环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷　第6期
2023年6月15日

目　次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 …… 张少轩，陈安娜，陈成康，景侨楠，刘建国（3017）

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 …… 杨光，史波芬，周传斌（3024）

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 …… 乔治，陈嘉悦，王楠，卢应爽，贺曈，孙宗耀，徐新良，杨浩，李莹，王方（3034）

城市空间格局与热环境响应关系：以合肥市区为例 …… 陈媛媛，姚侠妹，偶春，张清怡，姚晓洁（3043）

天津市“十三五”期间 $PM_{2.5}$ 减排效果评估 …… 肖致美，徐虹，蔡子颖，张裕芬，刘茂辉，孙猛，李鹏，杨宁，戢运峰（3054）

清洁取暖对保定市采暖期 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶的影响 …… 罗宇骞，张凯，赵妤希，任家豪，段菁春，李欢欢，关健，郭志强，李博文（3063）

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 …… 谢放尖，郑新梅，窦焘焘，杨峰，刘春蕾，李洁，谢轶嵩，王艳，胡建林，陈长虹（3071）

大气环流型对珠三角 2015～2020 年臭氧变化的影响 …… 汪瑶，刘润，辛繁（3080）

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 …… 符传博，丹利，佟金鹤，徐文帅（3089）

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 …… 林鑫，仝纪龙，王伊凡，陈羽翔，刘永乐，张鑫，敖丛杰，刘浩天（3098）

2016～2020 年成都市控制 $PM_{2.5}$ 和 $O_{3\text{-}8h}$ 污染的健康效益评价 …… 张莹，田琪琪，魏晓钰，张少波，胡文东，李明刚（3108）

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 …… 刘婵芳，张傲星，房庆，叶毓婧，杨红龙，陈炯恺，吴雯潞，侯岳，莫佳佳，傅宗玫（3117）

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 …… 王艳妮，杨敬婷，黄贤峰，程燕，陆标，顾兆林（3130）

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 …… 周东，黄智浦，李思敏，王森，牛振川，熊晓虎，冯雪（3142）

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 …… 刘立明，王超，巩文雯，陆安祥，任东，涂清，贾漫珂（3152）

雅鲁藏布江水化学演变规律 …… 江平，张全发，李思悦（3165）

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 …… 徐奇峰，夏云，李书鉴，王万洲，李志（3174）

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 …… 罗鹏程，涂耀仁，孙婷婷，刘生辉，高佳欣，寇佳怡，顾心彤，段艳平（3184）

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 …… 蒋宝，隋珊珊，孙成一，王亚玲，荆降龙，凌文翠，李珊珊，李国傲（3198）

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 …… 郭文静，张东，蒋浩，吴洋洋，张郭妙，段慧真，许梦军，麻冰涓，陈昊，黄兴宇（3206）

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 …… 武宇圣，黄天寅，张家根，田永静，庞燕，许秋瑾（3217）

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 …… 刘春燕，于开宁，张英，荆继红，刘景涛（3228）

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 …… 闫志雲，曾妍妍，周金龙，孙英，马常莲（3237）

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 …… 陈颖，王佳文，梁恩航，陈倩（3247）

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 …… 许恒韬，付小航，丰卫华，王挺（3260）

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 …… 陈文静，石峻岭，李雪婷，张李金，刘富强，陈正祝，庞维海，杨殿海（3270）

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中Cd(Ⅱ)和Ni(Ⅱ)的去除性能及机制 …… 张凤智，王敦球，曹星沣，刘桥京，岳甜甜，刘立恒（3278）

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 …… 何李文泽，陈钰，孙飞，李艳君，杨顺生，张志鹏（3288）

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 …… 张东，葛文彪，赵爱萍，高振朋，陈昊，张琮，蒋浩，吴文阳，廖琪，李成杰，黄兴宇，麻冰涓（3301）

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 …… 符立松，侯磊，王艳霞，李晓琳，王万宾，梁启斌（3309）

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 …… 黄静文，刘磊，颜晓元，逯超普（3321）

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 …… 金岩松，金凯，王飞，刘春霞，秦鹏，宗全利，刘佩茹，陈明利（3329）

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 …… 丁岳，王柳柱，桂峰，赵晟，朱望远（3343）

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 …… 孙雪，龙永丽，刘乐，刘继亮，金丽琼，杜海峰，陈凌云（3353）

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 …… 李文宝，张博尧，史玉娇，郭鑫，李兴月（3364）

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 …… 毛晓雅，刘晋仙，贾彤，吴铁航，柴宝峰（3376）

植被类型对黄土高原露采矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响 …… 赵姣，马静，朱燕峰，于昊辰，张琦，陈浮（3386）

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 …… 姚丽茹，李伟，朱员正，普布仓决，韩娟（3396）

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 …… 朱书红，辉朝茂，赵秀婷，刘蔚漪，张仲富，刘会会，张文君，朱礼月，涂丹丹（3408）

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N_2O 排放及其功能基因的影响 …… 陈绮琦，王紫君，陈云忠，王誉琴，朱启林，胡天怡，胡煜杰，伍延正，孟磊，汤水荣（3418）

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 …… 蒋洪丽，雷琪，张彪，吴淑芳（3426）

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 …… 穆晓国，高虎，李梅花，赵欣茹，郭宁，靳磊，李建设，叶林（3439）

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 …… 陈明，王琳玲，曹柳，李名阅，申哲民（3450）

云南 5 城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中重金属含量表征及健康风险 …… 韩新宇，郭晋源，史建武，李定霜，王怡明，宁平（3463）

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 …… 李军，李开明，王晓槐，焦亮，臧飞，毛潇萱，杨云钦，台喜生（3475）

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价：以西北某典型工业园区为例 …… 高越，吕童，张蕴凯，张博晗，毕思琪，周旭，张炜，曹红斌，韩增玉（3488）

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 …… 张传华，王钟书，刘力，刘燕（3500）

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 …… 王美华（3509）

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 …… 刘娅君，李彩霞，梅楠，张美平，张成，王定勇（3520）

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 …… 刘海，魏伟，宋阳，潘杨，黄健敏（3531）

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 …… 安永龙，殷秀兰，李文娟，金爱芳，鲁青原（3544）

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 …… 汤金来，赵宽，胡睿鑫，徐涛，王宜萱，杨扬，周葆华（3562）

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 …… 魏洪斌，罗明，向垒，查理思，杨慧丽（3573）

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 …… 卫晓锋，孙紫坚，陈自然，魏浩，孙厚云，刘卫，傅大庆（3585）

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 …… 祁浩，庄坚，庄重，王琪，万亚男，李花粉（3600）

山东省典型污灌区土壤-小麦重金属健康风险评估 …… 王菲，费敏，韩冬锐，李春芳，曹文涛，姚磊，曹见飞，吴泉源（3609）

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 …… 牛硕，李艳玲，杨阳，商艳萍，王天齐，陈卫平（3619）

《环境科学》征订启事（3062）　《环境科学》征稿简则（3116）　信息（3164，3259，3572）

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第6期 2023年6月
Vol.44, No.6 Jun., 2023

