

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长风, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析

朱宇恩¹, 文瀚萱¹, 李唐慧娴¹, 李华¹, 吴超², 张桂香^{3*}, 阎敬¹

(1. 山西大学环境与资源学院, 山西省黄河实验室, 太原 030006; 2. 山西黄河环境与资源经济研究院, 太原 030006; 3. 太原科技大学环境与安全学院, 太原 030024)

摘要: 考察了汾河沿岸农田土壤中小于 1 mm 的微塑料分布特征及赋存因素. 采用传统密度离心法对农田土壤中微塑料进行分离提取, 使用体式显微镜观察了微塑料数量和类别等特征, 采用扫描电镜-能谱仪 (SEM-EDS) 表征微塑料的微观形貌, 采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 对微塑料进行成分鉴定. 结果表明汾河沿岸农田土壤中微塑料平均丰度为 $290.5 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 微塑料包括纤维类、薄膜类、碎片类和发泡类. 其中, 纤维类微塑料丰度最高, 占总量的 52.67%, 主要成分为聚乙烯. 薄膜类和碎片类主要成分为聚丙烯. 发泡类成分为聚苯乙烯. 汾河沿岸土壤中微塑料丰度整体呈现出下游 > 中游 > 上游的趋势. 汾河下游段沿岸土壤微塑料丰度高达 $500.0 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约是其上游段和中游段微塑料丰度的两倍. 随机森林模型分析结果显示, 汾河沿岸农田土壤中微塑料的来源与农膜使用量、人口数量、国内生产总值 (GDP) 和工业生产等密切相关. 其中, 农用薄膜使用是造成沿河农田土壤中微塑料赋存的最重要影响因素.

关键词: 汾河; 农田土壤; 微塑料; 空间分布; 赋存因素

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3894-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012072

Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River

ZHU Yu-en¹, WEN Han-xuan¹, LI Tang-hui-xian¹, LI Hua¹, WU Chao², ZHANG Gui-xiang^{3*}, YAN Jing¹

(1. Shanxi Laboratory for Yellow River, School of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Institute of Yellow River Environment and Resource Economy, Taiyuan 030006, China; 3. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This study investigated the distribution and sources of microplastics smaller than 1 mm in farmland soil along the Fenhe River. Microplastics in soil samples were separated and extracted using the traditional density centrifugation method. The quantity and type of microplastics were examined with a stereomicroscope. The micro-morphology of plastic particles were observed with a scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer. The chemical composition was determined using Fourier transform infrared spectroscopy. The results indicate that the average abundance of microplastics in farmland soil along the Fenhe River is $290.5 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$. These microplastics occur as fibers, films, fragments, and foams. Fiber microplastics are the most abundant, accounting for 52.67% of the total, and are mostly composed of polyethylene. Films and fragments mainly consist of polypropylene whereas the foams consist of polystyrene. Soil samples from different parts of the Fenhe River can be ranked according to the microplastics content in the following order: downstream > midstream > upstream. The abundance of microplastics in soil from the downstream region of the Fenhe River was $500.0 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, twice that of from the upstream and midstream regions. The results of the random forest model indicate that the sources of microplastics in farmland soil along the Fenhe River are closely related to the amount of agricultural films, population, gross domestic product, and industrial production. Among these factors, the amount of agricultural films is a key factor that influences the occurrence of microplastics in farmland soil along the Fenhe River.

Key words: Fenhe River; farmland soil; microplastics; spatial distribution; sources

自上世纪中期塑料制品大规模生产以来, 全球塑料产量从 20 世纪 50 年代至 2016 年间增长近 230 倍^[1]. 大量的废弃塑料因较低的回收率流入环境, 经物理、化学及生物作用形成粒径较小的塑料碎片^[2], 其积累量剧增所导致的系列不良后果已成为环境领域的研究热点. 微塑料被定义为粒子尺寸 $\leq 5 \text{ mm}$ 的塑料颗粒^[3], 作为一种新兴环境污染物广泛分布于淡水湖^[4]、河流^[5]及海洋^[6]等水生环境中. 然而水生生态系统中的大部分微塑料来源于陆生环境的塑料输出^[7,8]. 近期有研究表明土壤预计将代替海洋成为最大的微塑料储藏库, 其中城区土与农

田土尤甚^[9]. 据粗略统计, 欧洲和北美每年向农田分别输入 6.3 万 ~ 43 万 t 和 4.4 万 ~ 30 万 t 微塑料, 这已超过目前估计在全球海洋及地表水中 9.3 万 ~ 23 万 t 的总积累^[10]. 因此, 塑料碎片对于土壤环境所造成的负面影响需引起科学界及社会的格外关注.

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2021-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1803000, 2017YFD0801300); 山西省重点研发计划项目 (201903D321072); 山西省科技重点研发项目 (201603D21110-1)

作者简介: 朱宇恩 (1976 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染治理与修复, E-mail: zhuyuen@sxu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhanggx@tyust.edu.cn

低光低氧的土壤环境易滞留富集微塑料在内的众多污染物。微塑料虽在生化上趋于惰性,但因体小质轻且本身携带毒性添加剂,特别是粒径在 1 mm 以下的微塑料具有较强的生物负面效应^[11]。有研究表明,将蚯蚓暴露在粒径小于 150 μm 和 250 ~ 1 000 μm 的聚乙烯微塑料下观察,发现微塑料可影响其生长速率并造成病理组织学损伤^[12,13];粒径为 80 ~ 250 μm 的聚氯乙烯颗粒可以显著干扰土壤跳虫肠道微生物群落多样性,进而改变其摄食行为^[14]。对于农田生态系统中的微塑料污染,其不仅会降低土壤肥力,影响农作生长及粮食产量,还可能吸附结合其他毒性污染物通过食物链传递进入人体体内,破坏人体能量稳态、新陈代谢与免疫系统,严重危害人类健康^[15]。因此,关于农田土壤微塑料蓄积,既需采取合理削减措施,也需加强管理积极预防。从近几年报道来看,农田土壤微塑料多来源于农膜覆盖、污泥施用及污水灌溉^[16],各地域分布特点有差异也有相似之处,如在类型上多以纤维为主,粒径尺寸偏小,1 mm 以下占比为绝大部分。然而目前关于农田生态系统中的微塑料污染分布研究依然较少。

