缺乏基础数据.

(3)微塑料在农田土壤中可发生横向或纵向迁移,但其与重金属、农药和抗生素等农田土壤典型污染物的共迁移行为以及驱动因素尚不清晰.

(4)目前针对微塑料与重金属、农药和抗生素等的复合污染研究尚多,但还缺乏对复合污染的阻控技术的研究.

3.2 展望

针对目前微塑料与农田土壤典型污染物复合污染研究中存在的不足和空缺,本文总结了以下4点,为后续的研究提供思路.

(1)加强微塑料对重金属、农药和抗生素等农田土壤典型污染物吸附-解吸行为的研究,重点关注微塑料结构与性质(尤其是微塑料在实际农田土壤环境中的老化过程)、不同土壤环境条件对上述过程的影响及内在机制.

(2)系统研究微塑料与土壤中微生物的相互作用,探明土壤环境中微塑料附着生物膜的形成及其对重金属、农药和抗生素等农田土壤典型污染物吸附-解吸行为及生物有效性的影响和内在机制.

(3)深入探讨微塑料与重金属、农药和抗生素等农田土壤典型污染物的共迁移行为,揭示土壤理化性质、微塑料结构与性质以及生物与非生物活动对上述过程的影响及内在机制.

(4)综合探究土壤中微塑料与重金属、农药和抗生素复杂的复合污染机制,开发复合污染的阻控技术,为未来土壤防治与修复提供技术支持.

参考文献:

- [1] 苗开珍,孟娇龙,姜雪峰. 塑料废弃物污染及降解的研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2023, (1): 170-176.
Miao K Z, Meng J L, Jiang X F. Research progress on pollution and degradation of plastic waste[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2023, (1): 170-176.