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响

符立松[1], 侯磊[1], 王艳霞[1], 李晓琳[1], 王万宾[2], 梁启斌[1*]
(1. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2. 云南省生态环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要: 污水处理厂(WWTPs)是微塑料"源-汇"过程的重要场所,污水处理工艺和微塑料特性对微塑料去除效果的影响有待深入探讨. 综述了 57 篇文献中 78 个 WWTPs 的微塑料赋存特征,基于 Meta 分析探讨了不同污水处理工艺和微塑料赋存特征对其去除效果的影响. 结果表明:①进水和出水中微塑料的丰度范围分别为 1.56×10^{-2} ~ 3.14×10^{4} n·L^{-1} 和 1.70×10^{-3} ~ 3.09×10^{2} n·L^{-1},污泥中的微塑料赋存丰度范围为 1.80×10^{-1} ~ 9.38×10^{3} n·g^{-1}; ②以氧化沟、生物膜和传统活性污泥为核心工艺的 WWTPs 对微塑料的总去除率(>90%)优于序批式活性污泥、厌氧-缺氧-好氧和缺氧-好氧工艺; ③一级处理对微塑料的去除率(62.87%)略高于二级处理(55.78%)和三级处理(58.45%),"格栅 + 沉砂池 + 初沉池"是一级处理中去除率最高的工艺组合,膜生物反应器在二级处理中去除率最高,过滤为三级处理最佳技术; ④WWTPs 对薄膜、泡沫和碎片微塑料的去除率(>90%),高于纤维(88.36%)和球状(87.23%),粒径 >0.5 mm 的微塑料比 <0.5 mm 的更容易去除,WWTPs 对聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚丙烯(PP)的去除效果较好(>80%).

关键词: 微塑料; Meta 分析; 污水处理工艺; 赋存特征; 去除效果
中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)06-3309-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202208121

Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis

FU Li-song[1], HOU Lei[1], WANG Yan-xia[1], LI Xiao-lin[1], WANG Wan-bin[2], LIANG Qi-bin[1*]
(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China)

Abstract: Microplastics (MPs) are ubiquitous emerging pollutants that have been found in the marine, freshwater, air, and soil environments. Wastewater treatment plants (WWTPs) play an important role in releasing MPs to the environment. Therefore, understanding the occurrence, fate, and removal mechanism of MPs in WWTPs is of great importance towards microplastic control. In this review, the occurrence characteristics and removal rates of MPs in 78 WWTPs from 57 studies were discussed based on Meta-analysis. Specifically, the key aspects regarding MPs removal in WWTPs, such as wastewater treatment processes and MPs shapes, sizes, and polymer compositions were analyzed and compared. The results showed that: ① the abundances of MPs in the influent and effluent were 1.56×10^{-2}-3.14×10^{4} n·L^{-1} and 1.70×10^{-3}-3.09×10^{2} n·L^{-1}, respectively. The abundance of MPs in the sludge ranged from 1.80×10^{-1} to 9.38×10^{3} n·g^{-1}. ② The total removal rate (>90%) of MPs by WWTPs using oxidation ditch, biofilm, and conventional activated sludge treatment processes was higher than that using sequencing batch activated sludge, anaerobic-anoxic-aerobic, and anoxic-aerobic processes. ③ The removal rate of MPs in primary, secondary, and tertiary treatment process were 62.87%, 55.78%, and 58.45%, respectively. The combination process of "grid + sedimentation tank + primary sedimentation tank" had the highest removal rate towards MPs in primary treatment processes, and the membrane bioreactor had the highest one beyond other secondary treatment processes. Filtration was the best process in tertiary treatment. ④ The film, foam, and fragment MPs were easier to remove (>90%) than fiber and spherical (<90%) MPs by WWTPs. The MPs with particle size larger than 0.5 mm were easier to remove than those with particle size smaller than 0.5 mm. The removal efficiencies of polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), and polypropylene (PP) MPs were higher than 80%.

Key words: microplastics; Meta-analysis; wastewater treatment processes; occurrence characteristic; removal efficiency

微塑料广泛存在于水体[1,2]、土壤[3]、大气[4]和沉积物[5,6]等环境介质中,甚至在人体粪便[7]、肺部组织[8]和血液[9]中均检出微塑料颗粒,可能导致潜在的健康风险而备受关注. 目前,针对微塑料污染特征、输移过程、生态效应和复合污染等方面开展了广泛研究,污水处理厂(WWTPs)是微塑料的"汇",同时也是自然环境中微塑料重要的"源",是影响微塑料输移过程的重要环节[10~12]. 因此,充分了解微塑料在污水处理厂中的赋存特征及其去除状况,对于微塑料的污染管控至关重要.

国内外学者对单个污水处理厂开展大量研究,但不同区域的污水处理厂中微塑料赋存特征和去除率差异较大,如韩国某污水处理厂进水中微塑料丰度高达 3.14×10^{4} n·L^{-1}[13],中国珠江口的污水处理厂进水丰度仅为 1.56×10^{-2} n·L^{-1}[14]; 在 Ziajahromi 等[15]的研究中,澳大利亚的 3 个污水处理厂总去除率均超过 98%,而在 Do 等[16]的研究结果中,越南的 3 个污水处理厂分别为 25.5%、21.8% 和 25.3%. 因此,单一污水处理厂研究结果很难准确反映不同污水工艺对微塑料的去除效果. Meta 分析是基于文献资料定量化综合评价多个同

收稿日期: 2022-08-13; **修订日期**: 2022-09-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(41663016); 云南省教育厅科学研究基金项目(2022Y597)
作者简介: 符立松(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为微塑料环境行为,E-mail: fls1348623800@126.com
* 通信作者,E-mail: qbliang@swfu.edu.cn

类独立研究结果的统计学方法,广泛应用于生态环境领域,Liu 等[17]将风险比(risk ratio,RR)作为 Meta 分析的效应量,探讨了污水处理厂分级处理对微塑料的去除效果,并深入分析去除机制,但未开展污水处理厂中微塑料的总去除率和微塑料聚合物组成对去除效果的影响研究.

本研究采用单组率的 Meta 分析方法探讨污水处理厂对微塑料的去除效果,将微塑料去除率作为 Meta 分析的效应量,可更加直观地反映污水处理工艺、微塑料粒径、形状和聚合物类型等因素对微塑料去除效果的影响. 本文基于 57 篇文献中 78 个污水处理厂的微塑料赋存特征,借助 Meta 分析探究污水处理厂总体、分级处理和工艺单元对微塑料的去除效果,讨论了污水处理厂对形状、粒径和聚合物类型的去除效果. 本研究结果可为深入理解微塑料在污水处理厂中的迁移过程和截留机制奠定基础,以期为高效去除微塑料的污水处理工艺选择及微塑料管控提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据收集

基于中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)数据库,以"微塑料(microplastics,MPs)"、"污水处理厂(wastewater treatment plants,WWTP)"和"污水处理厂(sewage treatment plants, STP)"等为主题词检索公开发表文献,文献数据截至 2022 年 4 月 1 日,并对检索结果进行筛选. 文献保留需具备以下信息:①处理工艺名称和进出水微塑料丰度; ②微塑料聚合物类型、形状和粒径占比数据; ③污水处理厂基本信息(区位和日处理能力等). 基于以上原则并剔除重复研究,共获得 57 篇文献,其中 22 篇文献涉及我国污水处理厂.

