

doi: 10.12029/gc20220307

延雨宸, 杨忠芳, 余涛. 2022. 土壤中微塑料的来源、生态环境危害及治理技术[J]. 中国地质, 49(3): 770–788.

Yan Yuchen, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2022. Sources, ecological hazards and treatment technologies of microplastics in soil[J]. Geology in China, 49(3): 770–788(in Chinese with English abstract).

# 土壤中微塑料的来源、生态环境危害及治理技术

延雨宸<sup>1</sup>, 杨忠芳<sup>1</sup>, 余涛<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083)

**摘要:**【研究目的】近年来,由微塑料造成的生态环境污染问题引起了广泛关注。【研究方法】本文通过查阅大量土壤微塑料方向的文献,综述了国内外关于土壤中微塑料的来源、危害及检测治理技术最新研究进展。【研究结果】主要包括:(1)土壤中微塑料的主要来源是没有高效回收的农用地膜的裂解,此外还有农业生产活动中使用含有微塑料的污水污泥、空气中的微塑料沉降到地表等;(2)土壤中的微塑料能吸附重金属、抗生素等污染物,改变土壤pH、容重等理化性质,影响蚯蚓等土壤动物的发育,降低参与土壤养分循环过程中关键微生物的活性,对土壤环境造成危害;(3)目前还没有统一的微塑料分离检测技术标准,目检法、光谱法和热分析技术是微塑料主要的分析方法。【结论】土壤中的微塑料会给环境及动植物健康带来不同程度的风险,进一步通过食物链威胁人类健康。未来的研究重点包括阻隔土壤微塑料的来源、土壤微塑料与重金属的复合污染机制和新兴的土壤微塑料检测技术。

**关键词:**土壤;微塑料;来源;生态风险;检测方法;治理技术;环境地质调查工程

**创 新 点:**(1)目前关于土壤微塑料方面的研究刚刚起步,本文综述了土壤微塑料对农作物、土壤环境的影响及在食物链中传播的风险,对今后有关环境污染和人体健康方向的研究有一定的帮助;(2)本文较为全面地整理了以农业生产活动为主的土壤微塑料来源,由于已被微塑料污染的土壤治理难度较高,笔者提出关于土壤微塑料源的阻断建议,希望能有效降低未来土壤中微塑料的输入量。

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)03-0770-19

## Sources, ecological hazards and treatment technologies of microplastics in soil

YAN Yuchen<sup>1</sup>, YANG Zhongfang<sup>1</sup>, YU Tao<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper is the result of environmental geological survey engineering.

**[Objective]** In recent years, ecological and environmental pollution caused by microplastics has attracted widespread

收稿日期:2022-01-08;改回日期:2022-05-09

基金项目:中国地质大学(北京)地调成果转化基金及中国地质调查局项目“西安城市群周边健康地质调查试点”(DD20211574)联合资助。

作者简介:延雨宸,女,1998年生,硕士生,资源与环境专业,主要从事环境地球化学研究工作;E-mail: yanyuchen98@163.com。

通讯作者:杨忠芳,女,1961年生,教授,地球化学专业,主要从事环境地球化学、生态地球化学方面的教学及科研工作;

E-mail: yangzf@cugb.edu.cn。

interest. **[Methods]**This paper reviews recent progress in research on the sources and hazards of microplastics and detection and treatment technologies investigated in a large number of studies. **[Results]**(1) The primary sources of microplastics in soil are the cracking of agricultural land film without efficient recycling, use of sewage sludge containing microplastics in agricultural production activities, and settling of microplastics from air to surfaces; (2) Microplastics in soil can adsorb heavy metals, antibiotics, and other pollutants, which can change the pH, bulk density, and physical and chemical properties of soil, affect the development of earthworms and other soil animals, and reduce the activities of crucial microorganisms involved in the soil nutrient cycle, thereby harming the soil environment; (3) No unified technical standard for microplastic separation and detection is currently available. Visual inspection and spectroscopic and thermal analysis techniques are the main methods for detecting microplastics. **[Conclusions]** Microplastics in soil present varied levels of risk to the environment and health of animals and plants and threaten human health through the food chain. Future research can focus on blocking the sources of soil microplastics, the pollution mechanism of soil microplastics and heavy metal compound pollution, and innovations in soil microplastic detection technologies.

**Key words:** soil; microplastic; source; ecological risk; detection method; treatment technology; environmental geological survey engineering

**Highlights:** (1) Research on soil microplastics is at its initial stage. This paper summarizes the impact of soil microplastics on crops and soil environment and the risk of their spreading to the food chain, providing useful reference for future research on environmental pollution and human health. (2) This paper elucidates the sources of soil microplastics on the basis of agricultural production activities. Owing to challenges in the remediation of soil polluted by microplastics, authors propose strategies for blocking the sources of microplastics in soil, with the primary aim of effectively reducing microplastic inputs in soil.

**About the first author:** YAN Yuchen, female, born in 1998, master candidate, majors in resources and environment, engaged in environmental geochemistry research; E-mail: yanyuchen98@163.com.

**About the corresponding author:** YANG Zhongfang, female, born in 1961, professor, majors in environmental geochemistry and ecogeochemistry related teaching and research; E-mail: yangzf@cugb.edu.cn.

**Fund support:** Supported by China University of Geosciences (Beijing) Geological Survey Achievement Transformation Fund and the project of China Geological Survey (No. DD20211574).

## 1 引言

塑料作为一种高分子化合物,广泛应用于包装、农业生产、建筑材料等方方面面的日常生活中,中国仅2020年度初级塑料产量达10542.20万t(中华人民共和国国家统计局),主要塑料类型有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二酯(PET),稳定性、降解性及主要用途详见表1。塑料的使用产生了大量垃圾,目前塑料垃圾的主要处理方式是焚烧和填埋(简敏菲等, 2020;董姝楠等, 2020),有研究预测(王翠芳等, 2021),到2050年,被填埋或丢弃到自然环境中的塑料垃圾将达1200000万t。

塑料具有稳定的特性,极难完全降解,在经过风化、光照、辐射等一系列自然作用后分解形成粒径<5 mm的塑料碎片被称为微塑料(microplastics, MPs),该词最早由Thompson et al.(2004)针对海洋环境中的塑料碎片提出,关于微塑料污染方面的

研究多集中在水体环境上(程荣等, 2018;雷晓婷等, 2020)。土壤环境方面起步较晚,Rillig在2012年首次提出微塑料可能会对土壤环境造成危害(Rillig, 2012),目前已有的研究多为土壤微塑料类型的鉴定及分布情况(Ding et al., 2020;程万莉等, 2020;王志超等, 2020),考虑到土壤与粮食生产关系密切,土壤中的微塑料研究成为一个热点方向。

土壤中微塑料的来源有农业生产活动(使用农用地膜、污水处理厂排放的污水污泥)及大气沉降(图1),其中土壤残留农用地膜的裂解是最主要的微塑料来源(郝爱红等, 2021)。覆盖塑料薄膜可以保持土壤的温度和水分,有效预防虫害、杂草生长,提高农作物产量,因此早年间农用塑料产品在农业生产中被大力推广。虽然近两年,农用地膜领域的研究热点从提高农作物产量转向微塑料带来的污染(刘婷婷等, 2020),但以2019年为例,中国的地膜使用量还是超过了240万t(中华人民共和国国家统计局),值得重视。

表1 常见塑料的主要性质、降解方法及主要用途

Table 1 Characteristics, degradation methods and main uses of common plastics

塑料	化学式	主要性质	降解方式	主要用途
聚乙烯(PE)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H}_2 \\   \\ \text{C} - \text{C} \\   \\ \text{H}_2 \end{array} \right]_n$	无色、无味、无毒;半透明;化学稳定性好	光降解和生物降解为主	农用薄膜;渔网等合成纤维;奶瓶等中空制品;自行车零件等
聚丙烯(PP)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H}_2 \\   \\ \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	耐冲击、有弹性;物理化学性质较稳定	光降解和生物降解为主	编织袋、打包袋;电器、电灯等电器的阻燃性零件
聚氯乙烯(PVC)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H}_2 \\   \\ \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} \right]_n$	电绝缘性好;受热分解释放有毒气体氯化氢;物理化学性质稳定	热降解和光降解为主	农用薄膜;包装材料;门框及节能材料;各种用途的硬管软管
聚苯乙烯(PS)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H}_2 \\   \quad   \\ \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	无色、透明;性脆、低温易裂;化学稳定性和热稳定性较好	光降解和生物降解为主	灯具;室内装修板材;玩具等
聚对苯二甲酸乙二酯(PET)	$\left[ \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{O} \right]_n$	无毒;韧性强、能成膜;热稳定性较好	化学降解和生物降解为主	变压器外壳等电器;录像带等电子产品;汽车配件

相较于生活中常见的塑料垃圾,微塑料的比表面积更大,易成为土壤中有害物质的迁移载体(陈璇等, 2021),是土壤环境中不可忽视的一种新型污染物。微塑料既带有增塑剂、染色剂等添加剂的毒性,又吸附了土壤中的重金属、抗生素等有害物质,这种复合污染对多种农作物生长发育有负面影响,还会影响到蚯蚓等土壤动物的生存及一些微生物

的活性,对生态环境造成危害(邵媛媛等, 2020; Liu et al., 2021; 万红友等, 2021)。被农作物吸收的微塑料还有进入食物链的可能(骆永明等, 2018),这将给人类健康带来极大风险。

迄今为止,关于土壤微塑料领域的实验研究较少,研究进展缓慢。本文对目前土壤中微塑料的相关研究成果进行了整理,从农业生产的角度总结了

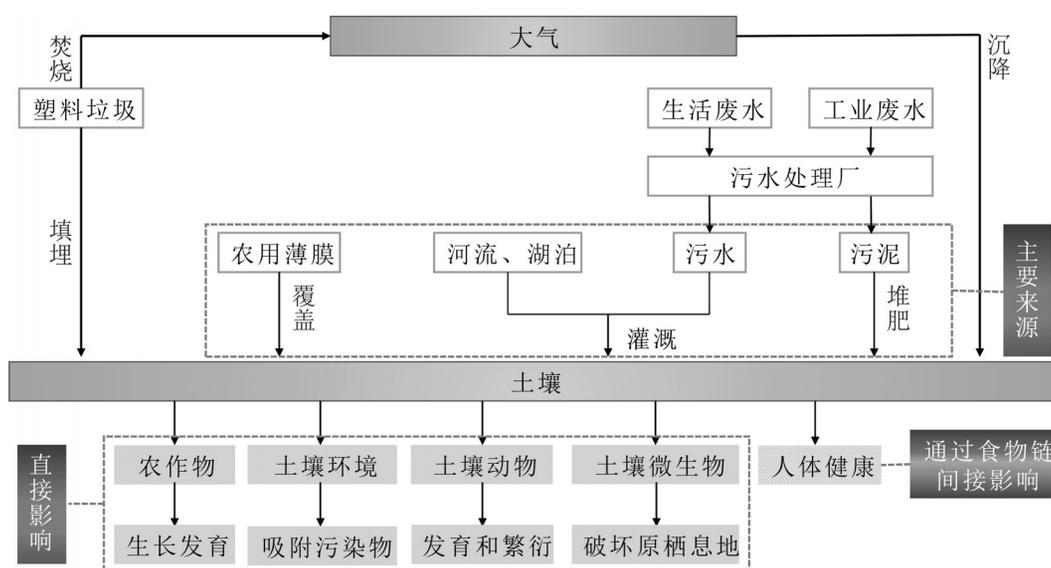


图1 土壤中微塑料的主要来源及影响

Fig.1 The main sources and effects of microplastics in soil

土壤中微塑料的主要来源,列举了土壤微塑料对部分农作物及生态环境的影响,并分析了微塑料进入食物链的可能性和给人类健康造成的威胁。对于土壤微塑料的污染,本文还介绍了光谱分析技术和热分析技术等常用的鉴别技术及太赫兹光谱等新兴技术,最后针对性地提出几条建议,希望对该领域的深入研究有帮助。

