

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM_{2.5}浓度调控模拟 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM_{2.5}碳质组分特征 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM₁中金属元素污染特征及健康风险评估 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及来源分析 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH₄、CO₂和N₂O浓度的时空变化特征及影响因素 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响

郝永丽¹, 胡亚鲜^{1*}, 白晓雄², 郭胜利¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100)

摘要: 微塑料作为一种新型污染物, 受到了国内外研究的广泛关注. 黄土高原作为我国主要农业产区之一, 不同土地利用方式对土壤中微塑料丰度和形态分布的影响尚不清楚. 采集了黄土高原沟壑区王东沟流域内耕地、苹果园和垃圾场这3种不同土地利用方式下的土壤, 采用改良的密度离心法对微塑料进行分离提取, 并使用激光红外成像系统对土壤中微塑料的丰度、组成以及形态特征进行分析鉴定. 结果表明, 王东沟流域土壤微塑料的平均丰度为 $4\,715\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 主要由聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氨酯(PU)和醇酸树脂(ALK)等类型组成, 分别占30.39%、29.58%和8.42%; 超过80%的微塑料为碎片状, 且超过60%的微塑料粒径 $\leq 50\ \mu\text{m}$. 不同土地利用方式下的微塑料平均丰度差异明显, 呈现耕地土壤($7\,550\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 苹果园土壤($3\,440\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 垃圾场土壤($2\,283\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$)的趋势. 苹果园土壤微塑料的平均面积及宽度、高度、偏心度和圆度等形态特征与耕地和垃圾场土壤的微塑料均存在显著差异.

关键词: 黄土高原; 微塑料; 不同土地利用方式; 丰度; 组成; 形态特征

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4748-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112199

Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau

HAO Yong-li¹, HU Ya-xian^{1*}, BAI Xiao-xiong², GUO Sheng-li¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: As an emerging pollutant to the environment, microplastics have received widespread attention worldwide. The Loess Plateau, as one of the major agricultural production areas in China, has various land use types, but how the abundance and morphological patterns of microplastics differ among soils under different land use types remains unclear. In this study, we collected soils from three different land use types: croplands, apple orchards, and landfills in the Wangdonggou Catchment. Microplastics were separated and extracted using a modified density centrifugation method, and the abundance, composition, and morphological characteristics of the soil were analyzed and characterized using a laser infrared imaging system. The results showed that the average abundance of microplastics in the Wangdonggou Catchment was $4\,715\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$, mainly composed of PET, PU, and alkyd varnish (ALK), respectively accounting for 30.39%, 29.58%, and 8.42%. More than 80% of the microplastics were fragmented, and more than 60% of the microplastics were of a size $\leq 50\ \mu\text{m}$. The average abundance of microplastics varied significantly among land use types: cropland soil ($7\,550\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$) > apple orchard soil ($3\,440\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$) > landfill soil ($2\,283\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$). The average area, width, height, eccentricity, circularity, and other morphological characteristics of microplastics in apple orchard soil were significantly different from those in the cropland and landfill soil.

Key words: Loess Plateau; microplastics; different land use types; abundance; composition; morphological characteristics

微塑料(粒径在 $1\ \mu\text{m} \sim 5\ \text{mm}$ 范围的塑料^[1])因其分布广泛^[2,3]、尺寸微小^[4]和降解速度缓慢,且对有害物质具有吸附与释放效应^[5-7],可对环境中的植物生长^[8]、动物繁殖^[9]和人类健康^[10]等带来显著影响. 陆地生态系统作为人类的主要聚集地^[11],是环境中微塑料的最大来源^[12],因此了解微塑料在陆地系统的空间分布变得极其重要. 土壤中微塑料来源广泛^[13],主要包括垃圾填埋^[14]、污水灌溉^[15]、道路径流^[16]和大气沉降等途径^[17,18]. 有研究表明,不同微塑料在降解和老化过程中表面吸附特性的改变,可影响重金属、抗生素等物质在土壤中的积累和转化特征^[19,20],具有较强的毒性和环境污染风险. 然而,各区域土壤微塑料的本底值及组分特征仍缺乏系统性基础数据,极大制约了田间土壤微塑料环境风险定量化评价.

黄土高原(面积为 $6\,300\text{万}\ \text{hm}^2$)是中国人口聚集地之一,同时也是农业活动中心^[21],除了受城市和村庄的日常生活污水、垃圾排放和交通等塑料污染以外,黄土高原约有 $640\text{万}\ \text{hm}^2$ 的耕地和 $130\text{万}\ \text{hm}^2$ 的苹果园(占全国苹果产量的57%)^[22,23],每年约消耗 $130\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右的塑料^[24]. 然而目前只有少数案例研究了黄土高原地区耕地表土或土壤剖面中的微塑料丰度,而对不同土地利用方式下,微塑料的丰度和形态特征分布知之甚少. 不同土地利用类型中微塑料的主要来源差异较大,如耕地土壤中微

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目(XAB2020YN03); 陕西省引进高层次人才专项(F2020221001)

作者简介: 郝永丽(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为黄土高原土壤中微塑料的分布及迁移特征, E-mail: yonglihao@nwafu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: huyaxian@nwafu.edu.cn