汾河作为山西省最大河流,接纳了沿河众多城市生活及工业区废水,是多种污染物的水体迁移通道。沿岸农田是河流与两岸农田的交汇区域,在枯丰水期及引水灌溉中二者交互作用强烈,在一定程度上可体现河水源与陆地源污染物的综合赋存特征,能较为集中地体现微塑料的污染特点及状况。本研究将采用密度悬浮法,对汾河沿岸农田土壤中粒径

尺寸 $\leq 1 \text{ mm}$ 的微塑料进行提取、计量及定性,明确微塑料在汾河沿岸农田土壤的分布规律和影响因素,以期为沿岸农田土壤微塑料污染评估提供基础参考数据。

1 材料与方法

1.1 样点设置与样点采集

汾河是黄河的第二大支流,山西省最重要的河流之一。汾河总长为 713 km,由河源到太原市上兰村为上游,上兰村到洪洞县石滩村为中游,石滩村至河口为下游。流域沿线城乡密布,工业集中,农业发达。采样点设置综合考虑沿岸农业情况、干支流情况等,以等距取点为基本原则,平均每隔 10 km 布设一个采样点,最终确定 71 个沿岸农田样点。其中上游段 17 个点,中游段 35 个点,下游段 19 个点,农田距汾河均小于 300 m,采样点分布见图 1。土样采集按照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395-2012)进行,采样深度为 0 ~ 20 cm。将采集好的样品放入牛皮纸袋密封运回实验室,置于清洁干燥处避光自然阴干,过 18 目(孔径为 1 mm)不锈钢筛后待测。

1.2 微塑料分离提取

微塑料提取采用改进后的密度悬浮离心法^[17,18],每个样点 3 个平行。取洁净烧杯加入 150 mL 氯化锌溶液($\rho = 1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),空气泵充入气泡,形成上升气流以便低密度物质上浮。准确称量 50 g 土样加入烧杯中,磁力搅拌 20 min,静置 24 h。将上

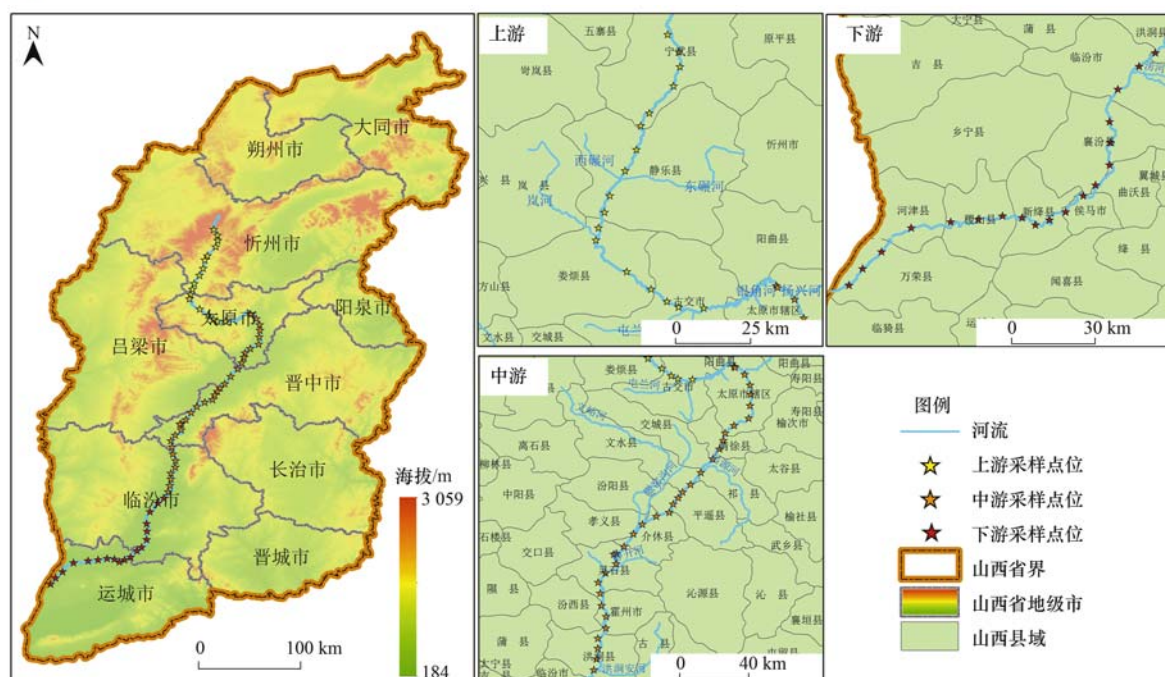


图 1 汾河沿岸农田土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites along the Fenhe River

清液收集到锥形瓶中,加入 30% 的 H_2O_2 ,均匀混合后 50℃ 消解 72 h. 消解液于 $4\,000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 15 min,离心液于 $0.45\,\mu\text{m}$ 滤膜抽滤,最后将载有微塑料的滤膜干燥后放入清洁玻璃皿中避光保存,用于后续分析使用.

1.3 微塑料类别统计及表征

将滤膜置于体式显微镜 (Zeiss Discovery V8) 40 倍^[19] 下目视观察,依照 Han 等^[20] 的鉴定方法对微塑料及其他杂质进行区分筛选,最小观察粒径约为 $20\,\mu\text{m}$. 记录滤膜上可疑微塑料的形状、颜色、硬度及光泽,并根据类别特征信息将其划分为纤维类 (细长状)、薄膜类 (轻薄柔软的薄膜)、碎片类 (小的块状碎片) 及发泡类 (泡沫状)^[17,21]. 在显微镜下用镊子将初步筛选出的微塑料从滤膜上挑出,按类别置于不同清洁干燥的玻璃皿中,准备进一步确认. 利用 SEM-EDS (JSM-IT500HR) 对各类别中部分代表性微塑料进行形貌特征观察并分析其所含元素种类,电镜使用倍数 90 ~ 2 000 倍,操作电压 5 kV. 同时使用 FTIR (Nicolet 380) 对存疑样品进行成分鉴别,并根据官能团特征与标准样品图谱的比对结果确定微塑料材料属性,光谱范围设置在 $400\sim4\,000\text{cm}^{-1}$,扫描次数 32 次,分辨率为 4cm^{-1} .