- [2] Li J Y, Liu H H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. *Water Research*, 2018, **137**: 362-374.
- [3] Wang C H, Zhao J, Xing B S. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124357.
- [4] Cole M, Lindeque P, Halsband C, *et al.* Microplastics as contaminants in the marine environment: a review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(12): 2588-2597.
- [5] Wang Y, Zhou B H, Chen H L, *et al.* Distribution, biological effects and biofilms of microplastics in freshwater systems—a review [J]. *Chemosphere*, 2022, **299**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134370.
- [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.
Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, *et al.* Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food Chain risks [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(10): 1021-1030.
- [7] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, *et al.* Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [8] Yu J R, Adingo S, Liu X L, *et al.* Microplastics in soil ecosystem—a review of sources, fate, and ecological impact [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2022, **68**(1): 1-17.
- [9] Guo J J, Huang X P, Xiang L, *et al.* Source, migration and toxicology of microplastics in soil [J]. *Environment International*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105263.
- [10] 薄录吉, 李冰, 张凯, 等. 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2375-2383.
Bo L J, Li B, Zhang K, *et al.* Distribution, sources, and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2375-2383.
- [11] Pérez-Reverón R, Álvarez-Méndez S J, Kropp R M, *et al.* Microplastics in agricultural systems: analytical methodologies and effects on soil quality and crop yield [J]. *Agriculture*, 2022, **12** (8), doi: 10.3390/agriculture12081162.
- [12] Jin T Y, Tang J C, Lyu H H, *et al.* Activities of microplastics (MPs) in agricultural soil: a review of MPs pollution from the perspective of agricultural ecosystems [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, **70**(14): 4182-4201.
- [13] Yu H, Zhang Y, Tan W B, *et al.* Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: effects on ecosystems and human health [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/fenvs.2022.855292.
- [14] Chang J N, Fang W, Liang J S, *et al.* A critical review on interaction of microplastics with organic contaminants in soil and their ecological risks on soil organisms [J]. *Chemosphere*, 2022, **306**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135573.
- [15] Mei W P, Chen G E, Bao J Q, *et al.* Interactions between microplastics and organic compounds in aquatic environments: a mini review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **736**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139472.
- [16] 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.
Zhang H, Liu H C, Chen G D, *et al.* Recent advances on adsorption of heavy metals in water environment by microplastics [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, **43**(4): 36-44.
- [17] Gao X, Hassan I, Peng Y T, *et al.* Behaviors and influencing factors of the heavy metals adsorption onto microplastics: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128777.
- [18] Cao Y X, Zhao M J, Ma X Y, *et al.* A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: mechanism and their combined effect on organisms and humans [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147620.
- [19] Torres F G, Dioses-Salinas D C, Pizarro-Ortega C I, *et al.* Sorption of chemical contaminants on degradable and non-degradable microplastics: recent progress and research trends [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143875.
- [20] Xiang Y J, Jiang L, Zhou Y Y, *et al.* Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **422**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126843.
- [21] 刘沙沙, 陈诺, 杨晓茵. 微塑料对有机污染物的吸附-解吸特性及其复合毒性效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2022, **31** (3): 610-620.
Liu S S, Chen N, Yang X Y. Research progress on adsorption-desorption characteristics of organic pollutants by microplastics and their combined toxic effects [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(3): 610-620.
- [22] Guo X T, Hu G L, Fan X Y, *et al.* Sorption properties of cadmium on microplastics: the common practice experiment and a two-dimensional correlation spectroscopic study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110118.
- [23] 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**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116209.
- [24] Li Y H, Zhang Y, Su F, *et al.* Adsorption behaviour of microplastics on the heavy metal Cr(VI) before and after ageing [J]. *Chemosphere*, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134865.
- [25] Zhou Z Q, Sun Y R, Wang Y Y, *et al.* Adsorption behavior of Cu(II) and Cr(VI) on aged microplastics in antibiotics-heavy metals coexisting system [J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132794.
- [26] Wang X X, Zhang R X, Li Z Y, *et al.* Adsorption properties and influencing factors of Cu(II) on polystyrene and polyethylene terephthalate microplastics in seawater [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **812**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152573.
- [27] Wang Y, Wang X J, Li Y, *et al.* Effects of exposure of polyethylene microplastics to air, water and soil on their adsorption behaviors for copper and tetracycline [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **404**, doi: 10.1016/j.cej.2020.126412.
- [28] Yu A Q, Sun X, Tang S, *et al.* Adsorption mechanism of cadmium on polystyrene microplastics containing hexabromocyclododecane [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, **24**, doi: 10.1016/j.eti.2021.102036.
- [29] Fan T Y, Zhao J, Chen Y X, *et al.* Coexistence and adsorption properties of heavy metals by polypropylene microplastics [J]. *Adsorption Science & Technology*, 2021, **2021**, doi: 10.1155/2021/4938749.