塑料的来源主要是地膜等农用塑料垃圾, 苹果园土壤中微塑料的来源主要是反光膜和苹果套袋等塑料垃圾, 而垃圾场土壤主要是居民生活所产生的生活塑料垃圾, 可直接影响土壤中微塑料的丰度、组成和形态特征, 进而影响微塑料在不同土壤环境中的积累和老化程度. 因而, 本研究通过采集黄土高原王东沟流域耕地、苹果园和垃圾场的土壤样品, 利用激光红外成像系统对土壤中微塑料的丰度、组成和形态特征进行检测鉴定, 对比耕地、苹果园和垃圾场这 3 种不同土地利用方式下土壤中微塑料的差异, 探讨不同土地利用类型对微塑料分布的影响, 期为研究不同土地利用类型下微塑料的降解、迁移和防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王东沟流域位于中国陕西省长武县黄土高原的西南角(北纬 $35^{\circ}13' \sim 35^{\circ}16'$, 东经 $107^{\circ}40' \sim 107^{\circ}42'$, 海拔 $1\,220\text{ m}$), 流域面积为 8.3 km^2 , 是典型的高原沟壑区. 主要地貌类型包括: 塬(坡度 $< 0.5^{\circ}$)、坡(多数坡度 $> 40^{\circ}$)和沟, 各占流域面积的 30% 左右(27.7%、36.4% 和 35.9%). 塬面海拔约 $1\,220\text{ m}$, 沟底最低海拔约 940 m , 海拔高度相差 280 m . 王东沟流域在人口密集的村庄、农田、果园、交通道路和梯田等各种组合的影响下, 成为一个小型的以家庭为单位的现代化农业人类聚集区域.

1.2 样品采集

本研究于 2018 年 8 月在王东沟流域 13 个不同土地利用方式的土壤样本进行采集, 采样点分布如图 1 所示. 其中, 苹果园和耕地面积占比较大, 故各类型土地均采集 5 个土壤样品, 而村边沟头垃圾场面积占比较小, 主要于居民生活区附近的垃圾堆砌点采集土壤, 共采集 3 个土壤样品. 在每个采样点, 用钻头随机采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 表层土壤 6 个土样(沉积物采集表层土壤的 5 cm). 然后将 6 个土壤(沉积物)样品充分混合, 然后放置于铝盒中, 风干之后进行实验.

1.3 样品处理

将所有风干后的土壤样品过 1 mm 筛, 并分别称取 100 g 的土壤于小铝盒中, 然后采用改进后的密度离心法对微塑料进行提取^[25,26]. 首先, 将一个 400 mL 的小烧杯置于 2 L 大烧杯内, 并倒入 250 mL 的氯化钠溶液($1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 而后倒入 100 g 土壤样品, 并立即通过吸水泵(NS160, 广东闽江水族实业有限公司)将剩余的 500 mL 氯化钠溶液以 $3.33\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速吸入 400 mL 的烧杯中. 经玻璃棒充分搅拌之后, 将烧杯内的上层悬浮液和溢出到外层

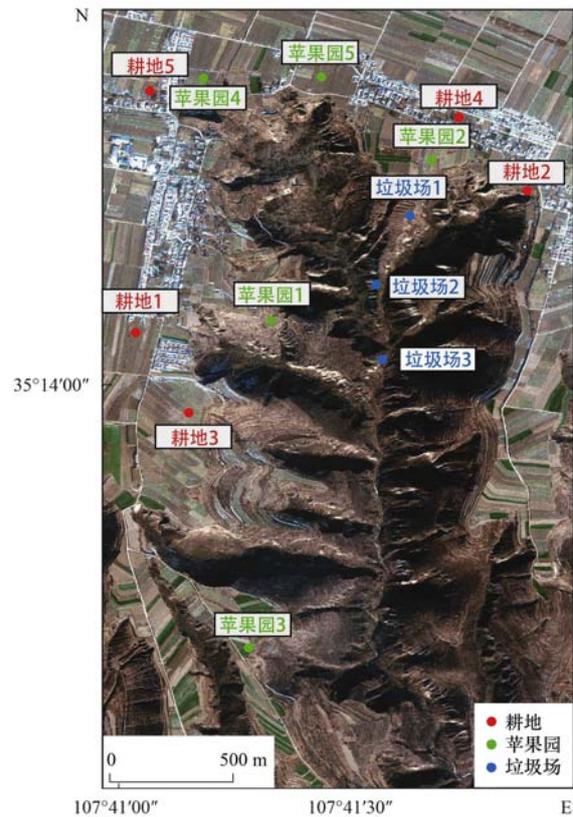


图 1 王东沟流域采样点分布示意

Fig. 1 Soil sampling sites in the Wangdonggou catchment

大烧杯中的混合物合并(NaCl 溶液和悬浮颗粒), 用双层滤纸过滤, 冲洗, 并干燥. 之后用 NaI 溶液($1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)反复冲洗烧杯中的干燥样品至离心管, 直到烧杯干净, 而后以 $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速离心 10 min , 重复 3 次. 将离心后的上层悬浮液分别过滤, 自然干燥滤膜, 再用非塑料刷将滤膜上的样品刷入 250 mL 烧杯中. 按 1:2 的比例加入 FeSO_4 催化剂和 H_2O_2 溶液, 反应 2 h 以去除有机物. 完成后向烧杯中加满蒸馏水, 静置 3 h 以确保密度分离充分完成. 然后再次过滤上层悬浮液, 并对滤膜进行干燥, 并再次使用非塑料刷将滤膜上的微塑料刷入烧杯, 之后用无水乙醇清洗烧杯. 将清洗烧杯的溶液收集并倒入 15 mL 的玻璃瓶中, 通过氮气反复吹扫蒸发, 获取微塑料浓缩样品.

在实验过程中, 所有玻璃容器均用蒸馏水彻底冲洗以避免污染. 同时, 设置 3 个空白对照组(不添加土壤样品)进行实验. 实验之后 3 个空白对照中的微塑料平均丰度低于采样土壤中微塑料平均丰度的 1.6%. 此外, 为测定实验操作过程中微塑料的回收率, 本研究采用随机数量的两种不同粒径的聚苯乙烯荧光微球($50 \sim 70\text{ }\mu\text{m}$ 和 $500 \sim 840\text{ }\mu\text{m}$)进行对照, 使用配有外置荧光的立体显微镜(SMZ25, Nikon, Japan)对其提取实验前后的丰度进行统计, 其回收率为 60%.