1.2 数据分类

本文将污水和最终排泥(按干重计)中的微塑料丰度单位统一为:$n\cdot L^{-1}$和$n\cdot g^{-1}$,统计污水中检出频次超过 7 次的特定形状、颜色和聚合物类型的微塑料丰度; 污泥中统计检出频次 3 次及以上的. 现有文献对微塑料形状的命名和粒径范围的界定不统一,为便于统计分析,将线状和纤维状统称为纤维,片状、块状和碎片状统称为碎片,薄片和薄膜统称为薄膜,颗粒、微珠和球形统称为球状,泡沫和海绵状统称为泡沫; 将微塑料粒径范围统一为 4 个区间: <0.1、0.1 ~ 0.5、0.5 ~ 1 和 1 ~ 5 mm. 污水处理厂对微塑料的总去除率按工艺类型分组进行 Meta 分析,某工艺出现频次超过 3 篇文献的单列分组,而将小于 3 篇文献的工艺归于对应的工艺分组,具体如下:氧化沟(oxidation ditch,OD)、生物膜法(biofilm)、传统活性污泥法(conventional activated sludge,CAS)、序批式活性污泥法(sequencing batch reactor,SBR)、厌氧-缺氧-好氧工艺(anaerobic-anoxic-oxic,A^2O)和缺氧-好氧工艺(anoxic-oxic,AO); 分级去除率按一级处理、二级处理和三级处理进行分组; 各工艺单元(构筑物和构筑物组合)的去除率根据单个构筑物或构筑物组合进行分组.

1.3 Meta 分析

将污水处理厂对微塑料的去除率(R_i)指定为 Meta 分析的效应量,参照 Erni-Cassola 等[18]和 Lim 等[19]的计算方法,将进水的微塑料丰度作为总体样本数量(A_{in}),合并效应量(R)为单个污水处理厂去除率的加权平均值, 见式(1)和式(2). 经过"Shapiro-Wilk test"正态检验后,选择接近正态分布的样本估计方法即反正弦转换(PAS)进行 Meta 分析. 通过 I^2 统计量检验方法对效应量数据进行异质性检验[20],计算方法见式(3)和式(4). 除泡沫微塑料分组的去除率数据外,本研究所有分组的效应量数据的异质性检验结果均满足 $I^2\geqslant 50\%$,表明各研究结果间存在异质性,采用随机效应模型进行合并及亚组分析以进一步检测异质性来源[21].

$$R_i = (A_{in} - A_{out})/A_{in} \times 100\% \tag{1}$$

$$R = \sum_{i=1}^{n} W_i R_i \tag{2}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} W_i (R_i - \overline{R}_i)^2 \tag{3}$$

$$I^2 = [Q - (n-1)]/Q \tag{4}$$

式中, R_i 表示第 i 个污水处理厂对微塑料去除率,%,即效应量; A_{in}和 A_{out}分别表示第 i 个污水处理厂或工艺单元进水和出水的微塑料丰度,$n\cdot L^{-1}$; R 表示合并效应量; W_i 表示第 i 个污水处理厂的权重; Q 表示检验统计量; $\overline{R}_i$ 表示所有污水处理厂效应量的均值; n 表示效应量样本数.

1.4 数据处理

使用 GetData Graph Digitizer 2.25 提取文献中图的进、出水微塑料污染特征丰度和去除率数据,并用 Microsoft Excel 2019 软件建立数据库. 在 SPSS 25.0 中采用最小显著差异法(LSD)完成数据差异性分析($P<0.05$). Meta 分析基于 R 语言的 Meta 包完成,并运用 Origin 2020 软件绘图. 采用漏斗图和 Egger's 法对文献的发表偏倚性进行定性和定量分析[22],检验结果显示,漏斗图呈现对称且检验值 $P>0.05$,表明所收集的文献和数据不存在发表偏倚.

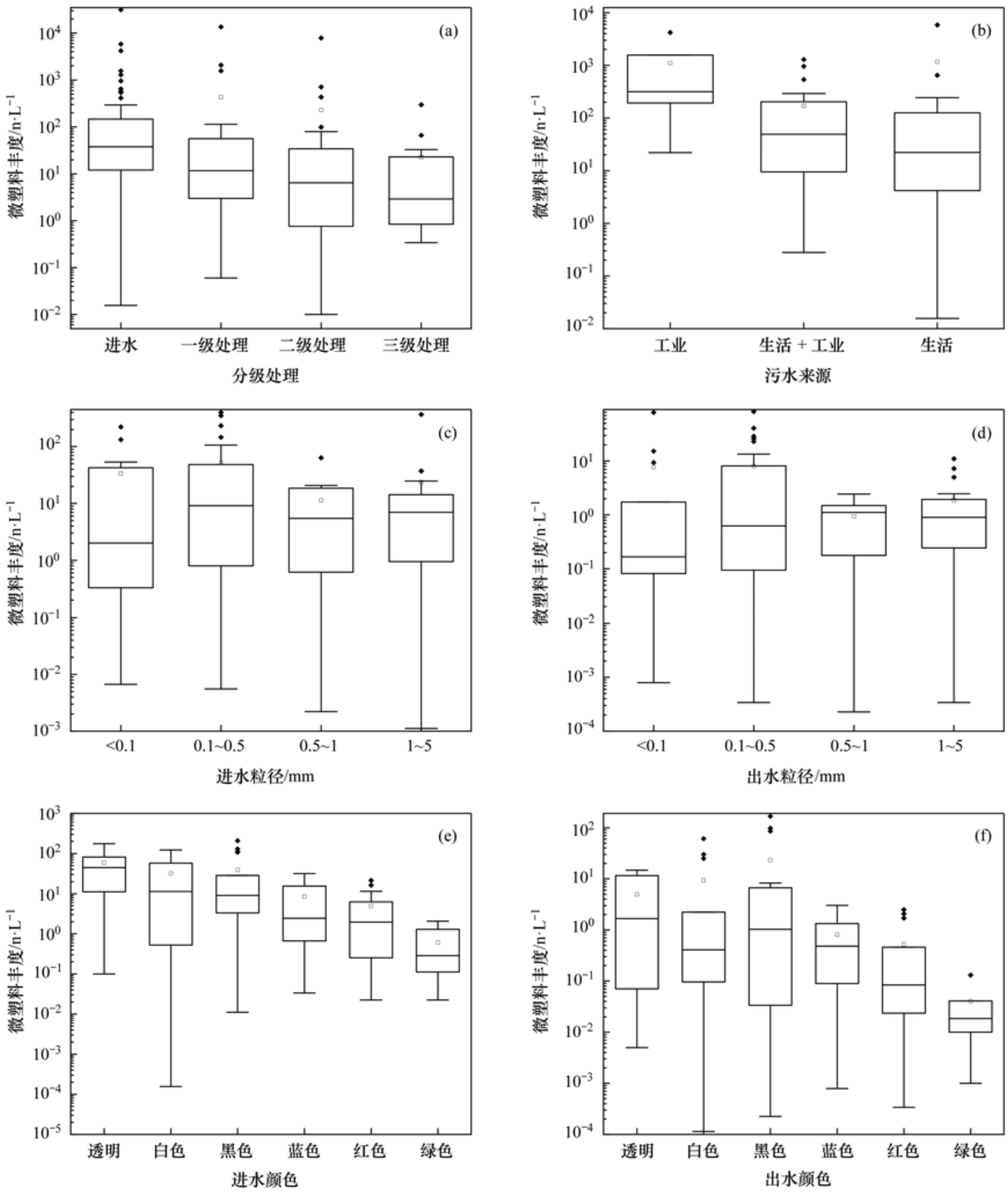
2　结果与分析

2.1　微塑料在污水处理厂的赋存特征

2.1.1　污水中微塑料的赋存特征

文献综述结果显示,国内外污水处理厂进水的微塑料丰度差异较大,在 $1.56 \times 10^{-2} \sim 3.14 \times 10^{4}$ $n \cdot L^{-1}$之间,均值为 636.30 $n \cdot L^{-1}$,中值为 37.59 $n \cdot L^{-1}$[图 1(a)].以生活污水为主要处理对象的污水处理厂,其进水微塑料丰度中值为 22.15 $n \cdot L^{-1}$,低于以工业废水为主要处理对象的污水处理厂进水丰度中值(317.50 $n \cdot L^{-1}$),生活污水和工业废水混合的进水丰度中值为 49.24 $n \cdot L^{-1}$,介于前两者之间[图 1(b)].从一级处理到三级处理,微塑料丰度逐渐降低[图 1(a)],污水处理厂最终出水微塑料丰度在 $1.70 \times 10^{-3} \sim 3.09 \times 10^{2}$ $n \cdot L^{-1}$之间,均值为 22.94 $n \cdot L^{-1}$,中值为 1.97 $n \cdot L^{-1}$;进水微塑料丰度均值为出水的 27.74 倍,表明污水处理厂具有较高的微塑料去除能力.