1.4 实验干扰控制

为保证本研究结果的精准性及可靠性,实验开始前利用空气净化器进行室内空气净化 24 h. 土壤样品在半封闭的自制玻璃罩中进行土样阴干. 所有待用实验容器经超纯水清洗 3 次后于洁净玻璃箱中存放,尽量避免空气接触. 分析过程中实验人员禁止使用任何与塑料相关的用具制品,在半封闭式清洁工作台中完成分析工作. 离心、抽滤及体式显微镜观察等过程中均设置空白对照样品,其计数结果在样品数量统计中予以扣除.

1.5 随机森林回归分析

随机森林是 Breiman^[22] 于 2001 年提出的一种基于决策树的分类器集成算法,通过 Bootstrap 重采样技术从原始样本集中随机选择若干样本,生成具有差异的新样本集,然后基于这些新样本集来构建决策树,形成决策森林. 回归分析过程中,该模型将根据加权均值训练出的 n 个 CART 决策树的平均值来作为最终的预测结果^[23]. 与其他算法相比,随机森林模型的优点在于:①数据无需预处理,其类型及分布不作要求,对于噪声及异常值具有较强的鲁棒性;②节省计算时间,决策树可以并行生成,无需修剪;③预测结果精度高,防止了数据过拟合现象出现^[24]. 随机森林模型灵活,易理解,众多的优良性能使其发展为近年来多数领域广泛使用的分析工具

之一.

本文调用 R 软件中的 Random Forest 工具包来构建随机森林回归模型,利用 %IncMSE 平均标准误差来评估各预测变量对农田土壤采样点中微塑料丰度的影响程度. 分析前对模型中的重要参数 mtry、ntree 和 nodesize 进行了设定. mtry 表示每一个分裂节点处样本预测器的个数,回归分析中一般取预测变量个数的三分之一^[25]; ntree 代表生长树数目, nodesize 表示决策树节点的最小个数,在模型中均采用默认值,因此最终的参数设定为: mtry = 4, ntree = 500, nodesize = 5. 模型评估最终结果与 %IncMSE 数值相关, %IncMSE 越大,表示预测变量与因变量的相关程度越高.

本研究综合考虑了与土壤中微塑料赋存直接相关的经济发展水平、工业源及生活源、人口数量、农业塑料使用量及土壤理化性质等因素,从中选取 12 个预测变量来进行研究讨论: GDP、工业生产总值、人口数量、农用塑料薄膜使用量、生活污水排放量、工业污水排放量、工业废水化学需氧量浓度、玉米播种面积、棉花播种面积以及砂粒、粉砂粒和黏粒占比. 其中土壤粒径采用土壤粒径分析仪测定,其他数据均来自于山西省统计年鉴县 (市、区) 篇、山西省地级市统计年鉴及中国城市统计年鉴.

1.6 统计分析

采用 Excel 2013 进行数据管理,采用 Origin 2018 进行图件绘制. 使用 SPSS Statistics 25.0 中的方差分析 (One-way ANOVA) 研究处理组间的差异性 ($P < 0.05$), 多重比较采用最小显著差异法 (LSD).

2 结果与讨论

2.1 汾河沿岸农田土壤微塑料丰度特征

71 个样品中微塑料分类与计数统计如表 1 所示. 沿岸农田土壤微塑料总丰度为 $(290.5 \pm 15.1)\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中,纤维类微塑料平均丰度为 $(153.0 \pm 12.1)\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大丰度达 $1\,200\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总量的 52.67%,主要来源为纤维纺织物、塑料绳及渔网等使用广泛用量较大的塑料制品;其次为碎片类微塑料,平均丰度为 $(73.5 \pm 6.3)\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,占比 25.32%,最大丰度达 $840\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$;随后为薄膜类微塑料,占比 19.88%,平均丰度达 $(57.8 \pm 2.4)\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,碎片类和薄膜类微塑料来源可能为生活制品和分解的农业塑料废物,如生活用品包装袋、农具、塑料编织袋和农用地膜等;最后是发泡类微塑料,均值占比仅为 2.13%,来源于塑料泡沫制品使用等. 4 种微塑料含量均存在显著性差异 ($P < 0.05$).

表 1 汾河沿岸农田土壤微塑料丰度统计/ $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Statistics of microplastics abundance in farmland soil along the Fenhe River/ $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$						
微塑料类型	样品数量	均值 ¹⁾	标准偏差 (S. D.)	范围	中位数	占比/%
纤维类	71	153.0a	12.1	0 ~ 1 200	100	52.67
薄膜类	71	57.8c	2.4	0 ~ 340	40	19.88
碎片类	71	73.5b	6.3	0 ~ 840	20	25.32
发泡类	71	6.2d	1.1	0 ~ 140	2	2.13
总和	71	290.5	15.1	20 ~ 1 840	220	100.00

1) 不同小写字母表示汾河沿岸农田土壤不同类型微塑料丰度的显著性差异 ($P < 0.05$)

表 2 总结了近年国内农田菜地土壤中的微塑料研究结果^[2,17,26~28]. 可见,农田菜地土壤微塑料丰度范围在 $40 \sim 42\,960\,\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,粒径范围涵盖 $0.02 \sim 16\,\text{mm}$,微塑料类型包括纤维、碎片、微珠、发泡和薄膜等这 7 类,微塑料成分包括 PP(聚丙烯)、PE(聚乙烯)、PS(聚苯乙烯)及 PES(聚醚砜树脂)等多种. 相比而言,本研究地区微塑料丰度较低,总和均值为

$290.5\,\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,但高于黄土高原农田土壤和上海菜地土壤. 微塑料类型均为已有研究涵盖类型,说明土壤中微塑料种类趋同,仅因地块差异而存在特征微塑料. 就粒径范围来看, $\leq 1\,\text{mm}$ 的微塑料在多数研究中占比超过 90%,表明本研究所选粒径基本可以代表样点微塑料赋存特征. 总体而言,汾河沿岸农田土壤微塑料污染相对处于较轻水平.