1.4 样品分析

通过激光红外成像系统 (Agilent 8700 LDIR) 和 Clarity 软件分析各样品中微塑料的丰度、组成以及形态特征. 本研究测定的微塑料形态特征属性主要包括: 直径、宽度、高度、面积、偏心度、实心度和圆度. 其中, 直径属性表示微塑料颗粒的大小, 偏心度表征微塑料颗粒的形状 (如, 圆球状微塑料的偏心度为 0, 当偏心度越接近 1 时则代表宽高比越大), 实心度表征每个微塑料颗粒面积与其边界面积之比, 圆度表征每个微塑料颗粒与圆形的相似程度. 微塑料的形状按照实心度和圆度属性可进一步划分为: 纤维 (实心度 < 0.2)、微球 (圆度 > 0.8) 和碎片 (实心度 > 0.2 或圆度 < 0.8)^[27]. 本研究只选择了与 Agilent 8700 LDIR 数据库匹配度大于 65% 的微塑料进行分析. 鉴于在土壤样本中观察到的微塑料种类繁多 (超过 30 种), 本研究只介绍丰度最高的前 8 种主要类型, 而其余的塑料类型则统称为“其他”.

1.5 数据处理

所有样品中微塑料的丰度用 $n \cdot \text{kg}^{-1}$ 表示. 使用 ArcGis 10.7 软件绘制采样点分布; 使用 Excel 对微塑料的丰度、形态特征数据进行分析处理; 采用 Origin 2022 绘制了微塑料平均丰度, 并对不同地形条件下的微塑料丰度和形态特征进行单因素方差分析, 当 $P \leq 0.05$ 时表示具有显著差异性; 此外还用

用 R 软件的 ggplot2 包绘制了不同类型微塑料平均面积的气泡和占比, 以及不同类型微塑料的宽度和高度分布.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤微塑料的丰度和平均面积

在王东沟流域内采集的所有土壤样品中均发现了微塑料, 且微塑料的平均丰度为 $4\ 715\ n \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 2(a)]. 不同的土地利用方式下, 微塑料的平均丰度有明显的差异: 耕地土壤中微塑料平均丰度为 $7\ 550\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 丰度范围为 $1\ 990 \sim 12\ 650\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 苹果园土壤中微塑料平均丰度为 $3\ 340\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 丰度范围为 $1\ 750 \sim 6\ 550\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 垃圾场土壤微塑料平均丰度为 $2\ 283\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 丰度范围为 $1\ 150 \sim 3\ 300\ n \cdot \text{kg}^{-1}$, 而耕地土壤微塑料丰度显著高于垃圾场土壤微塑料丰度 ($P \leq 0.05$).

不同土地利用方式下, 微塑料的平均面积也存在差异, 且苹果园土壤中微塑料平均面积显著高于耕地土壤和垃圾场土壤 ($P \leq 0.05$) [图 2(b)]. 其中, 耕地土壤微塑料的平均面积为 $4\ 203.4\ \mu\text{m}^2$, 范围为 $1\ 459.1 \sim 7\ 496.38\ \mu\text{m}^2$, 苹果园土壤微塑料的平均面积为 $8\ 045.3\ \mu\text{m}^2$, 范围为 $4\ 377.2 \sim 10\ 502.3\ \mu\text{m}^2$, 垃圾场土壤微塑料的平均面积为 $3\ 635.8\ \mu\text{m}^2$, 范围为 $2\ 492.4 \sim 4\ 400\ \mu\text{m}^2$.

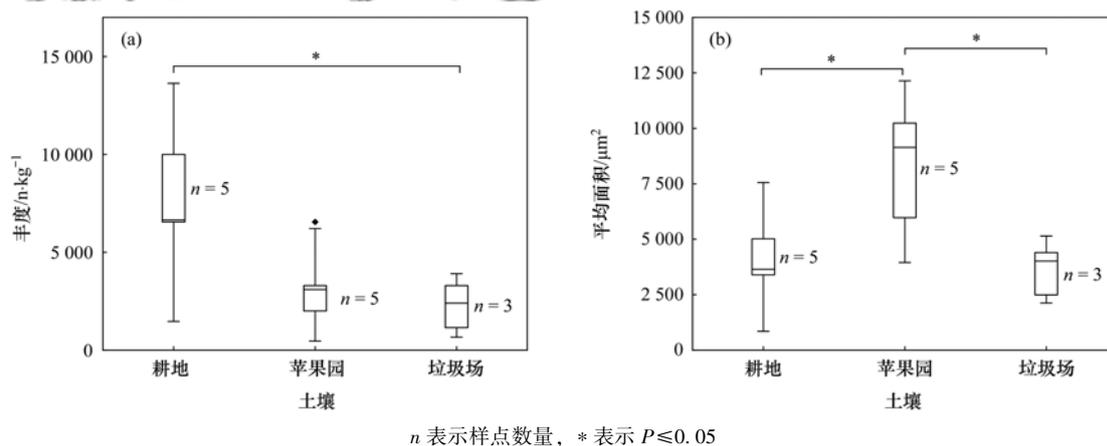


图 2 不同土地利用方式下微塑料的丰度和平均面积分布

Fig. 2 Abundance and average area distribution of microplastics under different land use types

2.2 微塑料的组成成分

在本研究中, 所有土壤样品共检测到 30 种类型的微塑料, 丰度最高的前 8 种类型分别为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚氨酯 (PU)、醇酸树脂 (alkyd varnish, ALK)、丙烯酸酯共聚物 (acrylates, ACR)、聚己内酯 (polycaprolactone, PCL)、聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP) 和聚氯乙烯 (PVC), 占比分别为 30.39%、29.58%、8.42%、4.49%、2.7%、2.7%、4.82% 和

2.04% [图 3(a)]. 总的来说, 王东沟流域内主要以 PET、PU 和 ALK 这 3 种类型的微塑料为主. 不同土地利用类型下, 微塑料组成差异较大: 耕地土壤中主要以 PET、PU、ALK、PE、ACR 和 PP 类型的微塑料为主, 占比均 $> 5\%$; 果园土壤中主要以 PET、PU、ALK、PVC 和 PP 类型的微塑料为主; 垃圾场土壤主要以 PET、PU 和 ALK 类型的微塑料为主.

