

申报 2024 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果公示内容

一、成果名称：典型西北区域微塑料的污染特征、环境行为及生态风险

二、成果简介

人类活动导致每年有超过 6000 万吨废弃塑料排入环境，这些塑料会在物理、化学和生物作用下形成粒径小于 5 mm 的微塑料颗粒。目前，微塑料已被联合国环境规划署（UNEP）列为全球性新污染物。2022 年，国务院颁布《新污染物治理行动方案》，进一步明确指出要科学评估新污染物环境风险。西北地区作为我国自然生态脆弱区之一，在区域经济发展过程中，由于人类活动所引起的人地关系矛盾十分突出，生态破坏及退化问题层出不穷。相较于东部区域的化学品污染和西南地区的重金属污染问题，塑料地膜污染作为西北区域突出的环境问题，近年来受到了广泛关注。进入到农业土壤中的塑料地膜会在西北特有的环境条件下发生迁移转化，该过程受光热及干旱的影响，使得西北区域土壤中微塑料的环境行为具有其独特性。因此，评估西北区域农业土壤中微塑料的污染特征、解析土壤中微塑料的环境界面化学过程以及探讨微塑料介导下对共存污染物环境行为的影响，对于科学评估西北区域农业土壤中微塑料的环境行为及生态环境风险具有重要的理论意义。

本团队围绕西北区域经济快速发展过程中面临的微塑料污染问题，以“污染特征—界面过程—环境效应”为研究主线，系统地开展了“典型微塑料的环境地球化学行为”的前沿基础研究，取得了系列创新成果：1）建立了复杂土壤介质中微塑料的分析提取方法，明确了西北区域农业土壤微塑料的污染特征，解析了微塑料污染的“源汇”关系及关键控制因子；2）针对土壤环境中微塑料的环境界面行为，系统探讨了微塑料与不同土壤介质的交互作用过程，揭示了不同环境因素影响下土壤活性物质对微塑料老化的影响机制；3）针对微塑料对共存污染物环境行为的影响，明确了微塑料的老化显著增强了对共存污染物的吸附和光化学转化过程，揭示了微塑料介导下共存污染物的生物可给性显著增加。该研究成果为微塑料的环境行为和综合效应评估提供新见解，取得如下重要成果：

（1）优化建立了复杂土壤介质中微塑料的分析提取方法，明确了西北区域农业土壤微塑料的污染特征，识别了微塑料污染的“源汇”关系及关键控制因子。

我国作为塑料生产与使用大国，生产和使用的塑料制品占全世界四分之一，在我国西北地区，由于地膜覆盖在提高作物产量和水分利用效率等方面具有很大潜力，农用地膜的年使用量近百万吨，但农膜回收率不到 70%，导致大量的农膜塑料残留在土壤中。因此，定量评估土壤中微塑料的污染特征，是明确西北区域农业土壤中微塑料生态环境风险的首要任

务，而建立复杂土壤介质中微塑料的分离提取方法是解决其关键科学问题的瓶颈。目前针对土壤中微塑料的分离提取大多采用和水环境类似的分析方法，该方法在一定程度上能够反映土壤中微塑料的污染趋势，但在准确度方面有待提升，急需针对现有的分析方法优化提升。土壤中微塑料提取常采用单一盐体系，但受限于盐溶液密度的干扰，很难对复杂土壤介质中密度较大的微塑料进行提取；而对于微塑料鉴定的研究也局限于简单视觉观察和红外检测，受限于样品数量和尺寸，难以真实地反映微塑料的污染特征。

针对农业土壤中地膜微塑料与自然纤维（如植物残体）密度接近，难分离的难点，团队通过改进单一盐溶液提取方法，利用双盐体系辅助流式细胞仪和显微-傅里叶红外光谱等检测技术建立了土壤中微塑料的分析方法，提高了微塑料的回收率，实现了对土壤环境中密度较大微塑料的提取，提取效率和鉴定丰度都得到大大提升；此外，流式细胞仪和显微-傅里叶红外光谱的引入，实现了对土壤中微塑料丰度和化学成分的准确评估，优化了复杂环境介质中微塑料的污染特征分析及定量检测。