- [30] 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*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121775.
- [31] 宫婉婷. 聚乙烯醇微塑料对水溶液中 Cu²⁺、Cd²⁺、Pb²⁺ 的吸附研究[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2021.
Gong W T. Study on adsorption of Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ in aqueous solution by polyvinyl alcohol microplastics[D]. Jilin: Jilin Institute of Chemical Technology, 2021.
- [32] 魏凤. 微塑料在污水处理厂中的分布及对污染物四环素、铜的吸附研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
Wei F. The analysis of microplastics' distribution in wastewater treatment plants and its adsorption to tetracycline and copper[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [33] 韩宾. 微塑料对土壤中重金属吸附、解吸的影响[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
Han B. Microplastics influence the adsorption and desorption characteristics of heavy metals in soil [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2020.
- [34] 张宇恺. 上海农田土壤中微塑料分布及对重金属吸附特征研究[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2021.
Zhang Y K. Distribution of microplastics in Shanghai farmland soil and its adsorption characteristics of heavy metals [D]. Shanghai: Shanghai Second Polytechnic University, 2021.
- [35] 张靖晗. PA 微塑料对水环境中典型污染物的吸附行为研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
Zhang J H. Adsorption behavior of PA microplastics for typical pollutants in water environment [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.
- [36] Gao F L, Li J X, Sun C J, *et al.* Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **144**: 61-67.
- [37] 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.
Gao F L, Li J X, Sun C J, *et al.* Analysis on ability and characteristics of microplastics to enrich metal lead [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2017, **36**(8): 1018-1022.
- [38] 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.
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.
- [39] 施庆还, 林子增. 微塑料老化机理及其环境行为影响研究进展[J]. *应用化工*, 2022, **51**(7): 2084-2089, 2095.
Shi Q H, Lin Z Z. Research progress on the aging mechanism of microplastics and its environmental behavior [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, **51**(7): 2084-2089, 2095.
- [40] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions [J]. *Marine Chemistry*, 2014, **167**: 25-32.
- [41] 郭瑜洁. 微塑料的老化和吸附行为以及对土壤中铜迁移的影响[D]. 温州: 温州大学, 2021.
Guo Y J. Aging and adsorption behavior of microplastics and its effect on copper migration in soil [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [42] 张佳欢. 微塑料对水中典型重金属的吸附效能及其机制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
Zhang J H. Study on adsorption efficiencies and mechanisms of typical heavy metals on microplastics in water [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [43] 邹继颖. 微塑料对典型有机污染物和重金属离子的吸附及机理研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2021.
Zou J Y. Research on sorption and mechanism of typical organic pollutants and heavy metal ions by microplastics [D]. Jilin: Northeast Normal University, 2021.
- [44] Liu S, Huang J H, Zhang W, *et al.* Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: a review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113995.
- [45] Wang F Y, Yang W W, Cheng P, *et al.* Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 1073-1080.
- [46] Li W, Zu B, Yang Q W, *et al.* Adsorption of lead and cadmium by microplastics and their desorption behavior as vectors in the gastrointestinal environment [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, **10**(3), doi: 10.1016/j.jece.2022.107379.
- [47] 赵蕾. 微塑料吸附典型重金属及在模拟胃肠环境中的解吸 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2020.
Zhao L. Typical heavy metals adsorption on microplastics and their desorption in gastrointestinal environment [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [48] Wang F, Wong C S, Chen D, *et al.* Interaction of toxic chemicals with microplastics: a critical review [J]. *Water Research*, 2018, **139**: 208-219.
- [49] Wang T, Yu C C, Chu Q, *et al.* Adsorption behavior and mechanism of five pesticides on microplastics from agricultural polyethylene films [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125491.
- [50] Mo Q M, Yang X J, Wang J J, *et al.* Adsorption mechanism of two pesticides on polyethylene and polypropylene microplastics: DFT calculations and particle size effects [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118120.
- [51] Li H, Wang F H, Li J N, *et al.* Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: kinetics, isotherms, thermodynamics, and molecular dynamics simulation [J]. *Chemosphere*, 2021, **264**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128556.
- [52] Guo X, Liu Y, Wang J L. Sorption of sulfamethazine onto different types of microplastics: a combined experimental and molecular dynamics simulation study [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **145**: 547-554.
- [53] 张凯娜. 抗生素在微塑料表面的吸附行为研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2018.
Zhang K N. Adsorption of antibiotics onto microplastic surfaces [D]. Yantai: Yantai University, 2018.
- [54] Fu J X, Li Y A, Peng L, *et al.* Distinct chemical adsorption behaviors of sulfanilamide as a model antibiotic onto weathered microplastics in complex systems [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, **648**, doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129337.
- [55] Guo X, Wang J L. Sorption of antibiotics onto aged microplastics in freshwater and seawater [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110511.
- [56] Li J, Zhang K N, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 460-467.
- [57] Sun M, Yang Y K, Huang M L, *et al.* Adsorption behaviors and mechanisms of antibiotic norfloxacin on degradable and