果园土壤中微塑料各类型的平均面积高于耕地

土壤和垃圾场土壤, 具体来说, 果园土壤中 PET、PU、ALK、PE、PP 和 PVC 类型的微塑料平均面积较大, 分别为 15 705.6、4 045.8、5 236.6、5 562.5、6 806.7 和 5 956.6 μm^2 . 相比之下, 耕地土壤和垃圾

场土壤中平均面积较大的微塑料类型均为 PET 和 PP, 其中耕地土壤微塑料平均面积分别为 4 099.7 μm^2 和 5 404.9 μm^2 , 垃圾场土壤微塑料平均面积分别为 4 069.5 μm^2 和 11 829.1 μm^2 [图 3(b)].

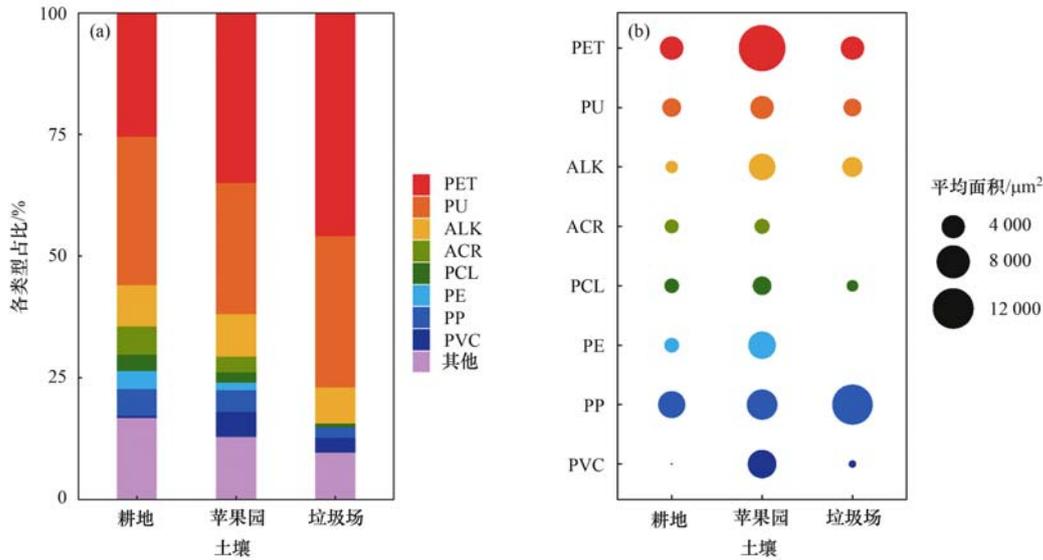


图 3 不同类型微塑料的组成和平均面积分布

Fig. 3 Composition and average area distribution of different types of microplastics under different land use types

2.3 流域内土壤微塑料的形态学特性

本研究区不同样点微塑料粒径范围在 20 ~ 500 μm 之间, 按照直径大小分级后可知 (≥ 200 、100 ~ 200、50 ~ 100 和 ≤ 50 μm), 不同土地利用类型的微塑料尺寸存在差异 [图 4(a)]: 苹果园土壤中微塑料的直径显著大于耕地土壤和垃圾场土壤中微塑料的直径 ($P \leq 0.001$) [图 4(b)]. 苹果园土壤中微塑料的平均直径为 69.18 μm , 其中 ≥ 200 μm 和 ≤ 50 μm 的粒径占 7.49% 和 64.07%; 耕地土壤和垃圾场土壤中微塑料的平均直径分别是 45.59 μm 和 49.86 μm , 且耕地土壤和垃圾场土壤中直径为 ≥ 200 μm 占比 1.85% 和 2.22%, 直径为 ≤ 50 μm 占比 77.75% 和 71.11%. 不同土地利用类型下微塑料形状差异不明显, 且可以发现在 3 种不同土地利用方式下土壤中微塑料的形状均以碎片状的微塑料为主 (图 5). 但是, 微塑料的宽度、高度、偏心度和圆度属性在不同土地利用方式下表现出显著差异 ($P \leq 0.05$, 图 6). 具体来说, 苹果园土壤同耕地土壤和垃圾场土壤在微塑料的高度、宽度、偏心度、圆度属性上均存在显著性差异 ($P \leq 0.01$), 且苹果园 PET 类型的微塑料的宽度和高度均大于耕地土壤和垃圾场土壤中 PET 类型的微塑料 (图 7).