基于西北区域各农业土壤中微塑料污染特征的数据空白，团队通过调研明确了西北区域农业土壤中微塑料的污染特征、污染水平及其与人类活动的关系，发现西北三省（陕西、青海和新疆）农业土壤微塑料以塑料地膜和小尺寸的纤维为主，且不同的土地利用类型、农业种植模式及人为活动对农业土壤中微塑料积累有显著影响。除此之外，团队还对西北其他区域水体、沉积物和土壤中微塑料的分布特征与源汇关系进行研究，发现不同区域环境水体、沉积物及土壤中微塑料的检出率达到 100%，部分区域的污染水平甚至超过东部经济较发达区域，微塑料在不同环境介质中的分布特征受人类活动尤其是农业活动的影响较大。该研究成果为明确微塑料的污染特征及生态环境风险提供了数据支持。

（2）针对土壤环境中微塑料的环境界面行为，系统探讨了微塑料与不同土壤介质的交互作用过程，揭示了不同环境因素影响下土壤活性物质对微塑料老化的影响机制。

微塑料进入土壤环境后，会在物理、化学及生物的作用下，发生一系列的老化过程。微塑料还会与土壤活性物质（矿物、有机质和微生物等）发生一系列的交互作用过程，该过程会持续影响土壤中微塑料的老化，使老化机制更加复杂。对以上过程和影响机制的认识是评估微塑料环境行为及生态风险亟待解决的关键科学问题。

团队基于序批分配实验，发现微塑料与土壤的交互作用与土壤有机质和矿物（尤其铁氧化物和粘土矿物）含量密切相关，对于土壤矿物，阐明了微塑料与不同土壤矿物之间“静电作用为主、配体交换为辅”的交互作用机制，揭示了矿物表面羟基密度和老化微塑料表面含氧官能团是影响微塑料与土壤矿物之间交互作用的关键因素，且吸附到矿物表面的微塑料会

为后续微塑料的吸附提供额外的位点，增加了微塑料在矿物表面的聚集，从而影响微塑料在土壤中的迁移。对于土壤有机质，基于荧光淬灭实验，明确了土壤溶解性有机质与微塑料的交互作用取决于芳香物质和疏水物质在溶解性有机质中的占比。微塑料与土壤微生物的交互作用则受土壤深度、时间和有无植被覆盖的影响，微塑料可以改变土壤中微生物群落组成，并为微生物定殖提供特有的载体。该研究成果提升了对微塑料与土壤及其组分之间相互作用的理解，为评估微塑料环境界面行为及生态风险提供了坚实的理论基础。

针对微塑料的老化，团队首先考察了光照作用下，不同环境介质（空气、纯水和盐水）对微塑料老化的影响特性和机制，发现不同的环境介质对聚苯乙烯（PS）老化的影响不同，结合 2D-COS 分析，明确了 PS 微塑料光老化过程中官能团变化分子水平的直接证据；通过研究高温介导下 PS 的老化，发现了苯环上 C=C 的初步降解和空气老化后羰基带的产生，为评估在土壤表层微塑料的老化过程提供了直接证据。对于进入到土壤中的微塑料，研究发现微塑料在土壤介导下的老化主要受土壤矿物和有机质的影响，而土壤有机质在光照条件下能促进电子转移生成活性氧自由基并促进微塑料老化，此外，由于富里酸对半醌自由基的转化能力高从而具有更强的老化微塑料能力。对于土壤矿物介导下微塑料的老化，研究发现粘土矿物，特别是高岭石，促进了反应体系中活性氧自由基的产生，进而显著促进了微塑料的光降解；而铁（氢）氧化物都显著促进微塑料老化可归因于表面羟基配位。除此之外，团队还通过土壤培育发现微生物会在微塑料表面进行定殖进而促进微塑料的老化，揭示了土壤“微塑料圈”对微塑料老化行为的重要作用。