表 2 国内不同地域农田菜地微塑料分布及特征¹⁾

Table 2 Distribution and characteristics of microplastics in farmland or vegetable fields in different regions of China						
土壤类型	丰度 $/\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$	粒径范围 $/\text{mm}$	微塑料类型	微塑料成分	地点	文献
农田土壤	1 430 ~ 3 410	0 ~ 5 ($\leq 1\,\text{mm}$ 约 90%)	纤维、碎片、薄膜和微球	PVC、PP、PS、PET、PE 和 HDPE	陕西	[2]
菜地土壤	62.50 ± 12.97 (0 ~ 3 cm) 78.00 ± 12.91 (3 ~ 6 cm)	0.03 ~ 16	纤维、薄膜和碎片	PP、PE 和 PES	上海	[17]
菜地土壤	2 020	0.02 ~ 5 ($\leq 1\,\text{mm}$ 约 92%)	纤维、碎片、微珠和发泡	PA、PP、PS、PVC 和 PE	武汉	[26]
农田土壤	40 ± 126 (0 ~ 10 cm) 100 ± 141 (10 ~ 30 cm)	0.02 ~ 5	—	PP 和 PE	黄土高原	[27]
农田土壤	7 100 ~ 42 960	0.05 ~ 10 ($\leq 1\,\text{mm}$ 占 95%)	纤维、碎片、薄膜和塑料细线	—	云南	[28]
农田土壤	290.5 ± 15.1	0.02 ~ 1	纤维、碎片、薄膜和发泡	PP、PE 和 PS	山西汾河	本研究

1) “—”表示文章中未报道

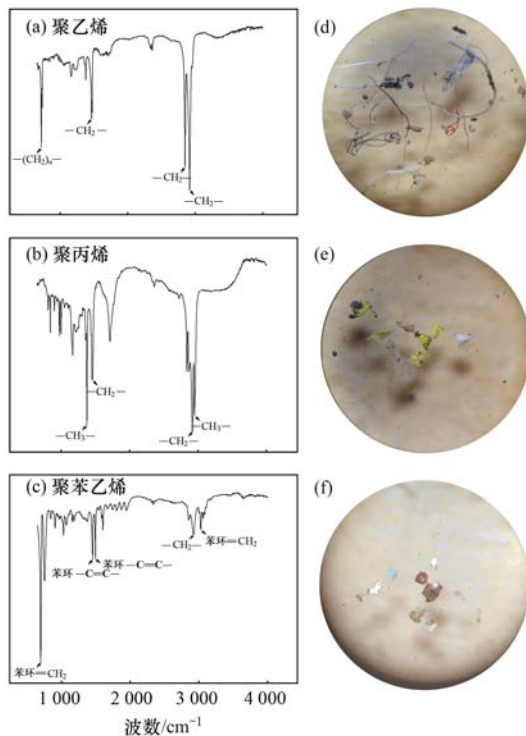
2.2 汾河沿岸农田土壤微塑料类型特征

用体式显微镜观察土壤样品微塑料形状、颜色、硬度及光泽(如图 2),观察发现纤维类的微塑料主要以白色和黑色为主,兼有蓝色、红色、黄色、绿色和橙色,有细丝纤维也有由膜卷曲成的纤维,且纤维形状有竖直、卷曲和缠绕等不同形态,纤维质地也有柔软硬脆之分,少有光泽;薄膜类的微塑料主要为白色、黄色和透明无色,间或有其他颜色如蓝色、棕色和红色,形状多样,有长条状、片状及不规则形状,其有一定延展性且轻软,反光微弱;碎片类的微塑料主要为黄色和白色,并包含有棕色、蓝色、红色和透明无色,形状不规则且在强光照射下有反光性质,边缘有破损痕迹,表面较光滑,质地较硬;发泡类微塑料数量稀少,颜色主要为白色,表面似由许多空泡组成,且具有弹性. 结合傅里叶红外变换光谱仪的鉴定结果及标准谱图^[20,29],确定了采样点中各类别微塑料的主要聚合物成分. 其中,纤维类微塑料的红外光

谱分析成分主要为聚乙烯[图 2(a)];薄膜类和碎片类微塑料主要成分为聚丙烯[图 2(b)];而发泡类微塑料成分为聚苯乙烯[图 2(c)]. 各类型微塑料红外光谱图见图 2.

2.3 汾河沿岸农田土壤微塑料微观形貌特征

微塑料电镜观察发现(见图 3),土壤中分离的微塑料表面粗糙均有划痕或孔隙,边缘不整齐. 图 3(a)和 3(b)为代表性薄膜微塑料,形状轮廓较为规整,表面有划痕,其上多分布难以消解的碎屑,能谱扫描显示只含 C 和 O 元素,风化程度尚不严重;图 3(c)和 3(d)为发泡类微塑料,表面呈网状结构纹痕明显,形状不规则,边缘受腐蚀,接触中轻盈、有弹性、易移动;图 3(e)和 3(f)为碎片类微塑料,其表面部分光滑平整,边缘破碎凹凸不平,成块状裂解且粒径较小,受磨损程度高;图 3(g)和 3(h)为纤维类微塑料,中间空心,边缘卷曲,估测可能由膜变形卷曲而成,在观察中也发现有丝状纺织类纤维存在,但



(a) 纤维类聚乙烯红外光谱图, (b) 薄膜及碎片类聚丙烯红外光谱图, (c) 发泡类聚苯乙烯红外光谱图, (d) 纤维类微塑料显微照, (e) 薄膜类微塑料显微照, (f) 碎片及发泡类微塑料显微照

图2 各类型微塑料 FTIR 及显微照片

Fig. 2 FTIR spectra and photomicrographs of different types of microplastics

断裂情形普遍,不再为连续的线性织物.能谱分析发现微塑料虽以 C 和 O 类元素为主,但会含有 Si 和 Al 元素,推测可能是由于 H_2O_2 消解土壤颗粒不完全造成.经超声处理后,电镜发现仍有 Si 和 Al 元素的留存,表明二者作用较强,连接牢固,形成微塑料-矿物颗粒复合体,这也表明微塑料经老化后表面粗糙化对重金属和有机污染物等环境物质的吸附作用可能加强^[30],存在二者耦合作用的微观基础.

2.4 汾河沿岸农田土壤微塑料分布规律

2.4.1 微塑料丰度分布总特征

从图4可见,汾河微塑料总丰度基本呈现出从上游到入黄口的递增态势,但在某些区域段含量有所下降,具体表现在上中游分界处的兰村峡谷汾河二库进入太原区段与中下游分界处的灵霍山峡区段丰度显著降低;总丰度在下游段显著上升,在入黄口处略有下降.上游段和中游段微塑料总丰度分别为 $(228.2 \pm 8.9) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(206.9 \pm 14.9) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,下游段平均总丰度高达 $(500.0 \pm 36.9) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,与前两者间存在显著性差异 ($P < 0.05$).