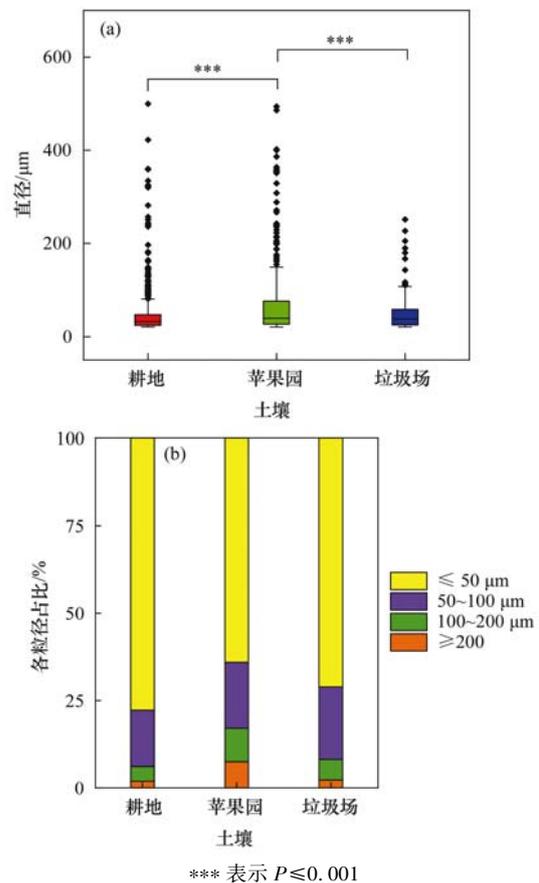


图 4 不同土地利用类型下微塑料的粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of microplastics under different land use types

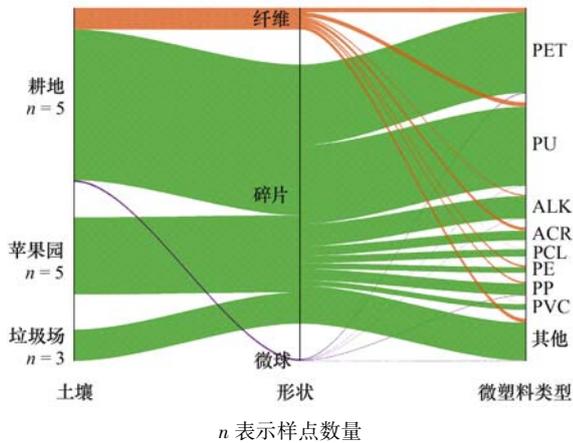
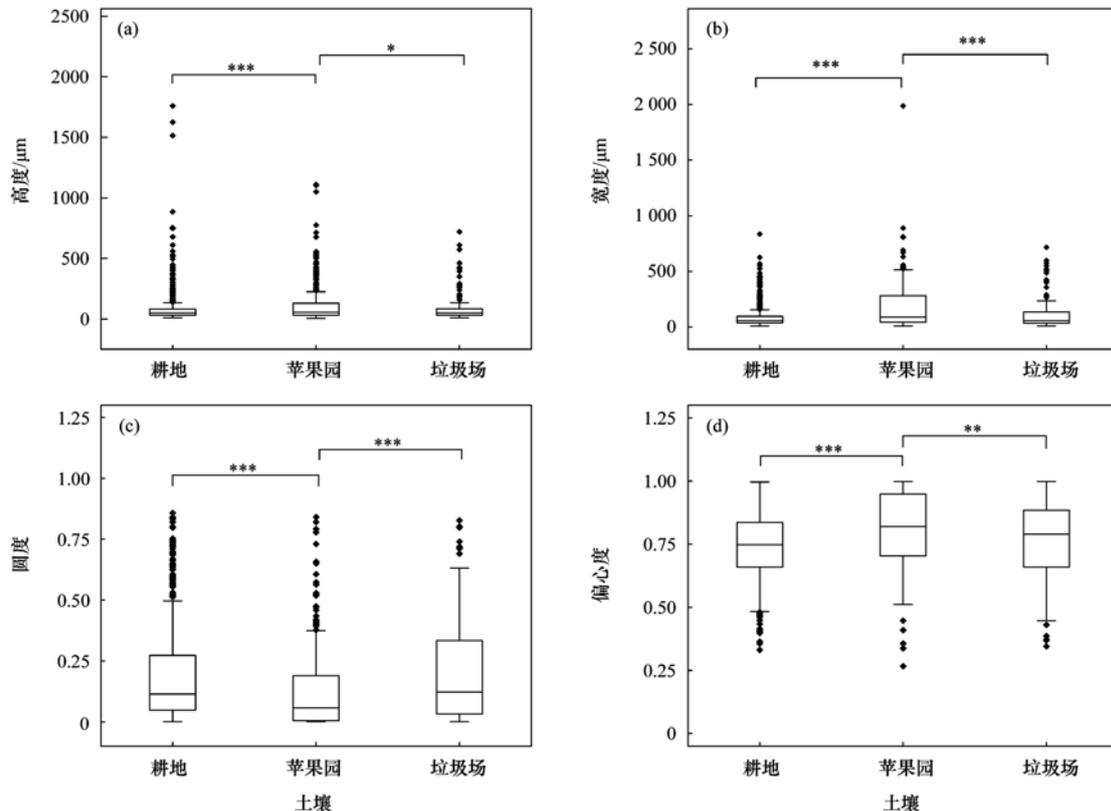


图 5 不同土地利用类型下微塑料的形状分布

Fig. 5 Shape distribution of microplastics under different land use types



* 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$, *** 表示 $P \leq 0.001$

图 6 不同土地利用类型下微塑料的形态特征

Fig. 6 Morphological characteristics of microplastics under different land use types

料,没有对其他的微塑料类型进行检测.与耕作土壤相比,尽管在本研究苹果园土壤中使用了大量的水果袋和反光膜,但微塑料平均丰度的积累却没有耕地土壤多(图 2),这可能是由于农民经常在收获苹果时对反光膜等塑料进行手工回收,从而使苹果园的土壤免受严重的微塑料污染.然而,苹果园土壤中微塑料类型的面积显著大于耕地和垃圾场土壤.这可能是由于:①苹果园中机械耕作相对较少,不利于如耕地土壤不断被破碎产生较小的微塑料碎片^[32];②苹果园