## 2 土壤中微塑料的来源、分布及阻断建议

不同用地类型的土壤中微塑料丰度存在差异性,丰度较高的用地类型主要为农田,这也与微塑料的主要来源密切相关。

### 2.1 土壤中微塑料的主要来源

土壤中微塑料的来源主要有农用地膜、农用灌溉水中的微塑料、污水处理厂排放的污泥和大气沉降等(唐杉等, 2021)。

农业生产活动中会产生大量塑料废物,如塑料包装、化肥编织袋等,但主要的塑料来源是回收率低的薄膜(韩丽花等, 2020)。农用地膜的成分多是聚乙烯和聚氯乙烯,主要有质量轻、保温性好、能提高农作物的质量和产量等特点,因此在全球农业生产中被广泛应用,特别是中国西北干旱—半干旱地区(程万莉等, 2020)。中国是农业大国,随着早些年对覆膜栽培技术的大力推广,塑料薄膜的使用量急速增长,后介于人们对“白色污染”的认知逐渐加深,塑料薄膜的使用率开始下降(李鹏飞等, 2021)。从2011年到2019年,中国农用塑料薄膜的使用量为229~260万t(图2),仅2017年一年,中国农用塑料薄膜的使用量约占世界总使用量的70%,覆盖塑料薄膜的土地面积更是达到了世界总覆盖土地面积的90%(靳拓等, 2020)。目前,中国农用地膜的回收率不足60%,使用后的塑料薄膜没有高效的回收机制(范玉梅等, 2019; 马兆嵘等, 2020),因此可在绝大多数覆盖过塑料薄膜的农田土壤中检测到微塑料的存在(白娜玲等, 2020),时间越久,土壤中微塑料含量越高。农用地膜的使用成为农田土壤中微塑料的主要来源。

农用灌溉水中的微塑料可以直接进入并长期存在于土壤中,是土壤中微塑料的一个重要来源。农用灌溉水主要分为两类:以地表水为主的天然水

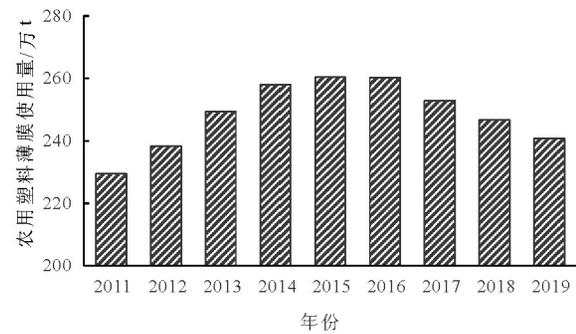


图2 中国近年农用塑料薄膜使用量统计图(据中华人民共和国国家统计局, 2021)

Fig.2 Statistics of the use of agricultural plastic film in China in recent years (Data from the National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, 2021)

与经污水处理厂处理后排放的污水。地表水是农田主要的灌溉水源,但各国河流、湖泊中逐步发现了微塑料的踪迹。以中国为例,太湖地表水样品中微塑料的丰度为3400~25800个/m<sup>3</sup>,长江口表层水中微塑料的平均丰度为4137个/m<sup>3</sup>(徐湘博等, 2021)。此外,连受人为活动干预较少的青藏高原地表水中也有微塑料,怒江地表水中微塑料平均含量约892个/m<sup>3</sup>,对应沉积物中微塑料平均含量约287个/m<sup>3</sup>;澜沧江地表水中微塑料平均含量约483个/m<sup>3</sup>,对应沉积物中微塑料平均含量约450个/m<sup>3</sup>(Liu et al., 2021),因此天然灌溉水也是向土壤输送微塑料的一个重要方式。在干旱、半干旱等缺水地区,农用灌溉水主要是净化后的污水。污水多为工业废水和生活废水,微塑料含量较高,塑料类型与日常使用的塑料制品相关,例如化纤衣物、日常清洁洗护用品以及使用薄膜包装的食品等(侯军华等, 2020)。污水在经过处理厂的一级二级处理后,污水中超过90%以上的微塑料可被去除(李小伟等, 2019;图3),但通过前人调查数据可知,污水原水中微塑料含量高达316万个/m<sup>3</sup>,经过处理后的污水中微塑料含量仍可达12.5万个/m<sup>3</sup>(徐湘博等, 2021),即使经过处理明显降低了污水中的微塑料含量,但由于基数较大,用于灌溉还是会向土壤输送大量的微塑料。

污水处理厂排放的污泥中N、P、K等营养元素含量较高,能够增强土壤肥力,因此常作为肥料或土壤改良剂应用于农田土壤中(董姝楠等, 2020),但是污水中大部分的微塑料将通过污水处理厂的沉

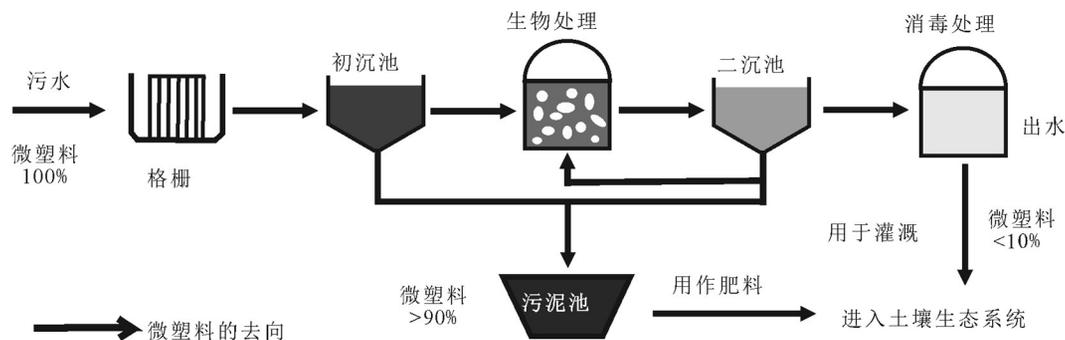


图3 污水中微塑料的去向示意图(据李小伟等,2019修改)

Fig.3 Schematic diagram of the whereabouts of microplastics in sewage (modified from Li Xiaowei et al., 2019)

降处理后进入到污泥中,使得污泥中微塑料的富集率高于90%(李小伟等,2019)。中国还没有对污泥中的微塑料进行过深入研究,但与发达国家的对比可以看出,通过污泥进入土壤的微塑料数量极高。有数据显示,2017—2018年,欧盟的污泥产量约4400万t,美国的污泥产量约3800万t,中国的污泥产量约5500万t,高于美国和欧盟。由于施用污泥,欧洲和北美农田土壤中每年将分别引入6.3~43万t和4.4~30万t微塑料(李鹏飞等,2021),根据污泥产量与土壤引入量的关系估算,可得中国农田土壤每年引入的微塑料为7~50万t,数量巨大,风险极大。此外,由污泥引入微塑料的量还可能存在地区性差异,例如中国东部的山东省和江苏省污泥中的微塑料含量分别约为30700个/kg、29000个/kg,而位于西南部的云南省污泥中的微塑料含量明显偏低,仅为7700个/kg(朱莹等,2019),即更为发达的地区,污泥向土壤引入的微塑料量更大。

微塑料的大气沉降量也不容忽视,巴黎周边大气环境中微塑料类型多为纤维状,每天沉降量可达29~280个/m<sup>2</sup>,中国广东东莞大气环境中微塑料每天的沉降量约为175~313个/m<sup>2</sup>(杨光蓉等,2021)。针对极地、青藏高原等人为活动和工业影响较少的偏远地区土壤中仍存在微塑料的现象,大气沉降有可能是最主要的原因(Evangeliou et al., 2020; 杨杰等,2021)。不过目前关于大气沉降中微塑料的研究较少,关于微塑料在大气循环中的迁移方式及沉降通量等还有待进一步探究。

## 2.2 中国不同地区土壤微塑料分布情况

表2总结了我国部分地区土壤中微塑料的丰

度,可以看出耕地区的土壤中微塑料含量明显高于景区等其他用地类型,且西北部半干旱地区农田微塑料含量整体更高,说明土壤中的微塑料主要来源于农业生产活动。但目前不同土壤微塑料研究所采用的采样方式、提取方法等还未统一规范,直接对比不同地区土壤微塑料丰度可得的信息量有限。

### 2.3 土壤中微塑料源的阻断

针对越来越多的、未被正确处理的塑料垃圾,最好的处理办法是开创高效的塑料回收再生产技术,同时减少塑料产品的生产,寻找可降解的新材料来代替(金灿等,2021)。以土壤中微塑料主要来

表2 中国不同地区土壤微塑料平均丰度统计  
Table 2 Statistics of the average abundance of soil microplastics in different regions of China

地点	用地类型	微塑料平均丰度	参考文献
黑龙江佳木斯	公园	0.034个/m <sup>2</sup>	王雪力等(2020)
沈阳周边	耕地	1327.69 mg/kg	时馨竹等(2021)
新疆	耕地	206.46 kg/hm <sup>2</sup>	胡灿等(2019)
甘肃张掖和武威	耕地	2020个/kg	程万莉等(2020)
甘肃中东部	耕地	6900个/kg	
陕西北部	耕地	3630个/kg	
陕西宝鸡	耕地	2815个/kg	宋佃星等(2021)
内蒙古河套灌区	耕地	4316个/kg	王志超等(2020)
山西汾河	耕地、工业区	(290.5±15.1)个/kg	朱宇恩等(2021)
河南开封	耕地	9543个/kg	张伟平(2020)
上海浦东	耕地	(79.2±12.3)个/kg	张宇恺(2021)
福建漳州	景区	102个/kg	邓加聪等(2019)
云南滇池	耕地、退耕湿地	19660个/kg	刘亚菲(2018)

源——农用塑料薄膜为例,一方面应该在塑料薄膜老化之前寻找高效的回收方式,或者使用极易降解的材料生产新型农用塑料薄膜,尽量避免薄膜残留在农田中,分解产生微塑料。另一方面应该重视土壤中残留薄膜的清理工作,对污染严重的耕地区多次、重点清理,探索高效的、可大规模提取或治理土壤中微塑料的技术(胡灿等, 2019; 马兆嵘等, 2020),例如尝试从微生物的角度入手通过生物降解的方法去除土壤中的微塑料(张佳佳等, 2021)。对于从污水污泥途径进入土壤的微塑料,应该将重点放在污水处理厂,可使用分滤、溶气浮选等有效降低微塑料含量的处理方法(扈瀚文等, 2020)。除此之外,中国还应该针对微塑料的产生、使用、迁移、转化和处置等环节,出台相关的国家标准,建立全过程的法律监管体系(王欢欢等, 2020),为微塑料的防治工作提供保障。