（3）针对微塑料对共存污染物环境行为的影响，明确了微塑料的老化显著增强了对共存污染物的吸附和光化学转化，揭示了微塑料介导下共存污染物的生物可给性显著增加。

微塑料会与土壤中的污染物共存并发生系列交互作用，探索微塑料老化过程对共存污染物环境行为的影响与作用机制，是科学评估微塑料环境效应所面临的重要科学问题。现有基于微塑料环境影响的研究多集中在微塑料的单一作用或以模式化（未老化）的微塑料作为模式物质来研究，而在实际环境体系中微塑料往往会经历各种老化过程，同时也会释放多种环境风险物质，因此开展真实土壤环境中微塑料的环境老化特性和多污染物间的复杂行为及协调效应的研究，对评估微塑料环境行为及效应至关重要。

在微塑料与污染物共存体系中，团队发现老化显著增强了微塑料对重金属和有机污染物的吸附，老化微塑料表面粗糙度和孔径增加，为重金属吸附提供了更多的结合位点，而微塑料表面的含氧基团增多，会通过络合和分配作用增强对有机污染物的吸附。

针对不同类型微塑料共存对彼此老化的影响，团队发现 PS 微塑料显著加速了共存 PP

微塑料的光降解，这归因于 PS 在初始阶段产生的 ROS 和在后期释放的溶解性有机质（PS-DOM）通过紫外吸收产生的 ROS 而引起的光敏化作用；而微塑料老化产生的 DOM 也可以促进共存微塑料及抗生素的光降解，研究发现在光照条件下产生单线态氧和超氧阴离子是促进塑料老化产生的 DOM 的重要机制，而微塑料自身也可以在光照条件下产生环境持久性自由基，进而加速共存污染物的转化；与此同时，结合微观孵育和体外模拟实验，发现“微塑料圈”微生物群落比周围环境中微生物群落更加独特和多样化，而光老化处理会降低生物膜对微塑料的亲合力，同时微塑料上生物膜的形成进一步增强了磺胺二甲嘧啶（SMT）在生物体中的解吸和生物可给性，这归因于胃肠成分与微塑料上生物膜成分（例如 EPS）的相互作用比纯微塑料表面的相互作用更强。该研究成果为微塑料复合环境行为评估提供了新见解。

三、代表性论文专著或知识产权（标准规范等），总数不超过 10 项，其中代表性论文专著不超过 8 篇（部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间（年月日）	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Insight into the photodegradation of microplastics boosted by iron (hydr)oxides	Environmental Science & Technology	Ding Ling, Guo Xuetao, Du Shengwen, Cui Fengyi, Zhang Yaping, Liu Peng, Ouyang Zhuozhi, Jia Hanzhong, Zhu Lingyan	2022 年 56 卷 17785–17794 页	2022 年 12 月 6 日	郭学涛、祝凌燕	丁玲	16	Web of science	是
2	High temperature depended on the ageing mechanism of microplastics under different environmental conditions and its effect on the distribution of organic pollutants	Water Research	Ding Ling, Mao Ruofan, Ma Sirui, Guo Xuetao, Zhu Lingyan	2020 年 174 卷 115634 页	2020 年 5 月 1 日	郭学涛	丁玲	247	Web of science	是
3	Aging significantly increases the interaction between polystyrene	Water Research	Zhang Yangyang, Luo Yuanyuan, Yu Xiaoqin, Huang Daofen, Guo Xuetao, Zhu Lingyan	2022 年 219 卷 118544 页	2022 年 7 月 1 日	郭学涛	张杨洋	36	Web of science	是