- nondegradable microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151042.
- [58] Wang F, Gao J, Zhai W J, *et al.* The influence of polyethylene microplastics on pesticide residue and degradation in the aquatic environment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **394**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122517.
- [59] Lan T, Cao F, Cao L C, *et al.* A comparative study on the adsorption behavior and mechanism of pesticides on agricultural film microplastics and straw degradation products [J]. *Chemosphere*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135058.
- [60] 郭梦函. 抗生素在微塑料上的吸附行为及其相关毒性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Guo M H. Studies on the adsorption behavior of antibiotics on microplastics and its related toxicity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [61] 王一飞. 微塑料对氟喹诺酮类抗生素的吸附作用[D]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
Wang Y F. Adsorption of fluoroquinolones by microplastics [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2021.
- [62] 蒋梦云. 微塑料对典型农药的吸附行为及作用机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
Jiang M Y. Sorption behavior and mechanism of typical pesticides on microplastics [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [63] 刘玉宁. 微塑料分离方法及吸附抗生素机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Liu Y N. Study on separation method of microplastics and mechanism of antibiotic adsorption [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [64] 庞敬文. 微塑料对典型污染物的携带机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
Pang J W. Sorption mechanism of typical pollutants by microplastics [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [65] 刘学敏. 微塑料与典型环境内分泌干扰物的界面行为和作用机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
Liu X M. Interaction and mechanism between microplastics and typical environmental endocrine disrupting compounds [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [66] Wang J, Liu X H, Liu G N, *et al.* Size effect of polystyrene microplastics on sorption of phenanthrene and nitrobenzene [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **173**: 331-338.
- [67] Zhang X J, Zheng M G, Yin X C, *et al.* Sorption of 3, 6-dibromocarbazole and 1, 3, 6, 8-tetrabromocarbazole by microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **138**: 458-463.
- [68] Guo X Y, Wang X L, Zhou X Z, *et al.* Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: role of chemical and physical composition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (13): 7252-7259.
- [69] Tourinho P S, Kočí V, Loureiro S, *et al.* Partitioning of chemical contaminants to microplastics: sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 1246-1256.
- [70] Wang Q J, Zhang Y, Zhang Y Y, *et al.* Effects of biofilm on metal adsorption behavior and microbial community of microplastics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127340.
- [71] 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**, doi: 10.1016/j.cej.2019.123808.
- [72] Ren Z F, Gui X Y, Xu X Y, *et al.* Microplastics in the soil-groundwater environment: aging, migration, and co-transport of contaminants—a critical review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **419**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126455.
- [73] Ainali N M, Bikiaris D N, Lambropoulou D A. Aging effects on low- and high-density polyethylene, polypropylene and polystyrene under UV irradiation: an insight into decomposition mechanism by Py-GC/MS for microplastic analysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, **158**, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105207.
- [74] Fang S, Yu W S, Li C L, *et al.* Adsorption behavior of three triazole fungicides on polystyrene microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 1119-1126.
- [75] Zhang Y, Ni F, He J S, *et al.* Mechanistic insight into different adsorption of norfloxacin on microplastics in simulated natural water and real surface water [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117537.
- [76] Xu B L, Liu F, Brookes P C, *et al.* Microplastics play a minor role in tetracycline sorption in the presence of dissolved organic matter [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 87-94.
- [77] Atugoda T, Wijesekara H, Werellagama D R I B, *et al.* Adsorptive interaction of antibiotic ciprofloxacin on polyethylene microplastics: implications for vector transport in water [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, **19**, doi: 10.1016/j.eti.2020.100971.
- [78] Yang H R, Dong H, Huang Y R, *et al.* Interactions of microplastics and main pollutants and environmental behavior in soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153511.
- [79] Costigan E, Collins A, Hatinoğlu M D, *et al.* Adsorption of organic pollutants by microplastics: overview of a dissonant literature [J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, **6**, doi: 10.1016/j.hazadv.2022.100091.
- [80] Xu B L, Liu F, Brookes P C, *et al.* The sorption kinetics and isotherms of sulfamethoxazole with polyethylene microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **131**: 191-196.
- [81] Shen X C, Li D C, Sima X F, *et al.* The effects of environmental conditions on the enrichment of antibiotics on microplastics in simulated natural water column [J]. *Environmental Research*, 2018, **166**: 377-383.
- [82] 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.
- [83] Zhang H B, Wang J Q, Zhou B Y, *et al.* Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: kinetics, isotherms and influencing factors [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 1550-1557.
- [84] Chen W, Ouyang Z Y, Qian C, *et al.* Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: a spectroscopic insight [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 1-7.
- [85] Zuo L Z, Li H X, Lin L, *et al.* Sorption and desorption of