### 3 土壤中微塑料残留的影响

残留在土壤中的微塑料会慢慢富集,造成生态隐患,例如河套平原连续覆膜耕20年后农田中的地膜残留量达到了90.75 kg/hm<sup>2</sup>(王志超等, 2020),高于农田地膜残留量75 kg/hm<sup>2</sup>的标准值(农田地膜残留量限值及测定标准(GB/T 25413—2010))。残留

在土壤中的微塑料一方面会改变土壤理化性质,扰乱土壤原有的动物、微生物秩序,另一方面会被植物吸收,通过植物籽实进入食物链中,给人体健康带来风险。

#### 3.1 对农作物的影响

土壤中的微塑料附在农作物根部,会堵塞根部细胞壁上运输水分及营养物质的通道,粒径较小的微塑料甚至能通过细胞壁通道进入植物体内(冯雪莹等, 2021)。李瑞杰等(2020)针对农作物中微塑料的转运进行了大量探究,发现在砂培条件下小麦的根尖、根毛或者侧根能吸收聚苯乙烯微塑料颗粒,这些颗粒通过外皮层到木质部,并进一步转移到地上部,最终进入到小麦体内。与小麦相似,生菜根部积聚的聚苯乙烯微球也可随植物蒸腾作用和营养运输从根部转移到茎叶等可食部位(周雨苗等, 2021)。

进入农作物的微塑料会对农作物的生长有一定的影响,具体的影响情况在微塑料类型、大小、浓度和农作物类型不同时各不相同,表3列举了土壤中微塑料对几种常见农作物植株生长的影响。廖苑辰等(2019)通过使用聚苯乙烯微塑料进行实验,得出水培法微塑料浓度在20 mg/L的情况下,微塑料对小麦茎长影响不大;当水培法微塑料浓度达到

表3 不同种类微塑料对部分作物植株生长的影响

Table 3 Effects of different types of microplastics on the growth of some plants

作物类型	微塑料种类	对作物植株生长的影响	参考文献
小麦	聚苯乙烯(PS)	随着聚苯乙烯微塑料浓度的增加,小麦根长和茎长均呈降低趋势	廖苑辰等(2019)
小麦	低密度聚乙烯(LDPE)	低密度聚乙烯(LDPE)会对叶片数量、叶片面积有抑制作用	Qi et al.(2018)
大豆	聚氯乙烯(PVC)	中高浓度的聚氯乙烯微塑料能显著抑制大豆幼苗的叶面积和株高,但随着时间的延长影响能力逐渐降低	安菁等(2021)
水稻	聚苯乙烯(PS); 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)	两种微塑料均对水稻种子发芽能力的影响表现为低促高抑,对根长和芽长的影响基本表现为促进作用	王泽正等(2021)
小葱	聚酰胺(PA)	在相同浓度下,聚酰胺能明显抑制小葱茎长,对根长也有微弱抑制作用,对叶片量却有明显的促进作用	de Souza Machado et al.(2019)
黄瓜	聚氯乙烯(PVC)	粒径偏小的聚氯乙烯微塑料降低了黄瓜幼苗根长,而大粒径的对根长无显著影响	李贞霞等(2020)
芦苇	聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚苯乙烯(PS)	微塑料含量更高的地方芦苇长势更好	岳俊杰等(2021)

200 mg/L的情况下,微塑料培育出的小麦茎长不足无塑料小麦茎长的一半。安菁等(2021)也证实随土壤中聚氯乙烯微塑料含量的增加,大豆苗期生长有被抑制的趋势。Qi et al. (2018)的实验同样表明土壤中低密度聚乙烯微塑料残留会对小麦植株的叶片有抑制作用,不过这种抑制作用会在蚯蚓存在时减轻。但微塑料对不同类型作物的影响存在差异性,例如在黄河三角洲湿地地区的芦苇表现为土壤中微塑料含量越高,生长状态越好(岳俊杰等, 2021),还有王泽正等(2021)对水稻的研究表明,聚对苯二甲酸乙二醇酯微塑料对水稻种子发芽的影响表现为低促高抑。

微塑料还可以对农作物的光合色素产生影响,进而影响到农作物的生长,一般认为低浓度的微塑料可促进农作物叶片的光合作用,高浓度的微塑料则会起抑制作用。有实验表明,当5  $\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微塑料浓度达到100 mg/L时,培育出的小麦叶片中光合色素的含量明显降低(廖苑辰等, 2019)。土壤中微塑料浓度达到一定程度可抑制农作物光合作用的这一结论,在李贞霞等(2020)对黄瓜的研究中同样适用,他们通过实验得出土壤中10 mg/kg剂量的聚氯乙烯微塑料会损害黄瓜叶片光合系统,阻碍蛋白质的合成。土壤中微塑料积累还能影响到农作物体内可溶性蛋白的合成,这会直接导致农作物氮素利用率降低,作物籽粒不饱满等负面影响(陈熹等, 2020)。

### 3.2 对生态环境的影响

在风化、光照等作用下,塑料内部分子键断裂,会破碎成微塑料颗粒(Liu et al., 2021)。塑料在加工过程中通常会加入增塑剂、染色剂等多种化学添加剂,这些有害物质在塑料裂解过程中被释放到土壤中,造成土壤污染(李敏等, 2022)。裂解后的微塑料有着较强的疏水性和较大的比表面积,会成为环境中有害物质的迁移载体,且随着时间的流逝,在多种作用下,碎片化的微塑料表面会越来越粗糙,可吸附位点越来越多,内部结构开始改变,吸附能力增强(刘沙沙等, 2019; 柴炳文等, 2021; 周倩等, 2021)。

首先,微塑料能吸附土壤重金属元素,降低了重金属元素可交换态的浓度,削弱了重金属元素的迁移能力,将更多的重金属元素固定在土壤中,造

成土壤污染(张永双等, 2017; 朱永官等, 2019; 万红友等, 2021)。但是,聚对苯二甲酸乙二醇酯微塑料颗粒却能将Cd、Pb和Zn三种重金属元素搬运至小麦根部再解吸附,使得这三种重金属元素更容易进入农作物中,增加了重金属元素的生物有效性(冯雪莹等, 2021)。其次,微塑料能吸附土壤有机污染物。以聚乙烯微塑料(10~180  $\mu\text{m}$ )为例,当其粒径降至纳米级(70 nm)时,对多氯联苯等持久性有机污染物的吸附能力将高出1~2个数量级(朱莹等, 2019)。但是也有研究指出,不同的微塑料对不同的有机污染物的吸附能力不同,如聚乙烯微塑料对阿特拉津的吸附能力较弱,甚至还能加速其在土壤中的迁移能力(万红友等, 2021)。微塑料还能吸附土壤中的抗生素,在一定程度上减慢抗生素的降解速度并加快某些类型抗生素的迁移。杨杰等(2019)发现,聚乙烯、聚酰胺和聚苯乙烯三种微塑料都能吸附四环素,但聚乙烯对四环素的吸附能力高于聚酰胺和聚苯乙烯。综上所述,土壤环境具有复杂性,微塑料种类具有多样性,因此有关土壤中微塑料与重金属等有害物质的复合污染方面的研究还有待进一步深入。

土壤中残留的微塑料可以改变土壤pH、电导率等性质,例如聚乙烯微塑料会降低土壤pH值(杨光蓉等, 2021),聚乳酸微塑料会使土壤pH升高,电导率降低(冯雪莹等, 2021),而pH的变化可以改变微塑料吸附污染物的能力,进而影响到土壤环境(Luo et al., 2020)。此外,微塑料还会改变土壤的容重、团聚体大小和数量,例如聚乙烯可以显著提高土壤水稳性团聚体的含量(朱永官等, 2019),进而影响到土壤的通气性和透水性。不同类型和浓度微塑料对不同土壤的持水能力均有明显影响,一般表现为增加了土壤团聚体的大小和数量,从而使土壤更加疏松,水分挥发更快,持水能力减弱(de Souza Machado et al., 2019; 冯雪莹等, 2021)。

土壤中的微塑料有被土壤动物误食的可能,会对动物自身造成伤害。目前的探究大多集中在蚯蚓上,也涉及有线虫、蜗牛等动物(表4)。郝爱红等(2021)在大量前人的实验里发现,土壤中不同浓度、不同种类微塑料均会不同程度损伤蚯蚓的肠道,抑制生长发育,严重的还会就降低繁殖率和存活率,甚至产生跨代的毒性。罗小凤等(2021)的实验

表4 不同种类微塑料对部分土壤动物的影响

Table 4 Effects of different types of microplastics on some soil animals

动物类型	微塑料种类	对动物的影响	参考文献
蚯蚓	聚苯乙烯(PS);	降低蚯蚓体重、抑制生长和繁殖;随着聚乙烯	郝爱红等(2021); 杨杰等(2021)
	聚乙烯(PE)	浓度的升高,蚯蚓死亡率升高	
跳虫	聚苯乙烯(PS)和聚乙烯(PE)等 多种微塑料混合	使跳虫蜕皮期延长,蜕皮量减少;幼虫容易死 亡,成虫产卵量降低	罗小凤等(2021)
蜗牛	聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET);	食物摄入和排泄减少,肠壁绒毛损伤;	郝爱红等(2021); 杨杰等(2021)
	聚酯纤维(PES)	引起蜗牛胃肠道的损伤	
弹尾虫	聚苯乙烯(PS);	降低弹尾虫运动速度,改变肠道菌落;	薛颖昊等(2021)
	聚乙烯(PE)	抑制成虫繁殖	
线虫	聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET);	降低成虫繁殖能力;	冯雪莹等(2021)
	聚苯乙烯(PS)	增加后代的死亡率	

证明,微塑料会给跳虫幼虫带来死亡风险,减少成虫的产卵量并限制成虫体长。接触微塑料的线虫和弹尾虫同样会表现出代谢紊乱、抑制生长发育等与蚯蚓和跳虫相似的情况(冯雪莹等, 2021; 薛颖昊等, 2021)。对蜗牛而言,聚酯纤维微塑料会降低蜗牛体内肝脏抗氧化物酶的活性,使脂质过氧化,从而引起胃肠道的损伤(杨杰等, 2021)。

由于不同地区土壤质地、理化性质等条件均有差异,因此不同的微塑料对土壤不同酶活性的影响有利有弊(Liu et al., 2017; 卢萍等, 2021),但大多实验表明,微塑料会通过影响关键酶的活性,影响土壤有机碳、氮等养分的循环能力(张秀玲等, 2021; 胡志娥等, 2022),进而影响农作物的生长。土壤中的微塑料与微生物之间的密切联系还体现在两方面,一方面是微塑料可以吸附微生物,成为土壤中微生物的迁移载体。在吸附土壤微生物后,微塑料表面会形成一层生物膜,这层生物膜可以提高土壤中脲酶和过氧化氢酶等酶的活性(冯雪莹等, 2021),增加胞外酶的分泌,进而促进土壤中营养元素的迁移(任欣伟等, 2018)。第二个方面是微生物对微塑料有一定的降解能力(骆永明等, 2021),但是微塑料在降解过程中会释放有毒有害物质污染土壤(冯雪莹等, 2021),这反而会影响到土壤中的微生物,如土壤中二丁基邻苯二甲酸酯含量的提高会降低土壤微生物的多样性(朱永官等, 2019)。费禹凡等(2021)通过多组实验得出,土壤中聚乙烯微塑料可以改变原有的细菌群落结构,但与微塑料添加量之间是否有规律还不能确定。也就是说,目前关于微塑料对不同土壤类型和不同微生物种类的影响机制方面的