污水处理厂的进、出水中检出不同形状的微塑料丰度差异较大(表 1).其中,纤维、碎片、薄膜和



(a)进水和不同处理阶段出水中微塑料的丰度;(b)不同污水来源进水中的微塑料丰度;
(c)和(d)进、出水中不同粒径区间的丰度;(e)和(f)进、出水中微塑料不同颜色的丰度

图 1　污水处理厂进、出水中微塑料的赋存特征

Fig. 1　Occurrence characteristics of microplastics in the influent and effluent of wastewater treatment plants

球状是进水中赋存较多的微塑料形状，其占比最高值分别为 91.97%[23]、93.73%[24]、73%[25] 和 70.40%[13]，纤维和碎片的丰度均显著高于薄膜、球状和泡沫($P<0.05$).

表 1 污水处理厂中不同形状微塑料的丰度1)

Table 1 Abundance of microplastics with different shapes in wastewater treatment plants

形状	进水丰度/$n\cdot L^{-1}$	进水占比/%	出水丰度/$n\cdot L^{-1}$	出水占比/%	检出频次
纤维	3.36 ~ 4 600	6.27 ~ 91.90	2.28×10^{-4} ~ 107.66	5.60 ~ 100	62
碎片	0.11 ~ 3 400	3.62 ~ 93.70	1.36×10^{-3} ~ 101.01	0.67 ~ 80	54
薄膜	0.35 ~ 1 300	2 ~ 73	0.01 ~ 29.32	0.67 ~ 72.46	31
球状	0.03 ~ 22 100	0.43 ~ 70.40	2.23×10^{-4} ~ 277	1.16 ~ 93.20	25
泡沫	0.06 ~ 21.56	1 ~ 21.40	ND ~ 15.67	ND ~ 5.07	7

1) ND 表示未检出；进水丰度和出水丰度分别表示进、出水中某形状微塑料的丰度；进水占比和出水占比分别表示进、出水中某形状的占比；检出频次表示某形状在进水中检出的次数

污水处理厂进、出水中不同粒径微塑料丰度如图 1(c)和图 1(d)所示，0.1 ~ 0.5 mm 为赋存最多的微塑料粒径区间，其次为 <0.1 mm，进水的丰度均值分别为 52.15 $n\cdot L^{-1}$ 和 33.55 $n\cdot L^{-1}$，而出水的丰度均值则分别为 8.03 $n\cdot L^{-1}$ 和 7.73 $n\cdot L^{-1}$. 污水处理厂中检出各种颜色的微塑料丰度如图 1(e)和图 1(f)所示，在 WWTP 中检出的微塑料颜色主要有 6 种，进水中透明的丰度均值最高，为 59.61 $n\cdot L^{-1}$. 污水处理厂中赋存的微塑料聚合物类型众多，检出频次从高至低依次为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚酯(PES)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰胺(PA)、聚苯乙烯(PS)和聚氯乙烯(PVC)是污水处理厂进水中赋存最广泛的聚合物(表 2)，其最高占比分别为 57.10%[14]、35.91%[26]、89.66%[23]、83.33%[15]、71.43%[27]、37.5%[28] 和 52.5%[29].

表 2 污水处理厂主要检出的聚合物类型1)

Table 2 Mainly detected polymer types in wastewater treatment plants

聚合物名称	密度[30] /$g\cdot cm^{-3}$	进水丰度 /$n\cdot L^{-1}$	进水占比/%	出水丰度 /$n\cdot L^{-1}$	出水占比/%	检出频次
PE	0.89 ~ 0.98	0.09 ~ 541	4.08 ~ 57.10	1.25×10^{-3} ~ 59.95	3.19 ~ 73.30	28
PP	0.92	0.10 ~ 97.30	2.50 ~ 35.91	2.23×10^{-4} ~ 33.06	2.90 ~ 29.60	23
PET	0.96 ~ 1.45	0.02 ~ 123.64	1.82 ~ 83.30	4.47×10^{-4} ~ 98.88	4 ~ 88.54	17
PES	1.24 ~ 2.30	0.02 ~ 618.21	1.60 ~ 89.66	2.23×10^{-4} ~ 18.72	2.90 ~ 100	17
PA	1.02 ~ 1.16	0.05 ~ 43.37	2 ~ 71.43	0.01 ~ 35.84	1.23 ~ 40	15
PS	1.05	0.01 ~ 91.50	1.90 ~ 37.50	0.01 ~ 12.36	4 ~ 45.94	14
PVC	1.16 ~ 1.58	0.07 ~ 712.42	1.30 ~ 52.50	6.56 ~ 42.96	9.30 ~ 40	13

1) 进水丰度和出水丰度分别表示进、出水中单种聚合物的丰度；进水占比和出水占比分别表示进、出水中单种聚合物的占比；检出频次表示单种聚合物在进水中检出的次数

2.1.2 污泥中微塑料的赋存特征

污水处理厂最终排泥中的微塑料污染特征如图 2 所示. 丰度在 1.80×10^{-1} ~ 9.38×10^{3} $n\cdot g^{-1}$ 之间；CAS 工艺污泥中的微塑料丰度均值最高(1384.91 $n\cdot g^{-1}$)，是丰度最低的 SBR 工艺的 184.65 倍，其余工艺的污泥微塑料丰度数量级相当. 污泥中赋存最多的形状为纤维(219.01 $n\cdot g^{-1}$)，其次为球状(19.32 $n\cdot g^{-1}$)和碎片(13.69 $n\cdot g^{-1}$)；0.1 ~ 0.5 mm 在污泥中的丰度均值最高(20.45 $n\cdot g^{-1}$)，其次是 <0.1 mm(6.48 $n\cdot g^{-1}$)即粒径 <0.5 mm 的微塑料占主要地位. 污泥中检出的主要颜色则为透明(20.24 $n\cdot g^{-1}$)，其次是黑色(14.59 $n\cdot g^{-1}$). PET 在污泥中检出的丰度最高(7.23 $n\cdot g^{-1}$)，其次为 PA(5.17 $n\cdot g^{-1}$)和 PES(3.97 $n\cdot g^{-1}$)，最低为 PP(1.47 $n\cdot g^{-1}$). 根据污泥中微塑料丰度和排泥量的统计结果，得到污水处理厂通过污泥外排微塑料数量在 4.23×10^{7} ~ 1.51×10^{11} $n\cdot d^{-1}$ 之间.

2.2 不同工艺污水处理厂对微塑料的去除效果

不同工艺的污水处理厂总去除率 Meta 分析结果如图 3(a)所示，总去除率大小依次为：OD(93.40%) > biofilm(92.28%) > CAS(90.84%) > SBR(84.91%) > A^2O(81.41%) > AO(71.31%). 各级处理中工艺单元对微塑料去除率如图 3(b)所示，一级处理对微塑料的去除率最高(62.87%)，其次为三级处理(58.45%)和二级处理(55.78%).