2.4.2 微塑料区段分布特征

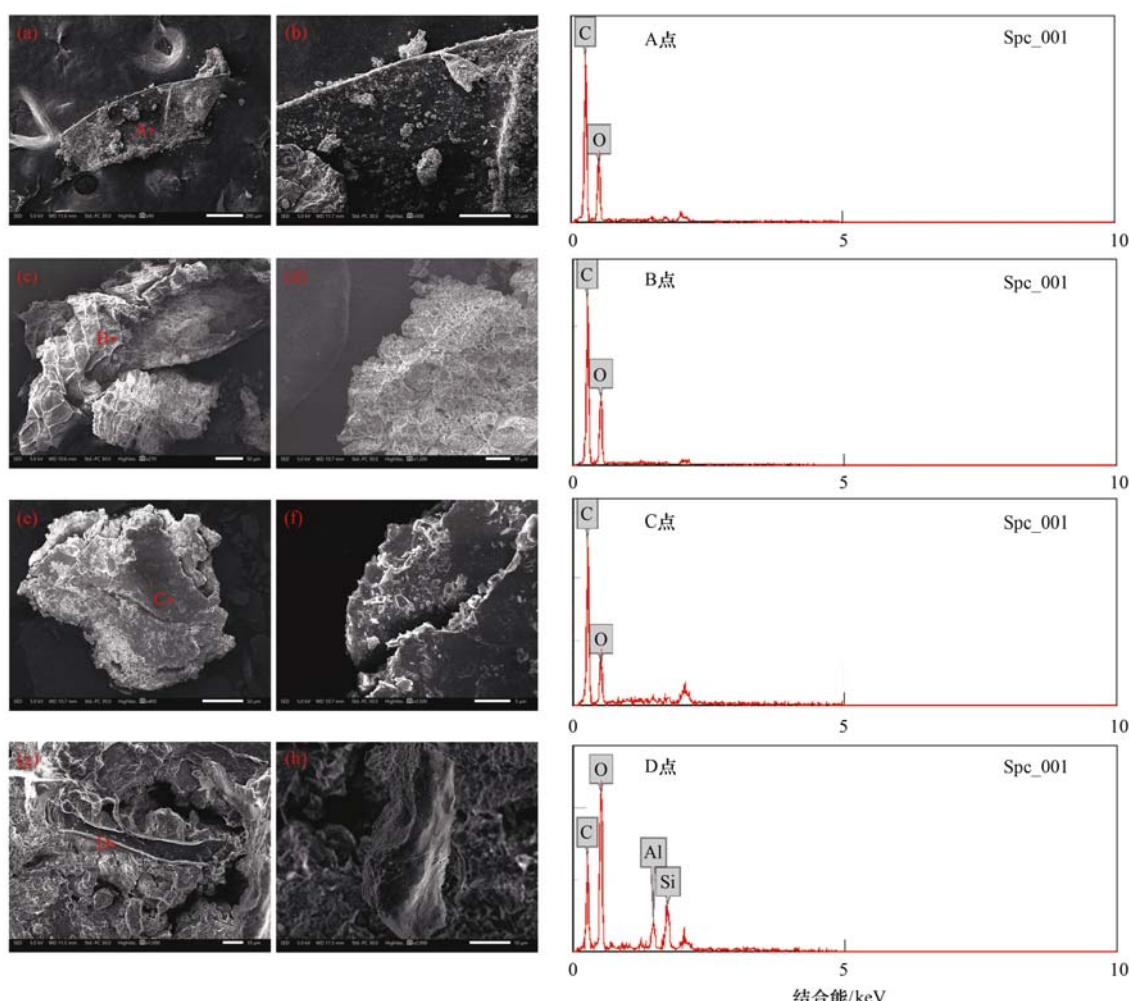
4 种类型微塑料的流域分布特征表明(图4),纤维类在下游中段丰度最高;薄膜类在中游太原及

晋中盆地前端含量较高,均值为 $(225.0 \pm 5.0) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他区段 ($P < 0.05$);碎片类则呈现下游段丰度高企态势;发泡类整体含量较低,均小于 $80 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,且呈现出典型的上游 < 中游 < 下游的特征.结合图5,汾河上、中和下游这3个区段类型特征分析表明,上游段纤维类微塑料占比高于其他3种,相较于其他区段而言该区段微塑料类型丰度较为均匀(发泡类除外).中游段薄膜类微塑料丰度显著高于其他区段 ($P < 0.05$),为 $(74.9 \pm 4.9) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,纤维、薄膜、碎片及发泡类含量依次递减,4类微塑料丰度均呈现显著性差异 ($P < 0.05$).下游段的纤维类、碎片类和发泡类微塑料丰度分别为 (274.7 ± 33.8) 、 (181.1 ± 15.5) 和 $(13.7 \pm 3.8) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,均显著高于其他区段 ($P < 0.05$),碎片类丰度排列种类第二且丰度值较高,与其他区段迥异.从不同类型微塑料占比情况分析,各区段中纤维类微塑料都含有50%以上的占比,是微塑料中的最主要成分,薄膜类微塑料相较于上下游在中游段占比较大,占比为36.20%;碎片类在下游段占比仅次于纤维类,为36.22%,发泡类在3个区段中占比最少.

2.4.3 微塑料县域分布特征

图6为汾河流经不同县市的微塑料丰度及占比,从中可以发现流经县市中存在若干高值区域和高值点.静乐县为上游段高值点,达 $(290.0 \pm 13.2) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$.清徐与祁县为中游段高值点,丰度达 $(320.0 \pm 53.3) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(400.0 \pm 69.3) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$;下游段除河津市外其他县市丰度值均较高,尤以尧都区、新绛县和稷山县为甚,三地区微塑料丰度分别达到 (410.0 ± 36.1) 、 (940.0 ± 90.4) 和 $(460.0 \pm 48.1) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,且纤维类占比均超于50%,高于其他县市.