研究还不够深入,但如果能找到微生物降解微塑料的规律,可以尝试通过微生物无危害降解微塑料的新方法。

### 3.3 对人类健康的影响

微塑料可通过食物链富集,产生生态毒性效应,但相关研究数量较少,且多为海洋生物,例如 Farrell et al.(2013)证实微塑料可以通过贻贝进入螃蟹的淋巴组织并富集,这使得越来越多的学者开始关注食物链中微塑料对人类健康的影响。

目前可能对人体健康造成威胁的食物链类型有两种。一种是土壤—蚯蚓—鸡—人。有数据表明,微塑料从土壤到蚯蚓粪的富集系数可达12.7,从土壤到鸡粪的富集系数高达105(骆永明等, 2018),即土壤中的微塑料可以进入食物链中。粒径<50 μm的微塑料更易被蚯蚓误食,大量有毒有害物质会吸附在这些小粒径的微塑料上,进入蚯蚓体内(张凯等, 2018),因此,在这条食物链顶端的人类面临着微塑料带来的巨大风险。第二种食物链类型是土壤—农作物—人,但目前已有研究只能说明微塑料影响农作物的生长,在是否能够真的富集在农作物籽实中还没有被大量探究。仅在一项烟草实验里说明,纳米级微塑料能通过细胞内吞作用进入烟草细胞(骆永明等, 2018),即小粒径的微塑料极有可能在农作物籽实中富集,但还需要通过多种试验去证实。

目前关于食物链中微塑料对人类健康影响的探究还不够深入,可能存在的危害可参考已有的小鼠实验。接触微塑料后小鼠体内的活性氧增多,出现应激反应,进一步引发炎症。另外,微塑料会导致小鼠肝脏中ATP水平和脂质代谢能力同时下降,

表5 塑料对人体的不良影响(修改自张思梦等, 2019)

Table 5 The adverse effects of plastics on the human body (modified from Zhang Simeng et al., 2019)

塑料	不良影响
聚氯乙烯(PVC)	可引发慢性支气管炎、皮肤病,影响视听器官的正常工作;还可能造成肝功能障碍等疾病,严重的可致癌,影响后代
邻苯二甲酸酯(PAES)	造成人体内分泌紊乱,可能还会导致哮喘和再生障碍
聚苯乙烯(PS)	会刺激五官,并可能出现头晕和昏迷等病症;可以存储在体脂内,使得淋巴和造血系统的发病率升高
聚丙烯酸(PAA)	可引起呼吸困难、呕吐、腹泻、恶心、虚弱、头痛和疲劳
聚四氟乙烯(PTFE)	会刺激眼睛、鼻子和喉咙,并可能导致呼吸困难

影响小鼠的正常成长和繁殖(张羽西等, 2020)。这与塑料和增塑剂对人体健康的不利影响相似,表现为急慢性疾病、内分泌紊乱等(张思梦等, 2019; 蒲生彦等, 2020),详见表5。此外,有研究证实吸入空气中微塑料会给人体肺部造成危害,引发哮喘、慢性支气管炎和肺炎等疾病,且不易被清除,成为诱导癌症的因素之一(张瑾等, 2021),因而大气中的微塑料同样值得重视。

#### 4 土壤中微塑料的提取和检测技术

由于土壤环境的复杂性,土壤中的微塑料很难被分离出来。一般先通过消解法去除微塑料表面的有机质等干扰因素,再通过物理法或化学法提取

微塑料进行检测。

##### 4.1 土壤中微塑料的检测技术

微塑料类型、大小和形态多种多样,选择合适的技术手段可以有效识别微塑料,进一步有针对性地进行污染治理。目前土壤微塑料的检测方法一般为目检法、光谱法和热分析技术,但还没有一种通用的、高效的、快速的、低成本的分析方法(Li et al., 2020),太赫兹光谱法等新兴技术还处在探索阶段,各类方法的优缺点对比详见表6。

目检法是用肉眼或在显微镜下直接、快速识别微塑料,一般依据微塑料的大小、形状、颜色等特征进行分类,但主观性较强,容易误判,且很难识别 <500  $\mu\text{m}$  的微塑料颗粒(张宇恺等, 2021),因此不单独使用,可

表6 土壤中微塑料鉴别技术的优缺点对比

Table 6 Comparison of advantages and disadvantages of microplastics identification technology in soil

类别	技术名称	优点	缺点	参考文献
目检法	显微镜和扫描电镜	直接、快速识别微塑料	主观性较强,容易误判	张宇恺等(2021)
光谱法	红外光谱法	不会损坏微塑料,且鉴别结果更准确、更可信	处理均比较费时;	杜涛等(2020)
	拉曼光谱法	除鉴别微塑料外,还能提供聚合物组成的相关信息	均易受到土壤中有机质组分的影响	任欣伟等(2018)
热分析技术	裂解气相色谱-质谱法	可用于环境样品中微塑料的检测且无需进行样品的预处理	一般都会对样品造成损坏;对热裂解产物相似的微塑料有错判的可能,最好与目检法相结合	汤庆峰等(2019) 张宇恺等(2021)
	热重分析法	可不对样品进行预处理,存在用于大批量样品分析的可能	一般都会对样品造成损坏,有后续实验分析不可用	陈雅兰等(2021) 汤庆峰等(2019)
其他新兴技术手段	微区X射线荧光光谱	可以得到微塑料成分,有望用于追踪微塑料在复杂土壤环境中的迁移方式和来源	不详	柳检等(2021)
	太赫兹光谱技术	可快速测定微塑料的含量与大小等信息	不详	Li et al. (2021) 牟诗怡等(2021)
	X射线光电子能谱分析	可辅助探究土壤重金属污染	不详	宋佃星等(2021)

与扫描电镜结合使用,如图4所示为肉眼、显微镜和扫描电镜下4种形状微塑料的照片对比图。

红外光谱法和拉曼光谱法是微塑料的识别中较为常见的方法,与目检法相比,光谱鉴别法不会损坏微塑料,且鉴别结果更准确、更可信,但处理比较费时(杜涛等, 2020)。红外光谱法能够鉴别微塑料的聚合物成分,获取微塑料的数量信息,且配备阵列检测器的反射模式可以克服传统仪器在测定非均匀样品、不平整样品表面时存在的较大误差,是目前鉴别微塑料的理想方法(汤庆峰等, 2019),但对真实环境样品中的微塑料进行定量分析是否可靠还不能确定(Rocha-Santos et al., 2015)。拉曼光谱法除了能鉴定微塑料,还能提供聚合物组成的相关信息,在鉴定粒径  $>1 \mu\text{m}$  的塑料颗粒时,其空间分辨率高于红外光谱分析仪(汤庆峰等, 2019)。将拉曼光谱法与显微镜结合,可以在获得表面官能团信息的同时,观测到微塑料局部的微观形貌(张宇恺等, 2021)。由于红外光谱法和拉曼光谱法均易受到土壤中有机质组分的影响,所以进行分析之前,需要通过消解法减少有机质的干扰(任欣伟等, 2018)。

热分析技术是在程序控制温度下测量样品的性质随温度或时间变化的一类技术(张宇恺等, 2021),应用较多的为裂解气相色谱-质谱法(Py/GC-MS)和热重分析法(TGA)。热分析方法一般都会对样品造成损坏,如后续还需对样品进行其他分析,则此类方法不适用。

裂解气相色谱-质谱法(Py/GC-MS)是根据微塑料受热裂解成的小分子化合物,确定微塑料类型的技术,该技术适用于环境样品中微塑料的检测且无需进行样品的预处理,但对于热裂解产物相似的微塑料存在错判的可能(汤庆峰等, 2019; 张宇恺等, 2021),分析和统计微塑料的数量、形状、尺寸等信息时需要辅以目检法等其他方法(杜涛等, 2020)。

热重分析法(TGA)同样是通过微塑料受热后的变化情况来分析微塑料类别的方法,配合差示扫描量热法(DSC)或质谱仪(MS)可全面、准确地分析微塑料样品(陈雅兰等, 2021)。差示扫描量热法(DSC)和热重分析法(TGA)相结合,可用于聚乙烯和聚丙烯的鉴定(汤庆峰等, 2019);质谱仪(MS)和热重分析法(TGA)相结合,可不对样品进行预处理,

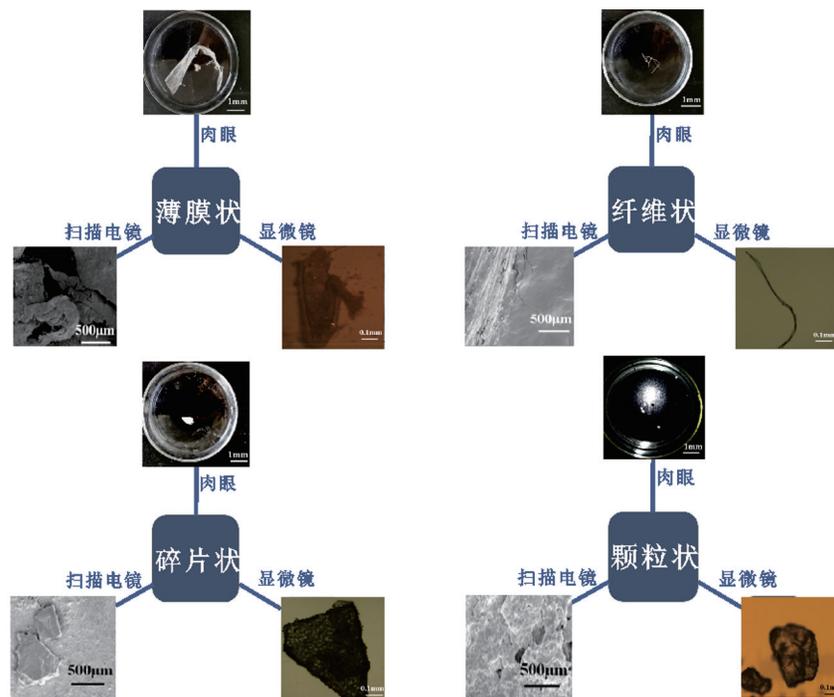


图4 肉眼、显微镜和扫描电镜下四种形态的微塑料(修改自 Ding et al., 2020)

Fig.4 Four shapes of microplastics under eyes, microscope and scanning electron microscope (modified from Ding et al., 2020)