在一级处理中，格栅、沉砂池和初沉池的工艺组合对微塑料的去除效果最好，去除率为 78.47%，其次为沉砂池与初沉池的工艺组合(65.65%)和沉砂池与格栅组合(45.30%)，单独使用沉砂池的去除率仅为 13.88%，初沉池对微塑料的去除率比沉砂池的高，为 43.82%. 在二级处理中，MBR 工艺

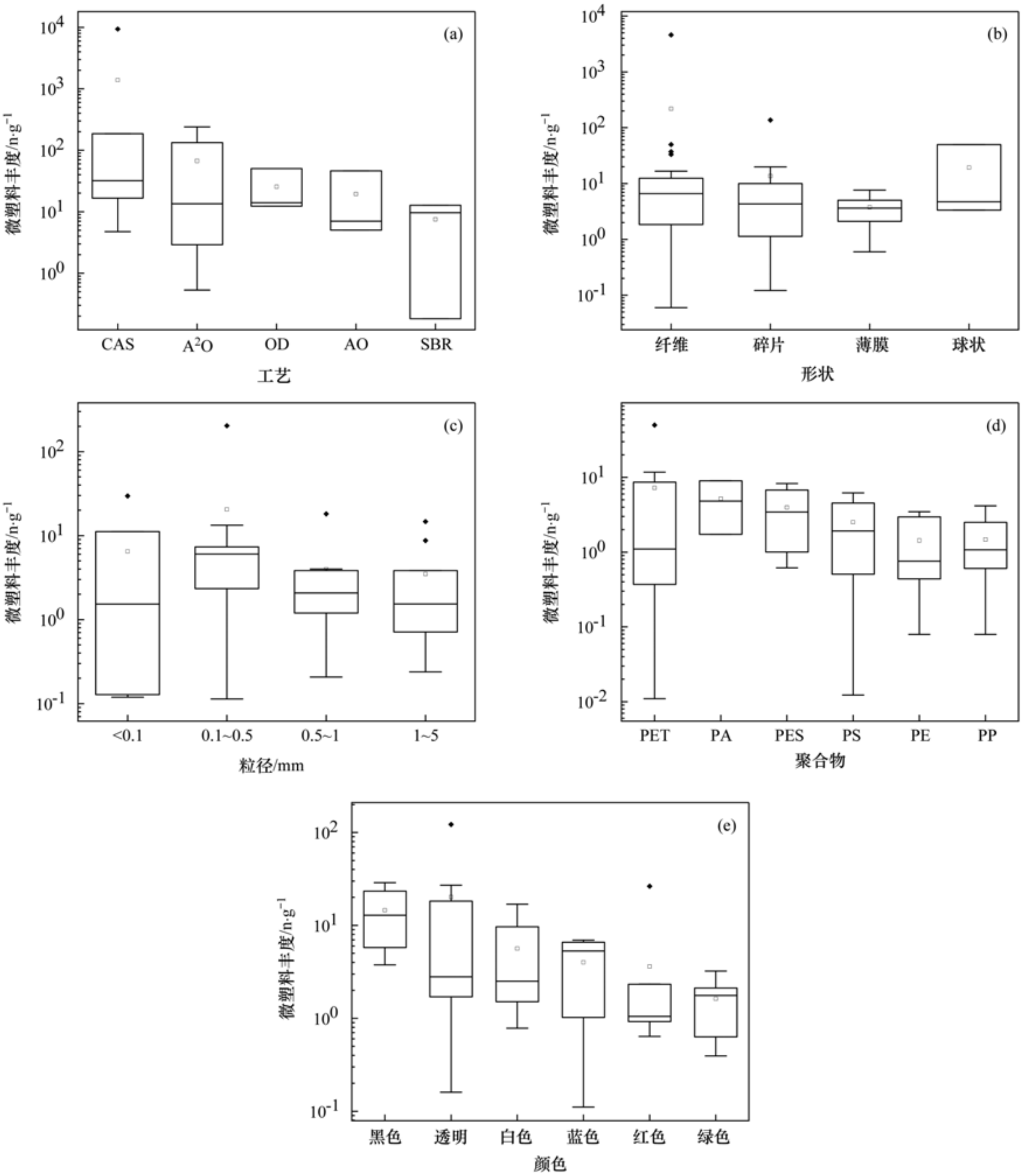


图 2　污泥中的微塑料赋存特征

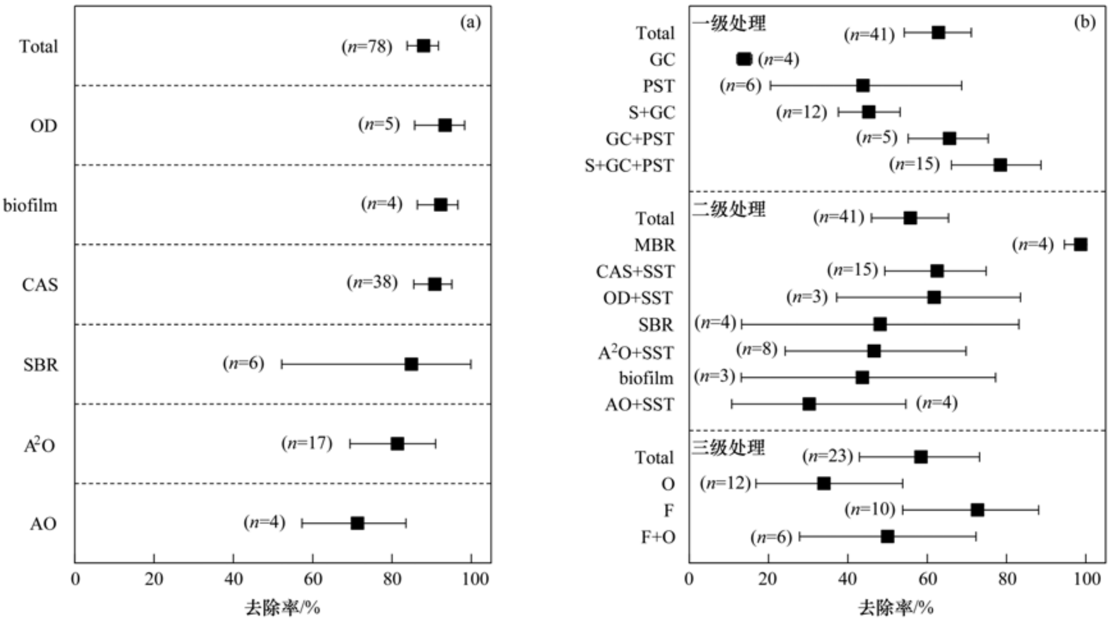
Fig. 2　Occurrence characteristics of microplastics in sludge

(membrane bioreactor)对微塑料的去除效果最优,去除效率高达 98.74%. CAS(62.52%)和 OD(61.77%)两个工艺单元去除率较为相近,其余工艺单元去除率分别为 SBR(48.14%)、A^2O(46.61%)、biofilm(43.68%)和 AO(30.27%). 在三级处理中,过滤技术(72.71%)对微塑料的去除率最高,深度氧化工艺的最低(33.99%),而两者组合的去除率居中(50.04%).

2.3　污水处理厂对不同形状、粒径和聚合物类型微塑料的去除效果

如图 4(a)所示,污水处理厂对不同形状的去除率均高于 80%,其中对薄膜微塑料的去除率最高(94.59%),其次是泡沫(91.18%)和碎片(90.89%),而纤维(88.36%)和球状(87.23%)的去除率相对较低. 在分级处理中,一级处理(60.91%)和二级处理(62.70%)对纤维的去除率稍高于三级处理(57.39%),二级处理对碎片的去除率最高(81.30%),其次为三级处理(71.66%),一级处理(60.67%)相对较低. 薄膜和球状随处理分级的增加去除率逐渐升高,三级处理去除率分别为 90.39% 和 78.47%.