- phenanthrene on biodegradable poly (butylene adipate co-terephthalate) microplastics[J]. *Chemosphere*, 2019, **215**: 25-32.
- [86] 邱莹. 海洋环境中的微塑料对卤代呋唑的吸附与解吸附研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- Qiu Y. Sorption and desorption of polyhalogenated carbazoles (PHCZs) to microplastics in marine environment [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [87] Razanajatovo R M, Ding J N, Zhang S S, *et al.* Sorption and desorption of selected pharmaceuticals by polyethylene microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **136**: 516-523.
- [88] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 16-23.
- [89] Fan X L, Gan R, Liu J Q, *et al.* Adsorption and desorption behaviors of antibiotics by tire wear particles and polyethylene microplastics with or without aging processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **771**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145451.
- [90] Wang Y, Liu C Q, Wang F F, *et al.* Behavior and mechanism of atrazine adsorption on pristine and aged microplastics in the aquatic environment: kinetic and thermodynamic studies [J]. *Chemosphere*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133425.
- [91] Ma Y N, Huang A N, Cao S Q, *et al.* Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 166-173.
- [92] Barboza L G A, Vieira L R, Branco V, *et al.* Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver, and cause oxidative stress and damage in *Dicentrarchus labrax* juveniles [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-34125-z.
- [93] Wardrop P, Shimeta J, Nugegoda D, *et al.* Chemical pollutants sorbed to ingested microbeads from personal care products accumulate in fish [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 4037-4044.
- [94] Yang W F, Gao X X, Wu Y X, *et al.* The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110484.
- [95] Li M, Wu D D, Wu D, *et al.* Influence of polyethylene-microplastic on environmental behaviors of metals in soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(22): 28329-28336.
- [96] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **392**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122273.
- [97] Abbasi S, Moore F, Keshavarzi B, *et al.* PET-microplastics as a vector for heavy metals in a simulated plant rhizosphere zone [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140984.
- [98] Jia H, Wu D, Yu Y, *et al.* Impact of microplastics on bioaccumulation of heavy metals in rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Chemosphere*, 2022, **288**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132576.
- [99] Zhao M, Liu R L, Wang X X, *et al.* How do controlled-release fertilizer coated microplastics dynamically affect Cd availability by regulating Fe species and DOC content in soil? [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **850**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157886.
- [100] Pinto-Poblete A, Retamal-Salgado J, López M D, *et al.* Combined effect of microplastics and Cd alters the enzymatic activity of soil and the productivity of strawberry plants [J]. *Plants*, 2022, **11**(4), doi: 10.3390/plants11040536.
- [101] Jiang X F, Yang Y, Wang Q, *et al.* Seasonal variations and feedback from microplastics and cadmium on soil organisms in agricultural fields [J]. *Environment International*, 2022, **161**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107096.
- [102] 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.
- [103] Zong X Y, Zhang J J, Zhu J W, *et al.* Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **217**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112217.
- [104] Dong Y M, Gao M L, Liu X W, *et al.* The mechanism of polystyrene microplastics to affect arsenic volatilization in arsenic-contaminated paddy soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122896.
- [105] Dong Y M, Gao M L, Qiu W W, *et al.* Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111899.
- [106] Wang H T, Ma L, Zhu D, *et al.* Responses of earthworm *Metaphire vulgaris* gut microbiota to arsenic and nanoplastics contamination [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150279.
- [107] Wang H T, Ding J, Xiong C, *et al.* Exposure to microplastics lowers arsenic accumulation and alters gut bacterial communities of earthworm *Metaphire californica* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 110-116.
- [108] Yu H, Hou J H, Dang Q L, *et al.* Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **395**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122690.
- [109] Hu B Y, Li Y X, Jiang L S, *et al.* Influence of microplastics occurrence on the adsorption of 17 β -estradiol in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123325.
- [110] 赵雪君, 李达, 刘士领, 等. 聚酰胺和聚甲基丙烯酸酯微塑料对异菌脲土壤环境行为的影响 [J]. *农药学报*, 2021, **23**(5): 986-994.
- Zhao X J, Li D, Liu S L, *et al.* Effects of polyamide and polymethyl methacrylate microplastics on environmental behaviors of iprodione in soil [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2021, **23**(5): 986-994.
- [111] Li J, Guo K, Cao Y S, *et al.* Enhance in mobility of oxytetracycline in a sandy loamy soil caused by the presence of microplastics [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116151.
- [112] Xu B L, Huang D, Liu F, *et al.* Contrasting effects of microplastics on sorption of diazepam and phenanthrene in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **406**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124312.
- [113] Hüffer T, Metzelder F, Sigmund G, *et al.* Polyethylene