直接定量分析出土壤样品中的涤纶树脂,未来可能成为一种常用于土壤环境样品中微塑料分析的技术,用于大批量样品的分析(陈雅兰等, 2021)。

除了上述较为常见的鉴别方法外,还有一些可行性有待深入探究的、新兴的技术手段。微区X射线荧光光谱( $\mu$ -XRF)是生态环境样品中分析元素的一种重要技术,但柳检等(2021)认为,这种技术也能够测定样品中亚微米尺度的物质组成,可以根据得到的样品中微塑料的X射线光电子能谱明确微塑料成分,未来有望用于追踪微塑料在复杂土壤环境中的迁移方式和来源。太赫兹光谱技术虽然还未用于微塑料的检测,但是其利用土壤中不同污染物具有特征光谱的特性及高分辨率成像方式(Li et al., 2021),是一种可能优于其他检测方法的新技术。牟诗怡等(2021)的研究表明,可根据样品中微塑料对太赫兹的吸收程度反推微塑料的含量与大小等信息,进一步判断土壤中微塑料的污染程度。X射线光电子能谱分析(XPS)在探究土壤微塑料对土壤环境的危害时可以辅助探究土壤重金属污染,例如宋佃星等(2021)使用X射线光电子能谱分析技术对从农田土壤分离出的微塑料样品进行检测,发现微塑料表面吸附了Cd等重金属。

#### 4.2 土壤中有机质消解技术

土壤环境非常复杂,有机质、团聚体等组分会大大影响微塑料的分离效果(陈娴等, 2020),因此在分离土壤中的微塑料之前进行预处理可减少土壤有机质造成的干扰。消解技术一般分为四种类型:酸消解、碱消解、酶消解及氧化法。

酸消解大多使用盐酸、硝酸和高氯酸,碱消解大多使用氢氧化钠和氢氧化钾。任欣伟等(2018)对比后得出,酸消解法可有效分解有机质等干扰物质,但也可以分解微塑料;碱消解法较为温和,不分解微塑料,但需要的消解时间较长,且无法消解不溶于碱的有机质。酶消解法一般使用脂肪酶、淀粉酶和蛋白酶等,有实验表明使用蛋白酶消解样品,可以在不分解微塑料样品的同时,使有机质的去除率高于97%(汤庆峰等, 2019),但目前酶消解法较多地用于生物质含量较高的物质中,在复杂土壤环境中的消解能力还有待进一步探究。

氧化法是几种消解方法中使用较多的一种,主要试剂包括过氧化氢和高锰酸钾。过氧化氢的成

分较为简单,30%的过氧化氢溶液对微塑料的破坏性最小,且能有效去除有机质,因而使用较为广泛(陈娴等, 2020; 邓延慧等, 2020)。陈雅兰等(2021)发现有实验使用降低过氧化氢浓度再升温的方法同样可以获得不错的消解效果,但是这种方法不适用于对温度敏感的聚合物。使用高锰酸钾溶液的实验较少,对于使用高锰酸钾消解土壤微塑料的可行性还有待证实。余构彬等(2017)的实验表明,0.4 mol/L高锰酸钾与(1:3)硫酸等量混合可使甘蔗地土壤有机质的去除率高于90%,进而有效提高了土壤微塑料的检出率。

综合每种消解方法的优缺点,有实验尝试在一次微塑料处理过程中使用多种消解方法。陈雅兰等(2021)根据前人用酶消解与过氧化氢处理相结合处理废水样品、用特定的顺序酶消解方法处理复杂的水生样品这两种方法,提出可尝试将Fenton试剂、十二烷基硫酸钠和特定的酶组合使用,此方式得到的土壤有机质消解效果更好。

#### 4.3 土壤中微塑料的分离技术

将土壤样品过筛可对微塑料进行初步分离,简化后续分离工作。不同国家和地区的筛分尺寸不同,土壤样品的处理通常建议先通过2 mm筛(陈雅兰等, 2021; 张宇恺等, 2021),再使用其他分离技术进一步处理。

土壤微塑料的分离方法中,最常见的是使用盐溶液浮选法,依据的是土壤中大多数微塑料密度在0.8~1.4 g/cm<sup>3</sup>范围内,与土壤的密度存在差异(王雪力等, 2020)。最初分离土壤中微塑料时的常用试剂是密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>饱和NaCl溶液,该试剂成分单一无害且价格便宜,但对聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚氯乙烯等高密度聚合物的提取效果较差(董明潭等, 2020)。有人在此基础上改良为使用密度更高的ZnCl<sub>2</sub>或者饱和NaI溶液,虽然微塑料的提取率有所升高,但由于试剂成本较高且会污染环境,很难被广泛使用(张宇恺等, 2021)。溴化钠溶液和多钨酸钠重液可能是合适的替代品,溴化钠溶液安全、价格适中且密度符合要求,多钨酸钠重液能够从富含有机物质的样品中分离出塑料颗粒(Okoffo et al., 2021)。周倩等(2016)利用浮选法的原理,在前人研究的基础上自行改进了连续流动-气浮分离一体化装置,该装置由液体存

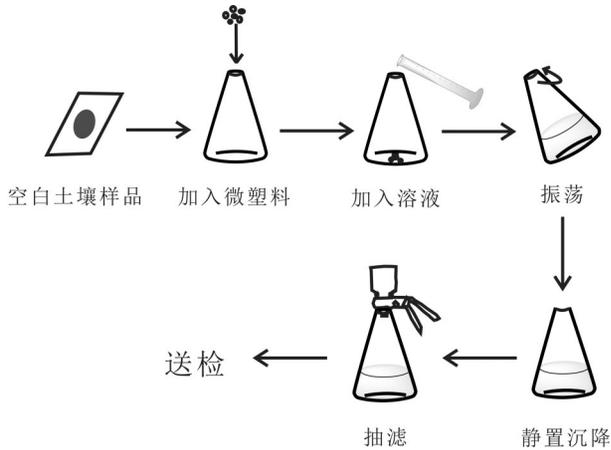


图5 油提取法分离土壤微塑料的步骤示意图(据董明潭等, 2020修改)

Fig.5 Schematic diagram of the separation of soil microplastics by oil extraction method (modified from Dong Mingtan et al., 2020)

储、气浮溢流、筛分回收三部分组成,不仅操作简单、人工干预少,而且微塑料回收率高达97%,为今后土壤和沉积物中大体积固体样品的微塑料的分离提供了一个不错的选择。

油提取法最先由Crichton et al.(2017)提出,该方法利用了塑料的亲油性,用植物油代替浮选法中的盐溶液,最后使用无水乙醇冲洗去油,可以避免对微塑料拉曼光谱分析结果造成影响,达到分离土壤中微塑料的目的,步骤如图5所示。通过油提取法和饱和NaCl溶液提取法的多组对比实验可知,对于不同土壤中常见种类的微塑料及高密度聚合物,使用油提取法后回收率较高,且在不同质地土壤与沉积物中均可使用(董明潭等, 2020;赵小丽等, 2021)。陈雅兰等(2021)查阅大量文献后认为,油提法简单、安全、成本不高且在已有实验中的提取效果较好,但是对于实际土壤环境中的微塑料样品,该方法的回收效果还有待进一步研究。

## 5 治理建议

微塑料的多样性加上土壤环境的复杂性,使得许多问题有待进一步探究。

(1)土壤微塑料的来源。土壤中大部分的微塑料来源于农业活动,建议在农业活动中,普及塑料制品危害性的认识,倡导科学的薄膜回收方法,同

时在农用塑料薄膜的材料选择上尝试突破,研发新型可完全降解塑料并投入农业生产中,减少因回收不完全而产生的微塑料的量。

(2)微塑料与其他污染物的复合污染。目前研究已证明微塑料可作为污染物质的迁移载体,但微塑料与其他污染物的复合污染机制还不够明确。建议尝试结合示踪法探究微塑料复合污染物的环境行为,结合地表水、地下水中微塑料污染方面的研究成果,进一步探究复合污染给生态环境和人体健康带来的危害。

(3)微塑料的检测与防治措施。建议制定土壤微塑料含量标准值和污染等级,完善相关的法律法规,加大对排污工厂的惩治力度。同时针对微塑料的多种检测方法,还应该统一分析鉴定的技术操作,并将实验室研发的治理技术运用在不同的土壤环境中,测试技术的可行性,探索可以广泛推广的土壤微塑料治理技术。

## 6 结论

(1)中国农耕地土壤中的微塑料含量往往高于其他用地类型,以使用农用薄膜为主的农业活动是土壤中微塑料的主要输入方式,所用薄膜材料的降解能力、农田的覆膜年限和回收效率均会影响到土壤微塑料的含量。

(2)微塑料可以堵塞农作物根部细胞运输水分和营养物质通道,也可以影响农作物光合色素的产生,二者均会影响到农作物正常的生长发育。粒径更小的微塑料可通过细胞壁通道进入农作物体内,有富集在可食部位进一步进入食物链的可能,给人类带来潜在的安全隐患。

(3)微塑料能改变土壤pH、持水性等理化性质,还能影响土壤中部分微生物的活性,甚至有被土壤动物误食的情况。此外,微塑料与土壤中的重金属、有机污染物和抗生素等污染物的协同作用也为生态环境带来巨大风险。

(4)目前,土壤环境中微塑料的提取和检测技术没有明确规定,大多实验采用消解样品中的干扰物质—密度分离法提取微塑料—镜下观察微塑料形状并记录数量—红外光谱法鉴定微塑料类型的操作流程,微区X射线荧光光谱和太赫兹光谱等新兴鉴别技术有望得到广泛应用。