从不同区县微塑料类型比例分析,占比规律以纤维类 > 薄膜类 > 碎片类 > 发泡类为主,但也存在碎片类大于薄膜类的情况.研究发现,纤维类微塑料除来源于人类衣料纤维及日常塑料绳结破损外,农用塑料薄膜的分解卷曲也可成为其主要来源之一. Zhou 等^[14]在比较覆膜农田与非覆膜农田中各类型微塑料丰度时发现,覆膜农田中纤维类微塑料含量显著高于非覆膜农田,因此猜测某些自然机械作用可能会将土壤中破碎的小块塑料薄膜拉伸成纤维类微塑料,非人口密集区土壤中纤维类微塑料的高丰度可能与大面积农膜覆盖有关.薄膜类和碎片类在不同区县占比差异较大,整个流域区县二者比例变化呈交错之势,此类差异在一定程度上可反映县域化农田种植习惯不同及县域微塑料排放特征.另外水土交汇和引水灌溉也会将汾河水中的微塑料引入农田,使其含量增高,上中下游的类型和丰度差异也



(a)薄膜全貌,(b)薄膜细节,(c)发泡全貌,(d)发泡细节,(e)碎片全貌,(f)碎片细节,(g)纤维全貌,(h)纤维细节

图3 各类型微塑料微观表面 SEM-EDS 图

Fig. 3 SEM-EDS images of different types of microplastics

是汾河的交互作用特征的一种体现. 而整个汾河沿岸土壤中发泡微塑料最为稀少,众多县市土壤丰度为0,这与发泡类较为轻盈相关,易随水和风迁移,因此土壤中赋存较少.

2.5 汾河沿岸农田土壤微塑料分布影响因素分析

土壤中微塑料赋存的影响因素众多,本研究利用随机森林回归模型分别以上、中和下游段,上中游段、中下游段以及汾河全流域为研究对象,对12个可能影响因素进行了重要性排序分析(图7). 上、中和下游分析结果表明[图7(a)~7(c)]:工业生产总值和GDP是汾河上游段沿岸农田微塑料赋存的前两位影响因素,中游段主导因素为人口数量与GDP,下游段主要与农用塑料薄膜使用量和人口数量密切相关,相较于中游,上游与下游区段前两项因素较其他影响因素更为显著. 上中游和中下游重要性排序结果表明[图7(d)与图7(e)],汾河上中游段微塑料含量影响因素前三位分别是工业生产总值、GDP及人口数量,中下游段微塑料赋存主要因

素为农用塑料薄膜使用量和工业生产总值. 而汾河整体因素重要性排序结果显示[图7(f)],农田微塑料丰度与农用塑料薄膜使用量及工业总产值有关,分列前两位.

由上述结果可见,经济活动、人口数量及农膜使用量是影响汾河沿岸土壤微塑料赋存的前三大因素. 汾河流经太原市与晋中盆地、临汾盆地和运城盆地,区域内人口众多,工业分布较为集中,农业发达,是山西省主要经济农业活跃区,因此工农业及人群活动对微塑料赋存影响较大. 但不同区段的影响因素显著不同. 汾河上游相对人口稀少,综合指标GDP及工业生产指标成为关键因素;中游区域流经人口聚集和城市集中区,人口数量与综合指标GDP成为主要因素. 而下游除临汾段外,其他区域为农业片区,因此农膜使用量成为第一因素. 同时,上中游及中下游区段赋存因素呈现出区域复合特性. 有关研究也证实了相关活动对土壤中微塑料的影响,如悉尼工业区土壤微塑料所占质量分数高达

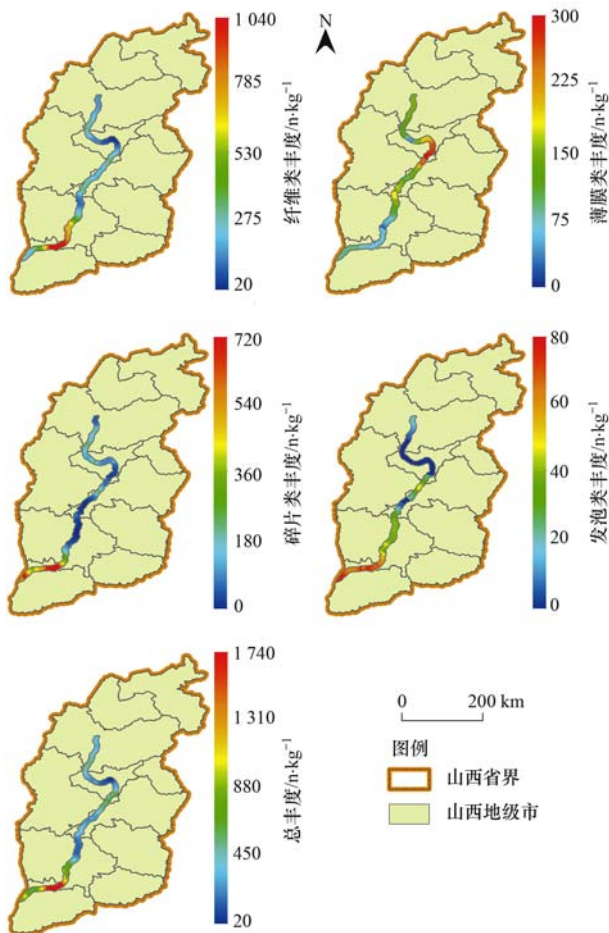
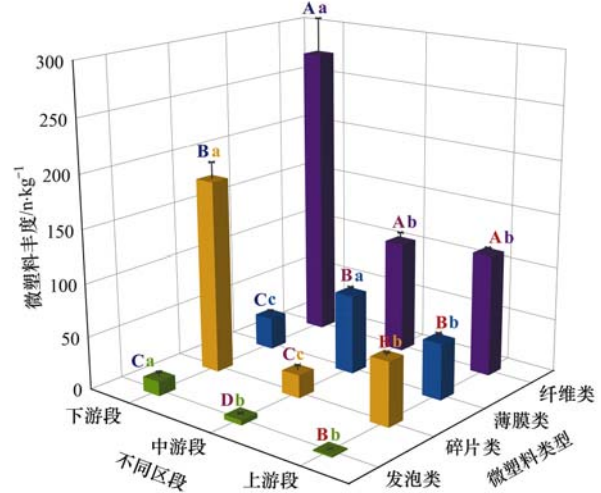


图4 汾河沿岸农田土壤微塑料丰度

Fig. 4 Abundance of microplastics in farmland soil along the Fenhe River

6.7%^[31]; Ramos 等^[32]与 Steinmetz 等^[33]的研究发现农业区农膜覆盖显著提高了农用土中塑料碎片的残留量。

而频繁的人类活动加剧了微塑料污染的严峻程度^[34],本研究中人口数量的贡献值说明了土壤微塑料输入与人类活动的密切关系, Scheurer 等^[35]也提



不同小写字母表示不同区段同类型微塑料丰度显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同区段不同类型微塑料丰度显著性差异 ($P < 0.05$)

图5 汾河沿岸不同区段农田土壤各类型微塑料丰度

Fig. 5 Abundance of different types of microplastics in farmland soil along different sections of the Fenhe River

出土壤样品中微塑料污染水平与流域人口密度密切相关的结论. 人口数量导致的塑料排放涉及多种, 如洗衣机污水及生活污水是环境中塑料纤维的重点排放源. 有研究表明, 每件衣物在洗涤过程中会产生 1 900 根塑料纤维, 并通过废水溢流或不当管理释放到水生及陆生环境^[36]. 作为工业及生活污水废水接纳地, 污水处理厂在处理污废水的同时也成为了微塑料的富集地, 约 90% 的微塑料在污水处理后积累到污泥中, 污泥和污水的施用会严重导致农田土壤中微塑料的积累^[37].