3 讨论

王东沟流域内耕地土壤中微塑料的丰度范围在 $900 \sim 12\,650 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,符合我国关于耕地土壤微塑料研究报道的丰度范围内($1\,430 \sim 42\,960 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,表 1)^[28~30],突显了农业实践中多年覆膜和耕作措施对土壤微塑料遗留累积的影响.然而,不同研究中耕地土壤微塑料丰度变化幅度较大,说明人类活动强度对当地土壤中微塑料平均丰度有深刻的影响.本研究中苹果园土壤微塑料平均丰度为 $3\,440 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于 Zhang 等^[31]所报道的黄土高原苹果园微塑料的平均丰度($320 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$).这可能是由于 Zhang 等^[31]的研究只通过使用蒸馏水来进行密度分离微塑料,仅量化了 PP 和 PE 两种类型的低密度微塑

比耕地和垃圾场有更好的遮荫条件,可减缓苹果园土壤微塑料受紫外线影响而氧化破碎的过程^[33,34].同时,本研究发现苹果园内 PET 类型微塑料较为丰富且平均面积较大(图 3),且其宽度平均值($242.9 \mu\text{m}$)、高度平均值($172.5 \mu\text{m}$)均大于耕地土壤($97.1 \mu\text{m}$ 、 $83.1 \mu\text{m}$)和垃圾场土壤($119.2 \mu\text{m}$ 、 $78.1 \mu\text{m}$),见图 7.这主要是由于水果袋和反光膜的微塑料大多数是 PET 类型,且 PET 类型微塑料性质较为坚硬,不易破碎.就垃圾场土壤而言(表 1)^[14,35],不同区域垃

表 1 国内不同土地利用方式下的土壤微塑料分布及特征¹⁾

Table 1 Distribution and characteristics of soil microplastics under different land use types in China

土壤类型	丰度 /n·kg ⁻¹	粒径范围 /mm	微塑料类型	微塑料成分	地点	文献
耕地	5 090 ± 1 120	—	—	—	中国甘肃和陕北区域	[28]
耕地	1 430 ~ 3 410	0 ~ 5	纤维、碎片、薄膜和微球	PVC、PP、PET、PE 和 HPPE	陕西	[29]
耕地	7 100 ~ 42 960	0.05 ~ 1	纤维(92%)、碎片和薄膜	—	中国西南地区	[30]
耕地	1 900 ~ 12 650	0.02 ~ 0.5	纤维、碎片和微球	PET、PU、ALK、ACR 和 PP	黄土高原	本研究
果园	320	0.05 ~ 0.1 和 >0.1	—	PE 和 PP	黄土高原	[31]
果园	1 750 ~ 6 550	0.02 ~ 0.5	碎片	PET、PU、ALK、PE、PP 和 PVC	黄土高原	本研究
垃圾场	0.42 ~ 24.58	0.01 ~ 0.1	碎片和纤维	PE、PP、PET、PTFE、PS、ALK 和 PDMS	中国上海和江苏	[35]
垃圾场	62 000 ± 23 000	0.07 ~ 3.67	碎片	PE	上海	[14]
垃圾场	1 150 ~ 3 300	0.02 ~ 0.5	碎片	PET、PU 和 ALK	黄土高原	本研究

1) “—”表示文献中未报道; HPPE 表示高密度聚乙烯, PTFE 表示聚四氟乙烯, PS 表示聚苯乙烯, ALK 表示醇酸树脂, PDMS 表示聚二甲硅氧烷, ACR 表示丙烯酸酯共聚物, PET 表示聚对苯二甲酸乙二醇酯, PU 表示聚氨酯, PE 表示聚乙烯, PP 表示聚丙烯, PVC 表示聚氯乙烯

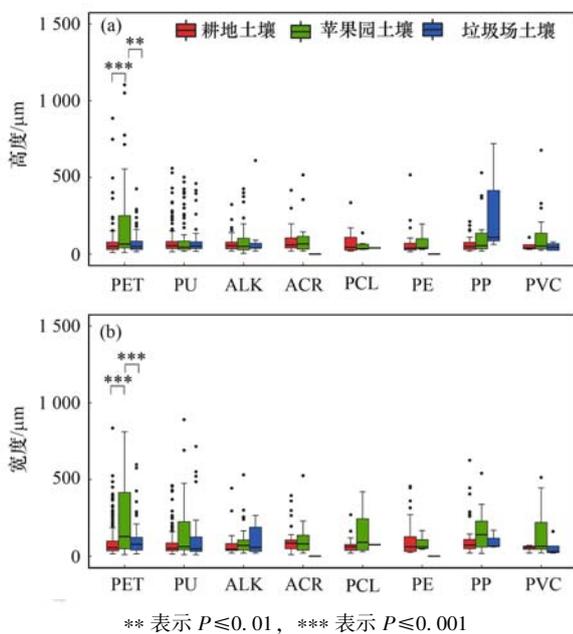


图 7 3 种土地利用类型下 8 种主要微塑料类型的高度和宽度分布

Fig. 7 Height and width distribution of the eight major microplastic types under the three land use types

圾场土壤微塑料的丰度差异较大,可能与垃圾场的堆放年限和垃圾场规模大小有关。

3 种土地利用方式下的土壤微塑料组成成分总体上差异性较小,均以 PET、PU 和 ALK 类型的微塑料为主[图 3(a)],且微塑料尺寸和形状差异较小,均以小粒径($\leq 50 \mu\text{m}$)和碎片状的微塑料为主(图 4 和图 5),这与其他国家或地区报道的结果略有不同。比如,He 等^[36]通过对澳大利亚昆士兰州布里斯班的农业用地、商业用地、工业用地、自然用地和住宅用地微塑料的研究发现,不同土地利用方式对土壤中微塑料的组成影响较大,这可能是由于不同研究中调查对象的空间尺度差异所导致。Feng 等^[37]通过对青藏高原水和土壤进行研究发现,大于 80% 的微塑料尺寸均 $< 500 \mu\text{m}$,而 Zhou 等^[38]通过