- microplastics influence the transport of organic contaminants in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 242-247.
- [114] 王佳青. 微塑料影响下土壤磺胺甲恶唑的吸附-解吸与迁移特征[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- Wang J Q. Adsorption-desorption and vertical migration of sulfamethoxazole in a soil under the impact of microplastics [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.
- [115] 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**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127947.
- [116] Sun M M, Ye M, Jiao W T, *et al.* Changes in tetracycline partitioning and bacteria/phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sophorolipid [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **345**, 131-139.
- [117] Wang J, Liu X H, Dai Y X, *et al.* Effects of co-loading of polyethylene microplastics and ciprofloxacin on the antibiotic degradation efficiency and microbial community structure in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140463.
- [118] Atugoda T, Vithanage M, Wijesekara H, *et al.* Interactions between microplastics, pharmaceuticals and personal care products: implications for vector transport [J]. *Environment International*, 2021, **149**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106367.
- [119] Sun W, Meng Z Y, Li R S, *et al.* Joint effects of microplastic and dufulin on bioaccumulation, oxidative stress and metabolic profile of the earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128171.
- [120] 程亚莉. 微塑料与莠去津单一及复合暴露对蚯蚓的毒性效应 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- Cheng Y L. Toxic effects of single and combined exposure to microplastics and atrazine on earthworm [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.
- [121] Wang J, Coffin S, Sun C L, *et al.* Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 776-784.
- [122] Xu G H, Liu Y, Yu Y. Effects of polystyrene microplastics on uptake and toxicity of phenanthrene in soybean [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147016.
- [123] Ma J, Sheng G D, O'connor P. Microplastics combined with tetracycline in soils facilitate the formation of antibiotic resistance in the *Enchytraeus crypticus* microbiome [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114689.
- [124] Xiang Q, Zhu D, Chen Q L, *et al.* Adsorbed sulfamethoxazole exacerbates the effects of polystyrene (~2 μm) on gut microbiota and the antibiotic resistance of a soil collembolan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53** (21): 12823-12834.



CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i>	(617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	(626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i>	(635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i>	(645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i>	(655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i>	(668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i>	(678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i>	(700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i>	(709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i>	(721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i>	(732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i>	(744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	(755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i>	(768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i>	(792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i>	(802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong	(813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i>	(826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i>	(837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	(844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i>	(854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i>	(862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i>	(873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i>	(885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i>	(898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i>	(909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i>	(929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i>	(940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i>	(952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen	(961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i>	(974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	(983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i>	(992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i>	(1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	(1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i>	(1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i>	(1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i>	(1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i>	(1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i>	(1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i>	(1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i>	(1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i>	(1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i>	(1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i>	(1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i>	(1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i>	(1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i>	(1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i>	(1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	(1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	(1222)