随机森林变量重要性排序结果在一定程度上指明了汾河各流域区段及总体沿岸农田土壤中微塑料的来源. 工农业生产及生活源废塑料排放等人为活动与土壤微塑料污染相关, 而使用农用塑料薄膜是

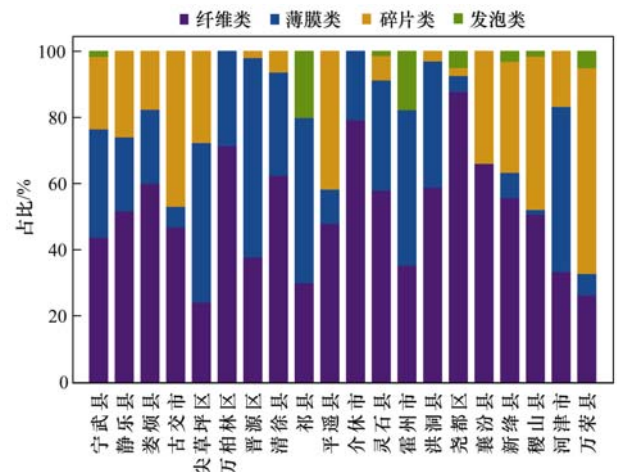
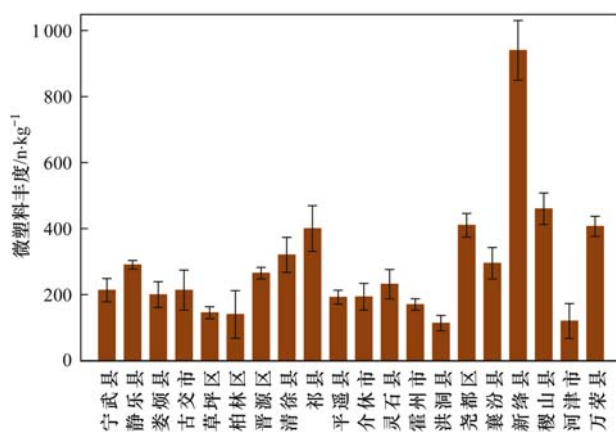
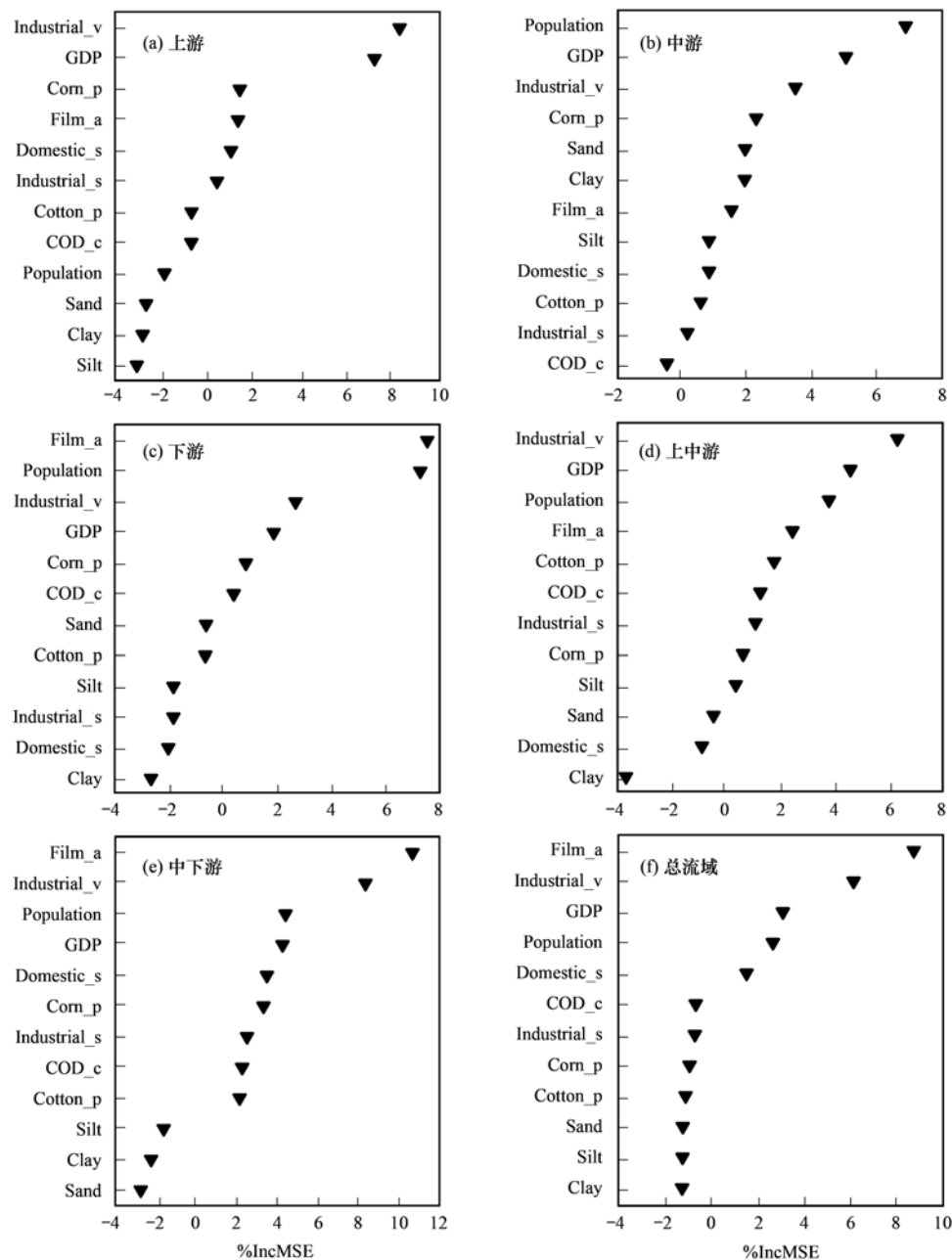