污水处理厂对不同粒径的去除效果如图 4(b)所示,0.5 ~1 mm(90.63%)和 1 ~5 mm(89.87%)的总去除率最高,0.1 ~0.5 mm(83.84%)和 <0.1



(a)不同工艺污水处理厂对微塑料的总去除率,(b)分级处理和工艺单元对微塑料的去除率; Total 表示全组,GC 表示沉砂池,PST 表示初沉池,S 表示格栅,SST 表示二沉池,O 表示深度氧化,F 表示过滤技术, *n* 表示样本数

图 3 不同处理工艺去除微塑料的 Meta 分析结果

Fig. 3 Meta-analysis results of microplastic removal efficiencies by different treatment processes

mm(81.63%)的相对较低. 在分级处理中,一级处理和二级处理对 <0.1 mm 的去除率相当,三级处理最高(70.74%). 0.1 ~0.5 mm 的去除率随分级呈升高趋势,三级处理去除率为 85.56%. 一级处理和三级处理对 0.5 ~1 mm 的去除率相近,二级处理最低(52.05%). 1 ~5 mm 则与 0.1 ~0.5 mm 呈相反趋势,最高为一级处理(88%). 污水处理厂对不同聚合物的去除效果如图 4(c)所示,PE、PET、PP、PVC 和 PES 的总去除率均高于 79%,PA 和 PS 的相对较低,去除率分别为 62.27% 和 55.57%.

3 讨论

3.1 污水处理厂中微塑料的污染特征

不同污水处理厂的微塑料丰度差异受服务人口、采样季节、污水来源(生活或工业)、社会经济和生活方式等因素的影响. Zhang 等[31]分析结果显示,污水处理厂进水微塑料丰度与服务人口、服务面积和第三产业(游客数量)呈显著正相关($P < 0.01$). Yuan 等[32]发现污泥中的微塑料丰度与工业废水比例、服务人口数量和区域经济发展水平呈正比. 泰国某污水处理厂在旱季和雨季污水样品中检出的微塑料丰度范围分别为 76 ~192 $n\cdot L^{-1}$和 36 ~68 $n\cdot L^{-1}$,并且在雨季的最终出水中未检测到微塑料[33]. Long 等[34]分析了不同进水来源的微塑料丰度,结果表明工业废水中微塑料丰度(2.56 $n\cdot L^{-1}$)是生活污水(1.44 $n\cdot L^{-1}$)的 1.8 倍. 此外,样品采集、预处理和表征分析等方法也会影响污水处理厂进水微塑料丰度的统计. 尽管出水中微塑料丰度相对较低,但污水处理量大,出水中微塑料的排放总量仍然很高,排放到水体环境的微塑料在 8.48×10^{4} ~1.46×10^{11} $n\cdot d^{-1}$之间,均值(3.79×10^{9} $n\cdot d^{-1}$)约为 Liu 等[17]研究结果(7.2×10^{9} $n\cdot d^{-1}$)的 50%,为 Cheng 等[35]的(1.6×10^{9} $n\cdot d^{-1}$)两倍有余,而中值(2.72×10^{7} $n\cdot d^{-1}$)比 Sun 等[10]的研究结果(2×10^{6} $n\cdot d^{-1}$)高一个数量级. 因此,污水处理厂尾水的排放被认为是自然水体中微塑料的重要来源.

污水中的微塑料大部分被截留于污泥中,且与处理工艺的去除率有关[10,32,36]. 本文统计最终排泥中的微塑料丰度(1.80×10^{-1} ~9.38×10^{3} $n\cdot g^{-1}$)数值范围比 Cheng 等[35]估计的(9.70 ~ 186.70 $n\cdot g^{-1}$)更宽泛,不同污水处理厂对微塑料的去除效果差异较大. 纤维、碎片和球状为污泥中赋存较多的微塑料形状(见图 2),其中纤维和碎片易在沉降过程被截留至污泥中[37-39],而球状易被吸附至污泥中[40]. 粒径 <0.5 mm 的微塑料因其比表面积相对较大,易被污泥吸附并迁移至其中[37,40,41]. PET 在污泥中赋存最多,是因为密度较高的微塑料(见表 2)更容易从污水沉降至污泥中[40,42]. 尽管污水中大部分的微塑料被去除至污泥中,但污泥的资源化利用和不当处置仍会导致大量的微塑料以多种方式排放到环境中. 据报道,全球不同国家的污水处理厂每年有 1.0×10^{6} ~1.0×10^{14} $n\cdot a^{-1}$微塑料通过污泥排放到环境中[43]. 污泥中的微塑料可通过填埋、焚烧和农田回用等方式进入自然环境,其中,农田回用为主