## References

- An Jing, Liu Huanyu, Zheng Yan, Cheng Jun, Song Chun. 2021. Effects of soil microplastics residue on soybean seedlings growth and the physiological and biochemical characteristics[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 39(1): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- Bai Naling, Zhang Haiyun, Zhang Hanlin, Zheng Xianqing, Li Shuangxi, Zhang Juanqin, He Yu, Lü Weiguang. 2020. Effects of different mulching films on soil environment and taro growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(11): 2569–2577 (in Chinese with English abstract).
- Chai Bingwen, Yin Hua, Wei Qiang, Lü Guining, Dang Zhi. 2021. Relationships between microplastic and surrounding soil in an e-waste zone of China[J]. *Environmental Science*, 42(3): 1073–1080 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xi, Ma Qiong, Tao Zongya, Lü Haoyu, Li Shenglan, Wu Guo. 2020. Effects of microplastics on agronomic characters and nitrogen utilization efficiency of wheat[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 43(5): 664–670 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xian, Gu Xuanning, Bao Lijing, Ma Xuan, Pan Yanan, Ma Shanshan, Mu Yinghui. 2020. Extraction of microplastics in soil using floatation digestion method[J]. *Journal of Jiangsu University of Technology*, 26(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xuan, Zhang Jiaen, Wei Hui. 2021. Research progress and prospect on transportation, transformation and ecotoxicology of microplastics in environment[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 16(6): 70–86 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yalan, Sun Ke, Han Lanfang, Gao Bo. 2021. Separation, identification, and quantification methods in soil microplastics analysis: A review[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 1–17 (in Chinese with English abstract). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210329.1403.002.html>.
- Cheng Rong, Shi Lei, Zheng Xiang. 2018. Advances in water environmental science in 2017[J]. *Science & Technology Review*, 36(1): 176–188 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Wanli, Fan Tinglu, Wang Shuying, Li Shangzhong, Zhang Jianjun, Zhao Gang, Wang Lei, Dang Yi. 2020. Quantity and distribution of microplastics in film mulching farmland soil of Northwest China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(11): 2561–2568 (in Chinese with English abstract).
- Crichton E M, Noel M, Gies E A, Ross P S. 2017. A novel, density-independent and ftir-compatible approach for the rapid extraction of microplastics from aquatic sediments[J]. *Analytical Methods*, 9(9): 1419–1428.
- de Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, Bergmann J, Bachelier J B, Faltin E, Becker R, Görlich A S, Rillig M C. 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance[J]. *Environmental Science & Technology*, 53(10): 6044–6052.
- Deng Jiacong, Chen Xiaofeng, Zhang Zhipeng, Zhang Hong, Li Shiqian, Chen Qinghua. 2019. On the accumulation characteristics of microplastics from the surface soil offshore of Zhangpu in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Polytechnic Normal University*, (2): 75–83 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yanhui, Wan Bingzhou, Tanveer M.adyel, Li Dan. 2020. Collection and separation of microplastic samples in natural environment[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 32(4): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Ding L, Zhang S, Wang X, Yang X, Zhang C, Qi Y, Guo X. 2020. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in North-Western China[J]. *Science of The Total Environment*, 720: 137525.
- Dong Mingtan, Luo Zejiao, Xing Xinli, Zhang Qiaoqiao, Sun Yue. 2020. Separation of microplastics in soils and sediments with oil extraction protocol[J]. *Research of Environmental Sciences*, 33(6): 1522–1529 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shunan, Xia Jihong, Wang Weimu, Liu Hui, Sheng Liting. 2020. Review on impact factors and mechanisms of microplastic transport in soil and groundwater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(14): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Du Tao, Luo Si, Wang Xin, Xiang Wenping. 2020. Consideration on the establishment of a standardized analysis and detection method for microplastics in soil[J]. *Recycling Research*, 13(8): 34–37 (in Chinese with English abstract).
- Evangelidou N, Grythe H, Klimont Z, Heyes C, Eckhardt S, Lopez-Aparicio S, Stohl A. 2020. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions[J]. *Nature Communications*, 11(1): 1–11.
- Fan Yumei, Shi Jiaying, Gao Lijing. 2019. The source and detection of microplastics in soil systems[J]. *Chemical Industry Times*, 33(06): 28–31 (in Chinese with English abstract).
- Farrell P, Nelson K. 2013. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *carcinus maenas* (L.) [J]. *Environmental Pollution*, 177: 1–3.
- Fei Yufan, Huang Shunying, Wang Jiaqing, Luo Yongming, Zhang Haibo. 2021. Microplastics contamination in the protected agricultural soils and its effects on bacterial community diversity[J]. *Science Bulletin*, 66(13): 1592–1601 (in Chinese).
- Feng Xueying, Sun Yuhuan, Zhang Shuwu, Wang Fayuan. 2021. Ecological effects of microplastics on soil-plant systems[J]. *Acta*

- Pedologica Sinica, 58(2): 299–313 (in Chinese with English abstract).
- Han Lihua, Li Qiaoling, Xu Li, Lu Anxiang, Li Bingru, Gong Wenwen, Tian Jiayu. 2020. Abundance and distribution of microplastics of soils in Daliao River Basin[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 15(1): 174–185 (in Chinese with English abstract).
- Hao Aihong, Zhao Baowei, Zhang Jian, Ma Fengfeng, Duan Kaixiang, Liu Hui, Zhang Xin, Ran Fulin. 2021. Research progress on pollution status and ecological risk of microplastics in soil[J]. Environmental Chemistry, 40(4): 1100–1111 (in Chinese with English abstract).
- Hou Junhua, Tan Wenbing, Yu Hong, Dang Qiuling, Li Renfei, Xi Beidou. 2020. Microplastics in soil ecosystem: A review on sources, fate and ecological impact[J]. Environmental Engineering, 38(2): 16–27 (in Chinese with English abstract).
- Hu Can, Wang Xufeng, Chen Xuegeng, Tang Xiuying, Zhao Yan, Yan Changrong. 2019. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 35(24): 223–234 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhie, Xiao Mouliang, Wang Shuang, Tong Yaoyao, Lu Shunbao, Chen Jianping, Ge Tida. 2022. Effects of plastic mulch film on soil nutrients and ecological enzyme stoichiometry in farmland[J]. Environmental Science, 43(3): 1649–1656 (in Chinese with English abstract).
- Hu Hanwen, Yang Pingping, Xue Hanhan, Zeng Zhixin, Tian Yuping, Fan Keyan, Chen Junfeng, Wang Renjun. 2020. Research progress on environmental pollution of microplastics[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 49(1): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Jian Minfei, Rao Dan, Sun Wangshu, Li Wenhua, Zhou Longyin, Xiong Jianqiu. 2020. Occurrence characteristics of microplastics and heavy metals in pyrolysis incineration residues of small towns in Southern China[J]. Environmental Chemistry, 39(4): 1012–1023 (in Chinese with English abstract).
- Jin Can, Wang Yi, Dai Zhiguang, Huang Junwei. 2021. Exploration on the pollution and control measures of soil microplastics[J]. Environmental Science and Technology, 34(2): 73–78 (in Chinese with English abstract).
- Jin Tuo, Xue Yinghao, Zhang Mingming, Zhou Tao, Liu Hongjin, Zhang Kai, Xi Bin. 2020. Research advances in regulations, standards and recovery of mulch film[J]. Ecology and Environment Sciences, 29(2): 411–420 (in Chinese with English abstract).
- Lei Xiaoting, Lei Jinyin, Zhou Lina, He Jinqin, Qi Huanjun, Xu Jinyu. 2020. Status and analysis of study on effects of microplastics on farmland soil quality[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 61(2): 26–28 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Song Y, Cai Y. 2020. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks[J]. Environmental Pollution, 257: 113570.
- Li Min, Yang Lei, Zhao Fangkai, Chen Liding. 2022. Identifying the sources, migration and risks of microplastics in soil ecosystem along urban–rural landscape[J]. Acta Ecologica Sinica, 42(5): 1693–1702 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengfei, Hou Deyi, Wang Liuwei, Wu Weimin, Pan Shizhen. 2021. (Micro)plastics pollution in agricultural soils: Sources, transportation, ecological effects and preventive strategies[J]. Acta Pedologica Sinica, 58(2): 314–330 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruijie, Li Lianzhen, Zhang Yunchao, Yang Jie, Tu Chen, Zhou Qian, Li Yuan, Luo Yongming. 2020. Uptake and accumulation of microplastics in a cereal plant wheat[J]. Chinese Science Bulletin, 65(20): 2120–2127 (in Chinese).
- Li Xiaowei, Ji Yanyan, Mei Qingqing, Chen Lubei, Zhang Xiaolei, Dong Bin, Dai Xiaohu. 2019. Review of microplastics in wastewater and sludge of wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology, 38(7): 13–22 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Yao J, Nie P, Feng X, Liu J. 2021. An effective method for the rapid detection of microplastics in soil[J]. Chemosphere, 276: 128696.
- Li Zhenxia, Li Qingfei, Li Ruijing, Zhao Yafei, Geng Jiahui, Sun Yongdong, Zhou Junguo, Wang Guangyin. 2020. Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J]. Journal of Agro–Environment Science, 39(5): 973–981 (in Chinese with English abstract).
- Liao Yuanchen, Nazygul · Jahitbek, Li Mei, Wang Xiaolin, Jiang Lijuan. 2019. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (triticum aestivum) [J]. Environmental Science, 40(10): 4661–4667 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Yang X, Liu G, Liang C, Xue S, Chen H, Ritsema C J, Geissen V. 2017. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese Loess Soil[J]. Chemosphere, 185: 907–917.
- Liu Ruiping, Dong Ying, Quan Guocang, Zhu Hua, Xu Youning, M Elwardany Rafeay. 2021. Microplastic pollution in surface water and sediments of Qinghai–Tibet Plateau: Current status and causes[J]. China Geology, 4(1): 178–184.
- Liu Ruiping, Li Zhizhong, Liu Fei, Dong Ying, Jiao Jiangang, Sun Pingping, El–Wardany R M. 2021. Microplastic pollution in Yellow River, China: Current status and research progress of biotoxicological effects[J]. China Geology, 4(4): 585–592.
- Liu Shasha, Fu Jianping, Guo Chuling, Dang Zhi. 2019. Research

- progress on environmental behavior and ecological toxicity of microplastics[J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 38(5): 957-969 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tingting, Hou Lijun, Liu Jiayi, Wang Peiyuan, Lin Yanbing, Dang Yaai. 2020. Development trend analysis of plastic mulching film based on bibliometric analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 25(9): 90-103 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yafei. 2018. Quantity and Distribution of Microplastics in Farmland Soil of Lack Shore in Dianchi Lack[D]. Kunming: Yunnan University (in Chinese with English abstract).
- Liu Jian, Lao Changling, Yuan Jing, Sun Menghe, Luo Liqiang, Shen Yating. 2021. Recent progress in the application of X-Ray spectrometry in biology and ecological environment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(3): 675-685 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Yan Zhenhua, Lu Guanghua. 2021. Influence of microplastics on nitrogen cycle in different environments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 34(11): 2563-2570 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaofeng, Zhu Linglong, Xu Guoliang, Yu Shiqin, Ou Shiting, Chen Xiaohua. 2021. Toxicity of submicroplastic on soil collembolans *Folsomia Candida* by food exposure[J]. *Environmental Engineering*, 39(1): 187-193 (in Chinese with English abstract).
- Luo Y, Zhang Y, Xu Y, Guo X, Zhu L. 2020. Distribution characteristics and mechanism of microplastics mediated by soil physicochemical properties[J]. *Science of The Total Environment*, 726: 138389.
- Luo Yongming, Shi Huahong, Tu Chen, Zhou Qian, Ji Rong, Pan Xiangliang, Xu Xiangrong, Wu Chenxi, An Lihui, Sun Xiaoxia, He Defu, Li Yanfang, Ma Yini, Li Lianzhen. 2021. Research progresses and prospects of microplastics in the environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 66(13): 1547-1562 (in Chinese).
- Luo Yongming, Zhou Qian, Zhang Haibo, Pan Xiangliang, Tu Chen, Li Lianzhen, Yang Jie. 2018. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(10): 1021-1030 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhaorong, Liu Yousheng, Zhang Qianqian, Ying Guangguo. 2020. The usage and environmental pollution of agricultural plastic film[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 15(4): 21-32 (in Chinese with English abstract).
- Mu Shiyi, Yang Meihui, Chen Qinqing, Huang Haochong, Ma Yuanyuan, Hao Sibao, Zhang Zili, Zheng Zhiyuan. 2021. Study on detection and analysis of soil pollutants by terahertz spectroscopy[J]. *Experimental Technology and Management*, 38(4): 89-93 (in Chinese with English abstract).
- National Bureau of statistics of the people's Republic of China. 2021. Agriculture - use of agricultural plastic film [dB / OL] <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- Okoffo E D, O'Brien S, Ribeiro F, Burrows S D, Toapanta T, Rauert C, O'Brien J W, Tschärke B J, Wang X, Thomas K V. 2021. Plastic particles in soil: State of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts[J]. *Environmental Science-processes & Impacts*, 23(2): 240-274.
- Pu Shengyan, Zhang Ying, Lü Xue. 2020. Review on the environmental behavior and ecotoxicity of microplastics in soil-groundwater[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 15(1): 44-55 (in Chinese with English abstract).
- Qi Y, Yang X, Pelaez A M, Huerta L E, Beriot N, Gertsen H, Garbeva P, Geissen V. 2018. Macro- and micro- plastics in soil- plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*triticum aestivum*) growth[J]. *Science of the Total Environment*, 645: 1048-1056.
- Ren Xinwei, Tang Jingchun, Yu Chen, He Juan. 2018. Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 37(6): 1045-1058 (in Chinese with English abstract).
- Rillig M C. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(12): 6453-6454.
- Rocha- Santos T, Duarte A C. 2015. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 65: 47-53.
- Shao Yuanyuan, Zhang Fan, Liang Qingxia. 2020. Research on microplastic pollution in terrestrial-marine ecosystems[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 29(10): 2118-2129 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xinzhu, Sun Lina, Li Zhen, Lü Lianghe. 2021. Composition and distribution of microplastics in farmland soil around Shenyang[J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 40(7): 1498-1508 (in Chinese with English abstract).
- Song Dianxing, Ma Li, Wang Quanjiu. 2021. Occurrence characteristics and environmental effects of microplastics in typical farmland soils in Baoji area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 35(2): 170-175 (in Chinese with English abstract).
- Tang Qingfeng, Li Qinmei, Wei Xiaoxiao, Shao Peng, Gao Lijuan, Chen Qirong, Hu Guanghui, Liu Weili, Gao Xia. 2019. Progress on research of analysis techniques for microplastics in environmental samples[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 38(8): 1009-1019 (in Chinese with English abstract).
- Tang Shan, Liu Zifei, Wang Linyang, Du Weiyan, Liu Jipei, Wang Hong. 2021. Review on risk analysis and related standards of organic fertilizer application[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in*