图6 汾河沿岸不同市县农田土壤微塑料丰度及占比

Fig. 6 Abundance and proportion of microplastics in farmland soil of different cities and counties along the Fenhe River



Industrial_v 表示工业生产总产值; Industrial_s 表示工业废水排放量; Film_a 表示农用塑料薄膜使用量; Population 表示人口数量; GDP 表示地区生产总值; Domestic_s 表示生活污水排放量; COD_c 表示工业废水化学需氧量浓度; Corn_p 表示玉米播种面积; Cotton_p 表示棉花播种面积; Silt 表示粉砂粒占比; Sand 表示砂粒占比; Clay 表示黏粒占比

图7 随机森林变量重要性排序

Fig. 7 Sorting importance of random forest variables

造成其赋存形成的关键. 因此在农业生产中, 注重农用薄膜使用的合理化及无害化是农田微塑料赋存消减的首要途径.

3 结论

- (1) 汾河沿岸农田土壤微塑料丰度为 290.5 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 由纤维类、碎片类、薄膜类和发泡类这 4 种类型组成, 其中以纤维类为主, 占总量的 52.67%.
- (2) 汾河沿岸农田纤维类微塑料主要成分为聚乙烯, 薄膜和碎片类主要成分为聚丙烯, 发泡类为聚

- 苯乙烯.
- (3) 汾河沿岸农田微塑料丰度整体呈现出下游 > 中游 > 上游的态势, 下游区微塑料赋存量达 500.0 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于上、中游.
- (4) 4 种类型微塑料中, 各区段纤维类微塑料占比较高, 均超过 50%, 薄膜和碎片类居中, 二者比例在不同区县中呈交错之势.
- (5) 随机森林结果表明汾河沿岸农田土壤微塑料影响因素与农膜使用量、工业生产总产值、GDP 和人口数量密切相关, 全流域分析结果显示农用塑料

薄膜使用是造成沿河农田微塑料赋存的主要因素。

参考文献:

- [1] Alimba C G, Faggio C. Microplastics in the marine environment: current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, **68**: 61-74.
- [2] 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.
- [3] De Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, *et al.* Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [4] Jian M F, Zhang Y, Yang W J, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in China's largest freshwater lake system [J]. *Chemosphere*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128186.
- [5] Ding L, Mao R F, Guo X T, *et al.* Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **667**: 427-434.
- [6] Everaert G, De Rijcke M, Lonneville B, *et al.* Risks of floating microplastic in the global ocean [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115499.
- [7] Alimi O S, Budarz J F, Hernandez L M, *et al.* Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(4): 1704-1724.
- [8] Horton A A, Svendsen C, Williams R J, *et al.* Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK-Abundance, sources and methods for effective quantification[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **114**(1): 218-226.
- [9] Hurley R R, Nizzetto L. Fate and occurrence of micro(nano) plastics in soils: knowledge gaps and possible risks[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, **1**: 6-11.
- [10] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [11] Guo J J, Huang X P, Xiang L, *et al.* Source, migration and toxicology of microplastics in soil[J]. *Environment International*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105263.
- [12] He D F, Luo Y M, Lu S B, *et al.* Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, **109**: 163-172.
- [13] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [14] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, *et al.* Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: multiple sources other than plastic mulching film [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121814.
- [15] Prata J C, Da Costa J P, Lopes I, *et al.* Environmental exposure to microplastics: an overview on possible human health effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **702**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134455.
- [16] Büks F, Kaupenjohann M. Global concentrations of microplastic in soils, a review[J]. *Soil*, 2020, doi: 10.5194/soil-2020-50.
- [17] 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.
- [18] Van Cauwenberghe L, Devriese L, Galgani F, *et al.* Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects[J]. *Marine Environmental Research*, 2015, **111**: 5-17.
- [19] Zhang J X, Zhang C L, Deng Y X, *et al.* Microplastics in the surface water of small-scale estuaries in Shanghai [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110569.
- [20] Han M, Niu X R, Tang M, *et al.* Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135601.
- [21] 简敏菲, 周隆胤, 余厚平, 等. 鄱阳湖-饶河入湖段湿地底泥中微塑料的分离及其表面形貌特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 579-586.
- Jian M F, Zhou L Y, Yu H P, *et al.* Separation and microscopic study of microplastics from the sediments of the wetland in the estuary of Raohe River of Poyang Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 579-586.
- [22] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [23] Wang C B, Pan Y P, Chen J G, *et al.* Indicator element selection and geochemical anomaly mapping using recursive feature elimination and random forest methods in the Jingdezhen region of Jiangxi Province, South China [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, **122**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104760.
- [24] Zhang S, Liu G, Chen S L, *et al.* Assessing soil thickness in a black soil watershed in northeast China using random forest and field observations[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, **9**(1): 49-57.
- [25] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by random forest[J]. *R News*, 2002, **2**(3): 18-22.
- [26] Chen Y L, Leng Y F, Liu X N, *et al.* Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113449.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 周隆胤, 简敏菲, 余厚平, 等. 乐安河—鄱阳湖段底泥微塑料的分布特征及其来源[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(5): 1222-1232.
- Zhou L Y, Jian M F, Yu H P, *et al.* Distribution of microplastics and its Source in the sediments of the Le'an River in Poyang Lake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(5): 1222-1232.
- [30] Antunes J C, Frias J G L, Micaelo A C, *et al.* Resin pellets from beaches of the Portuguese coast and adsorbed persistent organic pollutants [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **130**: 62-69.
- [31] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics

- using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5774-5780.
- [32] Ramos L, Berenstein G, Hughes E A, *et al.* Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **523**: 74-81.
- [33] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, *et al.* Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 690-705.
- [34] Akdogan Z, Guven B. Microplastics in the environment: a critical review of current understanding and identification of future research needs[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113011.
- [35] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (6): 3591-3598.
- [36] Browne M A, Crump P, Niven S J, *et al.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45** (21): 9175-9179.
- [37] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(10): 1021-1030.
- Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, *et al.* Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(10): 1021-1030.



CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)