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
	nanoplastic and minerals									
4	The occurrence of microplastic in Mu Us Sand Land soils in northwest China: Different soil types, vegetation cover and restoration years	Journal of Hazardous Materials	Ding Ling, Wang Xinglei, Ouyang Zhuozhi, Chen Yanhua, Wang Xuexia, Liu Dongsheng, Liu Shasha, Yang Xiaomei, Jia Hanzhong, Guo Xuetao	2021 年 403 卷 123982 页	2021 年 2 月 5 日	郭学涛	丁玲	107	Web of science	是
5	Bioaccessibility of microplastic-associated antibiotics in freshwater organisms: Highlighting the impacts of biofilm colonization via an <i>in vitro</i> protocol	Environmental Science & Technology	Liu Peng, Dai Jiamin, Bie Chunyao, Li Huang, Zhang Zixuan, Guo Xuetao, Zhu Lingyan	2022 年 56 卷 12267-12277 页	2022 年 9 月 6 日	郭学涛	刘鹏	15	Web of science	是
6	Dissolved organic matter promotes the aging process of polystyrene microplastics under dark and ultraviolet light conditions: The crucial role of reactive oxygen species	Environmental Science & Technology	Qiu Xinran, Ma Sirui, Zhang Jianxiang, Fang Linchuan, Zhu Lingyan, Guo Xuetao	2022 年 56 卷 10149-10160 页	2022 年 7 月 19 日	郭学涛	仇欣然	67	Web of science	是
7	Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals	Journal of Hazardous Materials	Mao Ruofan, Lang Mengfan, Yu Xiaoqin, Wu Renren, Yang Xiaomei, Guo Xuetao	2020 年 393 卷 122515 页	2020 年 7 月 5 日	郭学涛	毛若帆	436	Web of science	是

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
8	Enhanced cytotoxicity of photoaged phenol-formaldehyde resins microplastics: Combined effects of environmentally persistent free radicals, reactive oxygen species, and conjugated carbonyls	Environment International	Zhu Kecheng, Jia Hanzhong, Sun Yajiao, Dai Yunchao, Zhang Chi, Guo Xuetao, Wang Tiecheng, Zhu Lingyan	2020年145卷106137页	2020年12月1日	贾汉忠、祝凌燕	祝可成	63	Web of science	是
9	一种污泥微塑料强化分离与提取的方法	发明专利	王铁成, 方淼, 靳贺凯, 任志印, 王毓敏	CN 115626752 A	2023年01月20日公布	王铁成	王铁成	-	-	是

四、主要完成人情况

姓名	排名	行政/技术职称	工作单位/完成单位
郭学涛	1	教授	西北农林科技大学
丁玲	2	助理研究员	西北农林科技大学
仇欣然	3	无	西北农林科技大学
贾汉忠	4	教授	西北农林科技大学
王铁成	5	教授	西北农林科技大学
刘鹏	6	副教授	西北农林科技大学
祝可成	7	副教授	西北农林科技大学

五、主要完成单位

单位名称	排名
西北农林科技大学	1

六、完成人合作关系情况

完成人合作关系情况表					
序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	郭学涛/1	2020-2023	代表性论文 12345678	代表性论文 12345678
2	论文合著	丁玲/2	2020-2023	代表性论文 124	代表性论文 124
3	论文合著	仇欣然/3	2022	代表性论文 6	代表性论文 6
4	论文合著	贾汉忠/4	2020-2022	代表性论文 148	代表性论文 148
5	论文合著	刘鹏/5	2022	代表性论文 15	代表性论文 15
6	论文合著	王铁成/6	2020-2023	代表性论文 89	代表性论文 89
7	论文合著	祝可成/7	2020	代表性论文 8	代表性论文 8

该成果 1 完成人郭学涛教授与第 4 完成人贾汉忠教授为西北农林科技大学的同一个科研组，共同开展项目的研究工作，合作撰写发表论文（代表作 148）。

该成果第 1 完成人郭学涛教授与第 5 完成人刘鹏副教授为西北农林科技大学的同一个科研组，共同开展项目的研究工作，合作撰写发表论文（代表作 15）。

该成果第 1 完成人郭学涛教授与第 6 完成人王铁成教授为西北农林科技大学的同一个团队，共同开展项目的研究工作，合作撰写发表论文（代表作 89）。

该成果第 1 完成人郭学涛教授与第 7 完成人祝可成副教授为西北农林科技大学的同一个团队，共同开展项目的研究工作，合作撰写发表论文（代表作 8）。

该成果第 2 完成人丁玲，属西北农林科技大学博士后科研流动站研究人员，共同开展科研工作，撰写研究论文（代表作 124）。

该成果第 3 完成人仇欣然，属西北农林科技大学博士研究生，共同开展科研工作，撰写研究论文（代表作 6）。