- China(6): 353–367 (in Chinese with English abstract).
- Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, Davis A, Rowland S J, John A W, McGonigle D, Russell A E. 2004. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 304(5672): 838.
- Wan Hongyou, Wang Junkai, Zhang Wei. 2021. Key influencing factors for interactions between microplastics and heavy metals, persistent organic pollutants, and antibiotics in soil[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*: 1–13 (in Chinese with English abstract). DOI:10.13254/j.jare.2021.0123.
- Wang Cuifang, Li Huanmin, Sui Xianwei, Xie Xuming. 2021. Recycling and value-added utilization of waste plastics[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 37(1): 335–342 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huanhuan, Zhu Xianding. 2020. Regulation of microplastics[J]. *Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition)*, 20(1): 12–24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueli, LI Guangyu, Wen Shaofei, Pei Lu, Zheng Zhongjie, Chen Xinyue. 2020. Occurrence and composition of microplastics in soils of typical areas in Jiamusi City[J]. *China Science and Technology Information*, (16): 77–79 (in Chinese).
- Wang Zezheng, Yang Liang, Li Jie, Fu Dongdong, Hu Weiwei, Fan Zhengquan, Peng Licheng. 2021. Single and combined effects of microplastics and cadmium on the germination characteristics of rice seeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 40(1): 44–53 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhichao, Meng Qing, Yu Linghong, Yang Wenhuan, Li Weiping, Yang Jianlin, Yang Fan. 2020. Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. *Agricultural Engineering*, 36(3): 204–209 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangbo, Sun Mingxing, Zhang Linxiu, Xue Yinghao, Li Chang, Ma Shaoyue. 2021. Research progress and prospect of soil microplastic pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 38(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yinghao, Huang Hongkun, Jin Tuo, Chen Si, Xu Xiangbo, Li Shaohua, Bao Zhe, Ju Xuehai, Xi Bin. 2021. Research progress on microplastic and pesticide pollutions and their toxic effects on soil organisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 40(2): 242–251 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guangrong, Chen Lirui, Lin Dunmei. 2021. Status, sources, environmental fate and ecological consequences of microplastic pollution in soil[J]. *China Environmental Science*, 41(1): 353–365 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jie, Cang Long, Qiu Wei, Yang Jiangli, Zhou Dongmei. 2019. Effects of different soil environmental factors on tetracycline adsorption of microplastics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(11): 2503–2510 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jie, Li Lianzhen, Zhou Qian, Li Ruijie, Tu Chen, Luo Yongming. 2021. Microplastics contamination of soil environment: sources, processes and risks[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 58(2): 281–298 (in Chinese with English abstract).
- Yu Goubin, Chen Mingzhou, Tao Ping. 2017. Study on the removal of organic matter for separation and analysis of microplastics in sugarcane soil[J]. *Sugarcane and Canesugar*, (2): 66–70 (in Chinese with English abstract).
- Yue Junjie, Zhao Shuang, Cheng Haodong, Duan Xinyue, Shi Honghua, Wang Lei, Duan Zhenghua. 2021. Distribution of microplastics in the soil covered by different vegetation in Yellow River Delta Wetland[J]. *Environmental Science*, 42(1): 204–210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiajia, Chen Yanhua, Wang Xuexia, Ni Xiaohui, Liu Dongsheng, Li Lixia, Zou Guoyuan. 2021. A review of microplastics in the soil environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 29(6): 937–952 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Dan. 2021. Review on the occurrence, analysis methods, toxicity and health effects of micro- and nano- plastics in the environment[J]. *Environmental Chemistry*, 40(1): 28–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kai, Sun Hongwen. 2018. Adsorption of organic pollutants on (degradable) microplastics and the influences on their bioavailability[J]. *Environmental Chemistry*, 37(3): 375–382 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Simeng, Zha Jin, Meng Wei, Qi Guangxia, Ren Lianhai, Feng Chunhua, Gao Peng, Lü Zheng. 2019. A review of microplastics in environment and their effects on human health[J]. *China Plastics*, 33(4): 81–88 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weiping. 2020. Study on the Isolation of Microplastics in Farmland Soil and Adsorption Behavior of Contaminant onto Microplastics[D]. Zhengzhou: Henan University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuling, Yan Ziwei, Wang Feng, Wang Xi, Xu Han, Hu Ronggui, Yan Chang, Lin Shan. 2021. Effects of microplastics addition on soil organic carbon mineralization in citrus orchard[J]. *Environmental Science*, 42(9): 4558–4565 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yukai. 2021. Distribution of Microplastics in Shanghai Farmland Soil and its Adsorption Characteristics of Heavy Metals[D]. Shanghai: Shanghai Polytechnic University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yukai, Fan Li, Xie Fan, Zhou Mingyuan, Guan Jie, Gao Guilan. 2021. Soil micro-plastics pollution and analysis method[J]. *Sichuan Environment*, 40(2): 246–253 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuxi, Miao Aijun. 2020. The impact of microplastics on human

- health: A review[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 56(5): 729–736 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Sun Lu, Yin Xiulan, Meng Hui. 2017. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review[J]. Geology in China, 44(5): 901–912 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaoli, Liu Zihan, Cong Chenyu, Han Jianqiao. 2021. Application of various methods to extract microplastic from typical soils in China[J]. Environmental Science, 42(10): 4872–4879 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qian, Tu Chen, Zhang Chenjie, Zhang Haibo, Fu Chuancheng, Li Yuan, Li Lianzhen, Xiong Kuanxu, Xu Li, Luo Yongming. 2021. Surface properties and changes in morphology of microplastics exposed in-situ to Chinese coastal wetlands[J]. Chinese Science Bulletin, 66(13): 1580–1591 (in Chinese).
- Zhou Qian, Zhang Haibo, Zhou Yang, Li Yuan, Xue Yong, Fu Chuancheng, Tu Chen, Luo Yongming. 2016. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features[J]. Chinese Science Bulletin, 61(14): 1604–1611 (in Chinese).
- Zhou Yumiao, He Ganghui, Ma Shaofeng, Shao Fanglei, Fei Yufan, Huang Shunying, Zhang Haibo. 2021. Ecological effects of microplastics contamination in soils[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 38(5): 1040–1049 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Ying, Cao Miao, Luo Jingyang, Zhang Qin, Cao Jiashun. 2019. Distribution and potential risks of microplastics in China: A review[J]. Research of Environmental Sciences, 32(9): 1437–1447 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Zhu Dong, Xu Tong, Ma Jun. 2019. Impacts of (micro) plastics on soil ecosystem: progress and perspective[J]. Journal of Agro-Environment Science, 38(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yuen, Wen Hanxuan, Li Tanghuixian, Li Hua, Wu Chao, Zhang Guixiang, Yan Jing. 2021. Distribution and sources of microplastics in farmland soil along the Fenhe River[J]. Environmental Science, 42(8): 3894–3903 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 安菁, 刘欢语, 郑艳, 程俊, 宋春. 2021. 土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响[J]. 四川农业大学学报, 39(1): 41–46.
- 白娜玲, 张海韵, 张翰林, 郑宪清, 李双喜, 张娟琴, 何宇, 吕卫光. 2020. 不同地膜覆盖对土壤环境及芋艿生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 39(11): 2569–2577.
- 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志. 2021. 电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系[J]. 环境科学, 42(3): 1073–1080.
- 陈熹, 马琼, 陶宗娅, 吕浩宇, 李胜岚, 吴国. 2020. 微塑料对小麦农艺性状及氮素利用效率的影响[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 43(5): 664–670.
- 陈娟, 顾轩宇, 包丽婧, 马璇, 潘亚男, 马闪闪, 穆瑛慧. 2020. 浮选-消解法提取土壤中的微塑料[J]. 江苏理工学院学报, 26(4): 1–7.
- 陈璇, 章家恩, 危晖. 2021. 环境微塑料的迁移转化及生态毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报, 16(6): 70–86.
- 陈雅兰, 孙可, 韩兰芳, 高博. 2021. 土壤中微塑料的分离及检测方法研究进展[J/OL]. 土壤学报: 1–17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210329.1403.002.html>.
- 程荣, 石磊, 郑祥. 2018. 2017年水环境科学热点回眸[J]. 科技导报, 36(1): 176–188.
- 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 李尚中, 张建军, 赵刚, 王磊, 党翼. 2020. 我国西北覆膜农田土壤微塑料数量及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 39(11): 2561–2568.
- 邓加聪, 陈晓凤, 张志鹏, 郑虹, 李世迁, 陈庆华. 2019. 福建漳浦近岸海域表层土壤中微塑料的赋存特征[J]. 福建师大福清分校学报, (2): 75–83.
- 邓延慧, 万冰洲, Tanveer M. Adyel, 李旦. 2020. 自然环境中微塑料样品的采集与分离方法[J]. 环境监测管理和技术, 32(4): 1–4.
- 董明潭, 罗泽娇, 邢新丽, 张俏俏, 孙越. 2020. 基于油提取的土壤与沉积物中微塑料的分离方法[J]. 环境科学研究, 33(6): 1522–1529.
- 董姝楠, 夏继红, 王为木, 刘慧, 盛雨婷. 2020. 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, 36(14): 1–8.
- 杜涛, 罗思, 王鑫, 向文平. 2020. 关于建立土壤中微塑料标准化分析检测方法的思考[J]. 再生资源与循环经济, 13(8): 34–37.
- 范玉梅, 石佳颖, 高李璟. 2019. 土壤中微塑料的来源及检测[J]. 化工时刊, 33(6): 28–31.
- 费禹凡, 黄顺寅, 王佳青, 骆永明, 章海波. 2021. 设施农业土壤微塑料污染及其对细菌群落多样性的影响[J]. 科学通报, 66(13): 1592–1601.
- 冯雪莹, 孙玉焕, 张书武, 王发园. 2021. 微塑料对土壤-植物系统的生态效应[J]. 土壤学报, 58(2): 299–313.
- 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 陆安祥, 李冰茹, 巩文雯, 田佳宇. 2020. 大辽河流域土壤中微塑料的丰度与分布研究[J]. 生态毒理学报, 15(1): 174–185.
- 郝爱红, 赵保卫, 张建, 马锋锋, 段凯祥, 刘辉, 张鑫, 冉富霖. 2021. 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, 40(4): 1100–1111.
- 侯军华, 檀文炳, 余红, 党秋玲, 李任飞, 席北斗. 2020. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 38(2): 16–27.
- 胡灿, 王旭峰, 陈学庚, 汤修映, 赵岩, 严昌荣. 2019. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 35(24): 223–234.
- 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达. 2022. 地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响[J]. 环境科学, 43(3): 1649–1656.