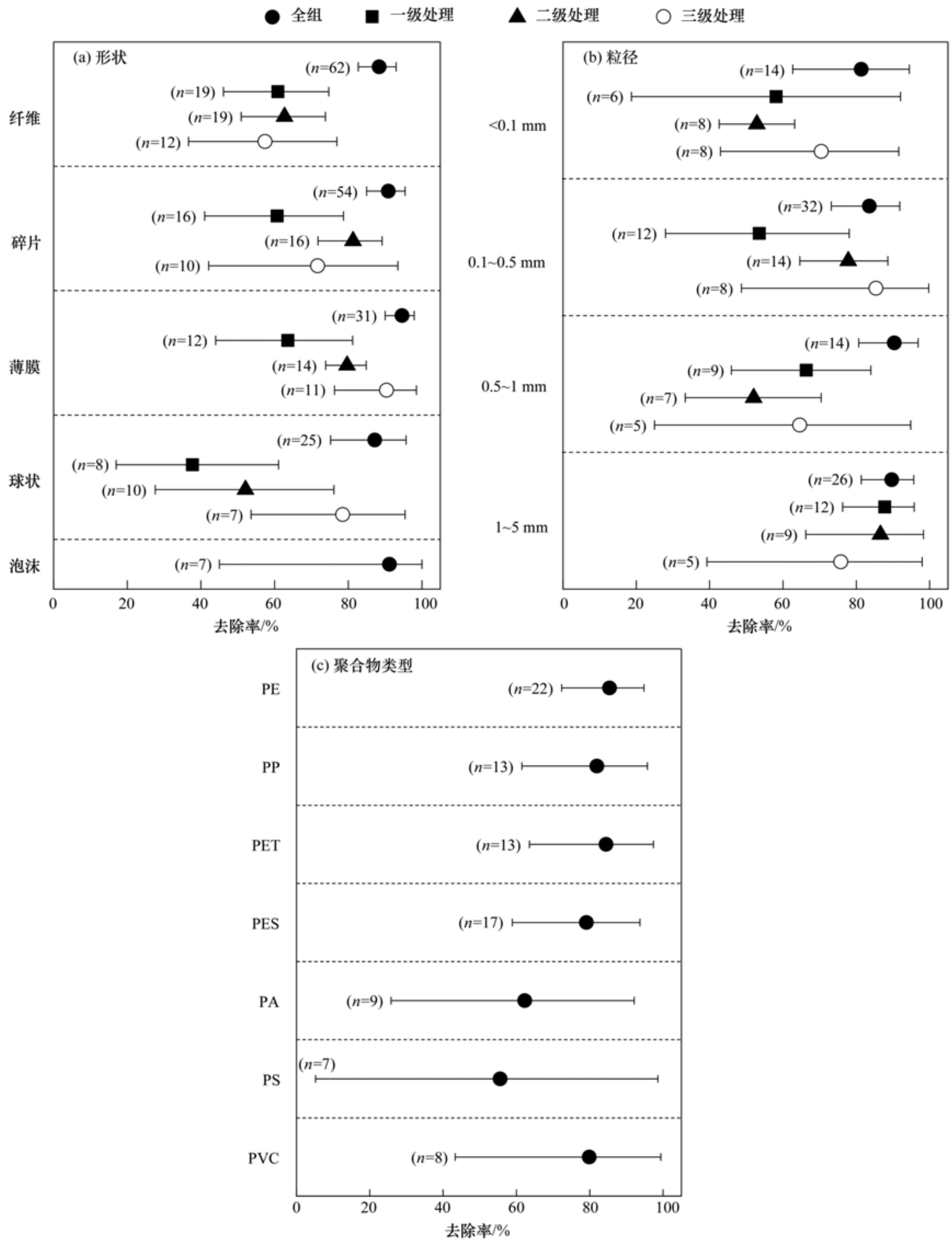


图 4　微塑料形状、粒径和聚合物类型对污水处理厂去除率影响的 Meta 分析结果

Fig. 4　Meta-analysis results of effects of microplastics shape, particle size, and polymer composition on their removal efficiencies by wastewater treatment plants

要利用方式. Koutnik 等[44]研究表明, 美国全国有 51% 的污泥用于农业回用, 22% 为填埋场填埋, 16% 污泥焚烧, 11% 为其他处置方式; 农业回用释放微塑料为 $7.85\times10^{14}\sim1.08\times10^{15}$ n·a^{-1}. 西班牙的马德里地区, 因污泥农用导致微塑料进入土壤环境的数量为 1.0×10^{13} n·a^{-1}[45]. 因此, 污泥的农业回用被认为是农田土壤微塑料的主要来源之一[46].

3.2　污水处理厂对微塑料的去除机制

一级处理中, 微塑料的去除机制主要通过格栅的截留、沉砂池和初沉池的沉降来实现. 格栅能够截留大尺寸的微塑料, 如细格栅的栅条间距为 2.5 ~10 mm, 可去除粒径 > 2.5 mm 的微塑料[47], 而很难截留小粒径的. 沉砂池对微塑料去除效果较差, 仅对高密度微塑料有一定去除效果, 原因可能是沉砂

池的水力停留时间(HRT)较短(约 4 min),且多为湍流,微塑料不易沉降去除[41]. 同时,曝气沉砂池中附着在泥沙上的微塑料可能会因曝气而脱落,反而增加水中微塑料的丰度[36],对旋流沉砂池而言,流体剪切力会导致微塑料进一步破碎,据 Lv 等[48]报道,在经旋流沉砂池处理后,污水中 0.25 ~ 0.5 mm 的微塑料增加了 27.27%,甚至新增了 <0.25 mm 的微塑料. 而初沉池的 HRT 较长(0.5 ~ 2 h),水流速度缓慢,粒径相对较大的微塑料易在初沉池中沉降[10,12,17,41]. 因此,初沉池对微塑料的去除率高于格栅和沉砂池. 同时,初沉池和格栅、沉砂池的任意组合均可提升微塑料的去除效果,特别是格栅、沉砂池和初沉池的工艺组合对微塑料的去除效果最好,与 Liu 等[17]的研究结果类似.

二级处理中,主要通过微塑料和微生物之间的相互作用(如生物膜)和二沉池的沉降作用来去除污水中的微塑料. MBR 工艺在二级处理中表现出了优异的微塑料去除性能,Lares 等[23]研究发现,MBR 工艺出水中的微塑料丰度($0.4\ n\cdot L^{-1}$)低于 CAS 工艺的最终出水($1.0\ n\cdot L^{-1}$),去除率为 99.40%. MBR 的滤膜孔径通常为 0.1 μm,可高效去除小粒径微塑料[36],Li 等[49]还发现大部分微塑料被截留于 MBR 系统的生物膜载体侧,表明生物膜的吸附效应可能是微塑料去除的原因之一,但 MBR 工艺同时也面临着维护成本高和膜污染易产生等问题. CAS 和 OD 工艺对微塑料的平均去除率分别为 62.52% 和 61.77%,其 HRT 通常约为 25 h 和 >16 h[50],有利于在生化池中形成大量的活性污泥,微生物分泌的胞外聚合物(EPS)会吸附微塑料形成大颗粒絮体,增加絮体的相对密度和沉降速度,易于微塑料在二沉池中沉降去除[36,51];另一方面,微塑料可作为微生物生长的载体,其表面形成生物膜,增强对微塑料的吸附而沉降至污泥中[35,36,51]. A^2O 工艺虽然与 CAS 和 OD 工艺的去除机制类似,但其 HRT(约 7 ~ 14 h)较短[17,36],不利于微塑料表面生物膜的形成,不能有效地去除微塑料,与 Liu 等[17]研究的结果一致. 此外,A^2O 工艺的污泥回流量较大,部分沉降至污泥的微塑料会回流至生化池中[48],从而导致去除率不高,如贾其隆等[52]研究结果显示,作为二级处理的 A^2O 工艺对微塑料的去除率仅为 12.92%. AO 工艺与 A^2O 工艺相近,HRT 较短,污泥回流量较大,Jiang 等[38]研究表明,AO 生化池仅可去除约 16.90% 的微塑料. 相对地,SBR 工艺无污泥回流系统,且 HRT 长于 A^2O 工艺,因此对微塑料的去除率相对较好. 较长的 HRT 和污泥龄(SRT)能够确保微塑料与污水、污泥之间的充分接触,从而促进微塑料在生化池的污泥絮体和 EPS 中聚集,并最终在污泥中沉降[32,53]. Yuan 等[32]分析得出,CAST 工艺对微塑料的去除率优于 A^2O 工艺的原因与 HRT 和 SRT 有关,CAST 反应池的设计 HRT 和 SRT 分别为 20 h 和 16 d,而 A^2O 的分别为 12 h 和 14 d.

三级处理中,微塑料的去除效果因工艺而异,尤其是过滤技术,取决于过滤介质的孔径和堵塞频率. 孔径较小的过滤技术可去除的微塑料粒径范围更广,特别是膜过滤技术,如拥有纳米级孔径的超滤(ultrafiltration, UF)和反渗透(reverse osmosis, RO)可去除粒径更小的微塑料. Pramanik 等[54]研究结果显示,超滤对粒径为 1.88 μm 的微塑料去除率高达 96%. Ziajahromi 等[55]研究表明,超滤和反渗透组合可完全去除 >0.19 mm的微塑料. 类似地,孔径为 10 μm 的盘式过滤(disc filter, DF)对微塑料去除率可达 79.40%[13],但在 Talvitie 等[56]的研究中,DF 的去除率仅为 40.0%,而使用孔径为 20 μm 的 DF,去除率却高达 98.50%. 可能是因为过滤孔径越小,微塑料堵塞滤膜的速率越快,从而导致反冲洗次数增多,造成去除率降低. 相比膜过滤技术,砂滤工艺在污水处理中更为常用,在 Hidayaturrahman 等[13]的研究中,砂石直径约为 0.80 ~ 1.20 mm 的快速砂滤(rapid sand filter, RSF)去除了 73.80% 的微塑料. Magni 等[25]报道称,RSF 可去除 50% 以上二级处理出水的微塑料. 而在 Talvitie 等[56]的研究中,由粒径分别为 3 ~ 5 mm 与 0.1 ~ 0.5 mm 的砾石和石英组成的 RSF 可高效去除微塑料,去除率高达 97%,但也会将微塑料破碎成更小的颗粒[57]. 其次,微塑料与滤料或滤膜之间存在架桥效应、静电吸附和自由扩散等作用,可提升去除率,Enfrin 等[58]研究表明,由于微塑料和滤膜表面之间存在静电作用,微塑料可被吸附至滤膜表面上. Xu 等[51]认为 RSF 滤料可通过与微塑料表面羟基的亲水作用吸附微塑料,也可能与 EPS 缠绕在一起形成聚集体,被滤料截留. 但随着时间的推移,滤膜孔隙易被微塑料堵塞而形成滤饼层,进而降低过滤性能. 作为三级处理的另一类工艺,深度氧化对微塑料的去除效果较差,与 Liu 等[17]的研究结果一致,原因是深度氧化过程可改变微塑料的物理和化学性质[17,36],Kelkar 等[59]研究表明氯化消毒可能会破坏高密度聚乙烯(HDPE)微塑料原有的化学键,并形成 C—C—C 不对称链、C—C—C 对称链、CH_2 扭曲和 CH_2 弯曲等新的化学结构. Lin 等[60]研究发现在紫外线照射下,微塑料的表面形态(裂纹、褶皱、隆起)、化学特征(化学键断裂)和疏水性(疏水性降低)可发生显著变化. 同样,臭氧处理也可引起微塑料在物理和化学性质上的变