对中国中部 3 种不同土地类型中微塑料进行研究也发现粒径较小($10 \sim 100 \mu\text{m}$)和碎片状(53%)的微塑料在土壤中占比最大,说明小粒径和碎片类型的微塑料的吸附性更强,更容易在土壤中累积。本研究对黄土高原土壤微塑料的丰度、类型以及形态特征的田间调查,有效补充了中国北方旱地农业区域土壤微塑料丰度及组成数据资源,可为进一步探讨该区域土壤微塑料的老化、降解、吸附毒性和环境风险提供数据基础。

此外,大多国家^[39]或中国其他地区^[40,41]耕地土壤微塑料主要类型均是 PP 和 PE,但本研究中耕地土壤中则主要以 PET 和 PU 类型的微塑料为主,这种差异可能是由于在不同的研究中的微塑料提取过程具体操作步骤差异较大,不同密度的微塑料在离心过滤过程中被选择性地损失。例如,在一些报告中,仅通过密度分离一步便提取土壤中微塑料,并没有如本研究经过重复离心过滤,因此微塑料样品提取率较高转移损耗偏少^[32,37]。因此,迫切需要一个标准化且可广泛适用的提取鉴别方法,以有效地从土壤/沉积物中提取微塑料,并准确识别其类型和形态,从而量化对比不同类型微塑料在陆地系统中的分布、降解和环境风险。

4 结论

(1) 王东沟流域土壤微塑料的平均丰度为 $4 715 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,微塑料成分主要以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氨酯(PU)和醇酸树脂(ALK)类型为主,碎片状和粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的微塑料占据主导地位。

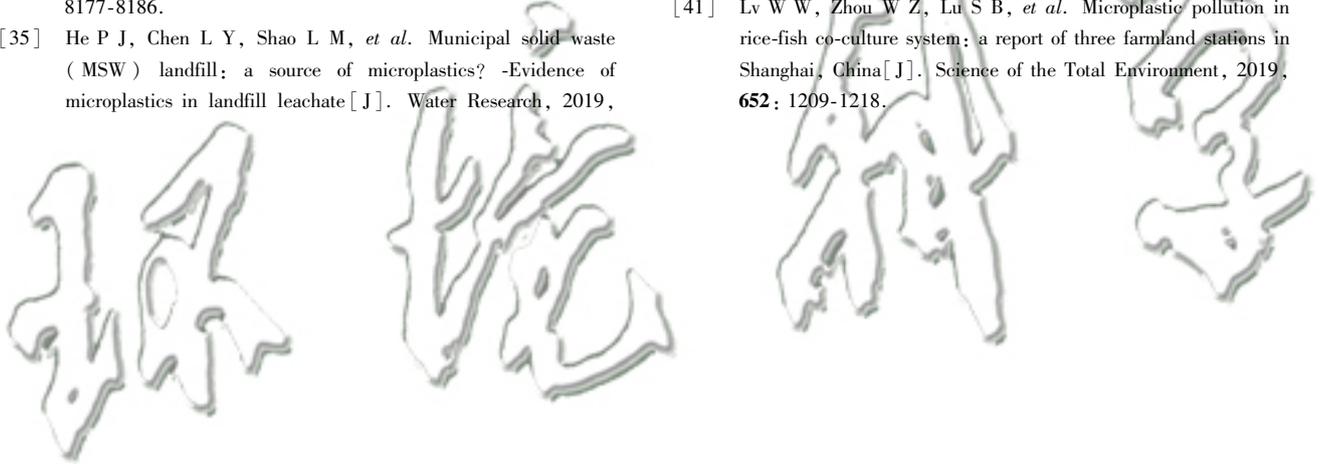
(2) 不同土地利用方式下的微塑料丰度存在显著性差异,耕地土壤微塑料的平均丰度高于苹果园土壤,且显著高于垃圾场土壤。耕地土壤微塑料受到人类活动影响较大,体现了农业实践中多年覆膜和耕作措施对土壤微塑料遗留累积的影响。

(3) 苹果园由于较少的耕作措施和人类活动, 其微塑料的平均面积和宽度、高度、偏心度和圆度等形态特征显著差异于耕地和垃圾场土壤。

参考文献:

- [1] Frias J P G L, Nash R. Microplastics: finding a consensus on the definition[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **138**: 145-147.
- [2] Xu Q J, Xing R L, Sun M D, *et al.* Microplastics in sediments from an interconnected river-estuary region[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139025.
- [3] Sul J A I D, Costa M F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 352-364.
- [4] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms; a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 483-492.
- [5] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64** (12): 2782-2789.
- [6] Rist S, Hartmann N B. Aquatic ecotoxicity of microplastics and nanoplastics: lessons learned from engineered nanomaterials[A]. In: Wagner M, Lambert S (Eds.). *Freshwater Microplastics* [M]. Cham: Springer, 2018. 25-49.
- [7] Primpke S, Christiansen S H, Cowger W, *et al.* Critical assessment of analytical methods for the harmonized and cost-efficient analysis of microplastics [J]. *Applied Spectroscopy*, 2020, **74**(9): 1012-1047.
- [8] Zhou J, Wen Y, Marshall M R, *et al.* Microplastics as an emerging threat to plant and soil health in agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147444.
- [9] Büks F, Van Schaik N L, Kaupenjohann M. What do we know about how the terrestrial multicellular soil fauna reacts to microplastic? [J]. *SOIL*, 2020, **6**(2): 245-267.
- [10] Mintenig S M, Löder M G J, Primpke S, *et al.* Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 631-635.
- [11] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [12] Ballent A, Purser A, De Jesus Mendes P, *et al.* Physical transport properties of marine microplastic pollution [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2012, **9**(12): 18755-18798.
- [13] Barrows A P W, Christiansen K S, Bode E T, *et al.* A watershed-scale, citizen science approach to quantifying microplastic concentration in a mixed land-use river[J]. *Water Research*, 2018, **147**: 382-392.
- [14] 张姗姗, 王洋清, 赵由才, 等. 垃圾填埋场中的塑料-微塑料-纳米塑料环境行为研究前瞻[J]. *环境卫生工程*, 2021, **29** (3): 58-68.
Zhang S S, Wang Y Q, Zhao Y C, *et al.* Perspective of plastics-microplastics-nanoplastics environmental behavior study in landfills[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, **29** (3): 58-68.
- [15] Szymańska M, Obolewski K. Microplastics as contaminants in freshwater environments: a multidisciplinary review [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2020, **20**(3): 333-345.
- [16] Panko J M, Chu J, Kreider M L, *et al.* Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **72**: 192-199.
- [17] Büks F, Kaupenjohann M. Global concentrations of microplastics in soils-a review[J]. *SOIL*, 2020, **6**(2): 649-662.
- [18] Lechthaler S, Waldschläger K, Stauch G, *et al.* The way of macroplastic through the environment[J]. *Environments*, 2020, **7**(10), doi: 10.3390/environments7100073.
- [19] Tang Y Q, Liu Y G, Chen Y, *et al.* A review: research progress on microplastic pollutants in aquatic environments[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142572.
- [20] 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.
- [21] 于泽民, 郭建英. 黄土高原区农村面源污染的途径与防控措施研究[J]. *环境与发展*, 2014, **26**(4): 113-115.
Yu Z M, Guo J Y. Study on the loess plateau of rural nonpoint pollution prevention and control measures[J]. *Environment and Development*, 2014, **26**(4): 113-115.
- [22] 吴杨. 黄土高原不同覆盖种植技术对农田水温效应及玉米生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wu Y. The effects of different mulching patterns on soil water, temperature and maize growth in Loess Plateau areas [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [23] 杨敏. 黄土高原苹果园与典型生态林深层土壤水分利用特征差异性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Yang M. Study on difference of deep soil water use characteristic between apple orchards and typical ecological plantation on the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [24] 舒帆. 我国农用地膜利用与回收及其财政支持政策研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
Shu F. The recycling and utilization of agricultural film and its Financial support policy research [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [25] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, *et al.* A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 161-169.
- [26] 王元元, 李先国, 张大海. 沉积物中微塑料的提取方法研究 [J]. *世界科技研究与发展*, 2016, **38**(1): 105-109.
Wang Y Y, Li X G, Zhang D H. Study of methods for extracting microplastics in sediments[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2016, **38**(1): 105-109.
- [27] Li X T, Liang R F, Li Y, *et al.* Microplastics in inland freshwater environments with different regional functions: a case study on the Chengdu Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147938.
- [28] 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 等. 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*, 2020, **39**(11): 2561-2568.
Cheng W L, Fan T L, Wang S Y, *et al.* Quantity and distribution of microplastics in film mulching farmland soil of Northwest China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(11): 2561-2568.
- [29] Ding L, Zhang S Y, Wang X Y, *et al.* The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China[J]. *Science of the*

- Total Environment, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137525.
- [30] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 12-20.
- [31] Zhang S L, Yang X M, Gertsen H, *et al.* A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 1056-1065.
- [32] Meng F R, Fan T L, Yang X M, *et al.* Effects of plastic mulching on the accumulation and distribution of macro and micro plastics in soils of two farming systems in Northwest China [J]. PeerJ, 2020, **8**, doi: 10.7717/peerj.10375.
- [33] Ren Z F, Gui X Y, Wei Y Q, *et al.* Chemical and photo-initiated aging enhances transport risk of microplastics in saturated soils: key factors, mechanisms, and modeling [J]. Water Research, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117407.
- [34] Zhu K C, Jia H Z, Zhao S, *et al.* Formation of environmentally persistent free radicals on microplastics under light irradiation [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53** (14): 8177-8186.
- [35] He P J, Chen L Y, Shao L M, *et al.* Municipal solid waste (MSW) landfill: a source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate [J]. Water Research, 2019, **159**: 38-45.
- [36] He B B, Wijesiri B, Ayoko G A, *et al.* Influential factors on microplastics occurrence in river sediments [J]. Science of the Total Environment, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139901.
- [37] Feng S S, Lu H W, Tian P P, *et al.* Analysis of microplastics in a remote region of the Tibetan Plateau: implications for natural environmental response to human activities [J]. Science of the Total Environment, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140087.
- [38] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133798.
- [39] Weber C J, Opp C. Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes [J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115390.
- [40] Liu M T, Lu S B, Song Y, *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 855-862.
- [41] Lv W W, Zhou W Z, Lu S B, *et al.* Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: a report of three farmland stations in Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **652**: 1209-1218.



CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i>	(4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i>	(4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i>	(4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i>	(4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i>	(4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i>	(4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i>	(4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i>	(4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i>	(4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i>	(4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i>	(4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i>	(4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i>	(4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i>	(4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i>	(4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i>	(4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i>	(4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i>	(4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i>	(4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i>	(4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i>	(4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i>	(4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i>	(4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i>	(4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i>	(4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i>	(4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i>	(4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i>	(4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i>	(4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i>	(4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i>	(4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i>	(4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4911)