- 扈瀚文, 杨萍萍, 薛含含, 曾智鑫, 田峪萍, 范克燕, 陈峻峰, 王仁君. 2020. 环境微塑料污染的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 49(1): 97-102.
- 简敏菲, 饶丹, 孙望舒, 李文华, 周隆胤, 熊建秋. 2020. 南方小城镇生活垃圾热解焚烧灰渣中微塑料与重金属的赋存特征[J]. 环境化学, 39(4): 1012-1023.
- 金灿, 王毅, 代知广, 黄俊伟. 2021. 土壤中微塑料污染及其防治措施的探讨[J]. 环境科技, 34(2): 73-78.
- 靳拓, 薛颖昊, 张明明, 周涛, 刘宏金, 张凯, 习斌. 2020. 国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J]. 生态环境学报, 29(2): 411-420.
- 雷晓婷, 雷金银, 周丽娜, 何进勤, 祁焕军, 徐瑾瑜. 2020. 微塑料对农田土壤质量的影响研究现状与分析[J]. 宁夏农林科技, 61(2): 26-28.
- 李敏, 杨磊, 赵方凯, 陈利顶. 2022. 城乡景观中土壤生态系统微塑料的来源、迁移特征及其风险[J]. 生态学报, 42(5): 1693-1702.
- 李鹏飞, 侯德义, 王刘炜, 吴唯民, 潘仕镇. 2021. 农田中的(微)塑料污染: 来源、迁移、环境生态效应及防治措施[J]. 土壤学报, 58(2): 314-330.
- 李瑞杰, 李连祯, 张云超, 杨杰, 涂晨, 周倩, 李远, 骆永明. 2020. 禾本科作物小麦能吸收和积累聚苯乙烯塑料微球[J]. 科学通报, 65(20): 2120-2127.
- 李小红, 纪艳艳, 梅庆庆, 陈璐蓓, 张晓磊, 董滨, 戴晓虎. 2019. 污水处理厂污水和污泥中微塑料的研究展望[J]. 净水技术, 38(7): 13-22.
- 李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 赵亚非, 耿佳慧, 孙涌栋, 周俊国, 王广印. 2020. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 39(5): 973-981.
- 廖苑辰, 孜孜古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟. 2019. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. 环境科学, 40(10): 4661-4667.
- 刘沙沙, 付建平, 郭楚玲, 党志. 2019. 微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展[J]. 农业环境科学学报, 38(5): 957-969.
- 刘婷婷, 侯丽君, 刘佳茜, 王沛媛, 林雁冰, 党亚爱. 2020. 基于文献计量的塑料地膜研究发展态势分析[J]. 中国农业大学学报, 25(9): 90-103.
- 刘亚菲. 2018. 滇池湖滨农田土壤中微塑料数量及分布研究[D]. 昆明: 云南大学.
- 柳检, 劳昌玲, 袁静, 孙梦荷, 罗立强, 沈亚婷. 2021. X射线光谱技术在生物与生态环境中的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 41(3): 675-685.
- 卢萍, 闫振华, 陆光华. 2021. 微塑料对环境介质中氮循环的影响研究进展[J]. 环境科学研究, 34(11): 2563-2570.
- 罗小凤, 朱玲珑, 徐国良, 余世钦, 欧诗婷, 陈小华. 2021. 次生微塑料食物暴露对土壤白符跳 *Folsomia Candida* 毒性的初步研究[J]. 环境工程, 39(1): 187-193.
- 骆永明, 施华宏, 涂晨, 周倩, 季荣, 潘响亮, 徐向荣, 吴辰熙, 安立会, 孙晓霞, 何德富, 李艳芳, 马旖旎, 李连祯. 2021. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. 科学通报, 66(13): 1547-1562.
- 骆永明, 周倩, 章海波, 潘响亮, 涂晨, 李连祯, 杨杰. 2018. 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, 33(10): 1021-1030.
- 马兆嵘, 刘有胜, 张芊芊, 应光国. 2020. 农用塑料薄膜使用现状与环境污染分析[J]. 生态毒理学报, 15(4): 21-32.
- 牟诗怡, 杨美慧, 陈钦清, 黄昊翀, 马媛媛, 郝思博, 张自力, 郑志远. 2021. 太赫兹光谱技术对土壤污染物检测分析的研究[J]. 实验技术与管理, 38(4): 89-93.
- 蒲生彦, 张颖, 吕雪. 2020. 微塑料在土壤-地下水中的环境行为及其生态毒性研究进展[J]. 生态毒理学报, 15(1): 44-55.
- 任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟. 2018. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 37(6): 1045-1058.
- 邵媛媛, 张帆, 梁庆霞. 2020. 陆地-海洋生态系统微塑料污染现状研究[J]. 生态环境学报, 29(10): 2118-2129.
- 时馨竹, 孙丽娜, 李珍, 吕良禾. 2021. 沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布[J]. 农业环境科学学报, 40(7): 1498-1508.
- 宋佃星, 马莉, 王全九. 2021. 宝鸡地区典型农田土壤中微塑料赋存特征及其环境效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 35(2): 170-175.
- 汤庆峰, 李琴梅, 魏晓晓, 邵鹏, 高丽娟, 陈啟荣, 胡光辉, 刘伟丽, 高峡. 2019. 环境样品中微塑料分析技术研究进展[J]. 分析测试学报, 38(8): 1009-1019.
- 唐杉, 刘自飞, 王林洋, 杜为研, 刘继培, 汪洪. 2021. 有机肥料施用风险分析及相关标准综述[J]. 中国土壤与肥料, (6): 353-367.
- 万红友, 王俊凯, 张伟. 2021. 土壤微塑料与重金属、持久性有机污染物和抗生素作用影响因素综述[J]. 农业资源与环境学报: 1-13. DOI:10.13254/j.jare.2021.0123.
- 王翠芳, 黎焕敏, 随献伟, 谢续明. 2021. 废弃塑料的回收及高值化再利用[J]. 高分子材料科学与工程, 37(1): 335-342.
- 王欢欢, 朱先定. 2020. 微塑料污染防治法律问题研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 20(01): 12-24.
- 王雪力, 李广宇, 文少飞, 裴璐, 郑中洁, 陈新月. 2020. 佳木斯市区典型区域土壤中微塑料的赋存及组成[J]. 中国科技信息, (16): 77-79.
- 王泽正, 杨亮, 李婕, 付东东, 胡维薇, 范正权, 彭丽成. 2021. 微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响[J]. 农业环境科学学报, 40(01): 44-53.
- 王志超, 孟青, 于玲红, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 杨帆. 2020. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. 农业工程学报, 36(3): 204-209.
- 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 薛颖昊, 李畅, 马劭越. 2021. 土壤微塑料污染研究进展与展望[J]. 农业资源与环境学报, 38(1): 1-9.
- 薛颖昊, 黄宏坤, 靳拓, 陈思, 徐湘博, 李少华, 宝哲, 居学海, 习斌. 2021. 土壤微塑料和农药污染及其对土壤动物毒性效应的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 40(2): 242-251.
- 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 2021. 土壤微塑料污染现状、来源、环境

- 运及生态效应[J]. 中国环境科学, 41(1): 353-365.
- 杨杰, 仓龙, 邱炜, 杨江俐, 周东美. 2019. 不同土壤环境因素对微塑料吸附四环素的影响[J]. 农业环境科学学报, 38(11): 2503-2510.
- 杨杰, 李连祯, 周倩, 李瑞杰, 涂晨, 骆永明. 2021. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 58(2): 281-298.
- 余构彬, 陈明周, 陶平. 2017. 基于微塑料分离分析的甘蔗地土壤有机质去除方法研究[J]. 甘蔗糖业, (2): 66-70.
- 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花. 2021. 不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布[J]. 环境科学, 42(1): 204-210.
- 张佳佳, 陈延华, 王学霞, 倪小会, 刘东生, 李丽霞, 邹国元. 2021. 土壤环境中微塑料的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 29(6): 937-952.
- 张瑾, 李丹. 2021. 环境中微/纳米塑料的污染现状、分析方法、毒性评价及健康效应研究进展[J]. 环境化学, 40(1): 28-40.
- 张凯, 孙红文. 2018. (可降解)微塑料颗粒吸附有机污染物及其对生物有效性的影响[J]. 环境化学, 37(3): 375-382.
- 张思梦, 查金, 孟伟, 祁光霞, 任连海, 冯春华, 高鹏, 吕峥. 2019. 环境中的微塑料及其对人体健康的影响[J]. 中国塑料, 33(4): 81-88.
- 张伟平. 2020. 农田土壤微塑料的分离及其对污染物的吸附特征研究[D]. 郑州: 河南大学.
- 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉. 2021. 微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 42(9): 4558-4565.
- 张宇恺. 2021. 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.
- 张宇恺, 樊丽, 谢帆, 周明远, 关杰, 高桂兰. 2021. 土壤微塑料污染及其分析方法[J]. 四川环境, 40(2): 246-253.
- 张羽西, 缪爱军. 2020. 微塑料对人体健康的影响概述[J]. 南京大学学报(自然科学), 56(5): 729-736.
- 张永双, 孙璐, 殷秀兰, 孟晖. 2017. 中国环境地质研究主要进展与展望[J]. 中国地质, 44(5): 901-912.
- 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥. 2021. 多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用[J]. 环境科学, 42(10): 4872-4879.
- 中华人民共和国国家统计局. 2021. 农业-农用塑料薄膜使用量[DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- 周倩, 涂晨, 张晨捷, 章海波, 付传城, 李远, 李连祯, 熊宽旭, 徐笠, 骆永明. 2021. 滨海湿地环境中微塑料表面性质及形貌变化[J]. 科学通报, 66(13): 1580-1591.
- 周倩, 章海波, 周阳, 李远, 薛勇, 付传城, 涂晨, 骆永明. 2016. 滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. 科学通报, 61(14): 1604-1611.
- 周雨苗, 何刚辉, 马绍峰, 邵方雷, 费禹凡, 黄顺寅, 章海波. 2021. 土壤微塑料污染的生态效应[J]. 浙江农林大学学报, 38(5): 1040-1049.
- 朱莹, 曹森, 罗景阳, 章钦, 操家顺. 2019. 微塑料的环境影响行为及其在我国的分布状况[J]. 环境科学研究, 32(9): 1437-1447.
- 朱永官, 朱冬, 许通, 马军. 2019. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考[J]. 农业环境科学学报, 38(1): 1-6.
- 朱宇恩, 文瀚莹, 李唐慧娴, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬. 2021. 汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析[J]. 环境科学, 42(8): 3894-3903.