化[61]. 因此,深度氧化过程可能会使部分微塑料进一步破碎开裂成次级微塑料,导致微塑料丰度增加和去除率降低. 但 Hidayaturrahman 等[13]报道,通过臭氧处理去除微塑料的效率(89.90%)高于盘式过滤(79.40%)和快速砂滤(73.80%). 因此,深度氧化对微塑料的去除效果尚未形成共识,其去除机制需要进一步深入研究.

3.3　微塑料形状、粒径和聚合物类型对去除效率的影响

不同形状微塑料的物理化学特性各异,是影响其去除效果的重要因子. 纤维多由 PET 和 PES 制成[42,62],密度相对较大,且其表面易形成生物膜或因其较为柔软容易变形,在一级处理和二级处理过程中更容易与絮体聚合并通过沉降去除[10,36,41,63]. Cai 等[64]研究发现,由于纤维表面相对光滑,横截面尺寸较小,容易纵向通过三级处理中过滤介质,粒径较小的纤维(<0.2 mm)甚至可穿透孔径为 1×10^{-7} mm 的反渗透处理系统,使得在三级处理出水中纤维的占比高于二级处理出水. 陈瑀等[27]研究结果显示,经过三级处理后,纤维占比由二级处理出水的69%提高到了100%. 碎片在二级处理中的去除效率(81.30%)高于一级处理和三级处理[图 4(a)],与 Liu 等[17]研究的结果一致,可能是因其层状结构的特点而易被活性污泥吸附沉降去除[17];其次,碎片通常具有棱角、扭曲、分叉、弯曲和粗糙的表面,使其易于被微生物定殖以增加相对密度,从而利于其从污水中去除[34]. Bilgin 等[41]推测,相比纤维、球状和薄膜,碎片的沉降速度更快. 球状微塑料主要去除机制包括:一方面由于其自身粒径小、比表面积大的特点,更有利于絮体的吸附和生物膜的形成而沉降至污泥[40,65],如 Liu 等[40]在污泥中检测到球状微塑料的比例(17.10%)比污水中的高(3.70%~5.80%),Yuan 等[32]的结果也显示,相对于曝气沉砂池,生化池中污泥的球状微塑料占比更高,表明生化池中活性污泥大量吸附球状微塑料而实现更好去除;另一方面,球状微塑料大多由 PE 和 PP 制成[53,66],密度较低而易浮于表水,可在一级处理中随浮渣被去除. 薄膜和泡沫状的微塑料密度相对较低,且表面积较大,易漂浮于水面而随浮渣被去除[37]. 在 Blair 等[67]的研究中,薄膜大部分在一级处理过程中被去除. 同时,Ali 等[36]认为粒径与污水悬浮固体(<20 μm)相似的薄膜和纤维易被 EPS 吸附而产生沉降. 但本文研究结果显示,三级处理对于薄膜和球状的去除效果更好,原因是过滤技术可有效截留一级处理和二级处理中未能去除的小粒径球状和薄膜.

粒径亦为影响微塑料去除的重要因素,污水处理厂总体对 0.5~1 mm 和 1~5 mm 的微塑料去除率均比 0.1~0.5 mm 和 <0.1 mm 的高. 较大粒径即 0.5~5 mm 可在一级处理中得到较好地去除,原因是其易被格栅截留或在沉砂池和初沉池通过重力沉降被去除[36,40],如 Dris 等[68]研究结果显示,在经过一级处理后 1~5 mm 的占比从 45% 下降到了 7%. 在 Liu 等[40]的研究中,污水处理厂进水中的微塑料平均粒径为 0.52 mm,在经一级处理后平均粒径减少至 0.24 mm. 而 <0.5 mm 的微塑料更容易在二级处理中被生物絮凝体吸附或生物膜覆盖,从而沉降至污泥中[35],Magni 等[25]研究结果显示,0.1~0.5 mm 的微塑料颗粒在回流污泥中占比最高(54%). <0.5 mm 的微塑料也可被三级处理中孔径较小的过滤技术截留. Mintenig 等[69]研究发现过滤技术对 <0.5 mm 的微塑料去除率高达 93%,在 Cai 等[64]的研究中,经过 RO 处理后,0.05~0.1 mm 的微塑料丰度由 2.40 $n\cdot L^{-1}$ 降至 0.06 $n\cdot L^{-1}$. 但如前所述,微塑料在污水处理厂的去除过程中,受机械力、流体剪切力和氧化等作用影响,微塑料易被破碎成更小粒径的微塑料[51],从而造成小粒径微塑料丰度的增加,去除率降低. 因此,可以认为污水处理厂总体对 0.5~5 mm 的微塑料去除效果比 <0.5 mm 的好,与 Liu 等[17]的研究结果一致.

聚合物类型对去除率的影响主要是密度差异(见表 2),据 Long 等[34]报道,微塑料去除率随聚合物密度的升高而增加;高密度聚合物可通过重力沉降在沉砂池和初沉池中被去除,如 PET 和 PES 因其高密度的性质而具有较高的去除率,最高达 97.70% 和 97.79%[42];低密度聚合物(如 PE 和 PP)自身易漂浮于表水[70]或者与中等密度(如 PA 和 PS)被气浮工艺产生的气泡带到表水[65],随浮渣被去除. 因此,若沉砂池、初沉池和气浮工艺相结合,可以实现微塑料高效去除. 此外,具有特定表面电荷的聚合物易被污水处理厂去除,如带正电荷的 PE 和 PS 对带负电荷的活性污泥具有高亲和力[71].

4　展望

(1)作为一种新污染物,水体中微塑料的样品采集、预处理和表征分析等方法仍缺乏统一标准,对于形状、粒径的分类和描述也未达成共识,导致不同研究结果存在差异,进而影响 Meta 分析结果及结论,同时还阻碍了基于赋存特征的微塑料污染风险评价等研究的开展和微塑料污染管控标准的制定.

(2)今后可重点针对氧化沟、生物膜和活性污

泥等工艺开展研究,研发高效去除微塑料的生活污水处理工艺组合及运行参数.

(3)污水处理厂三级处理中的紫外和臭氧消毒,可能导致污水中微塑料的氧化和破碎,产生粒径更小的微、纳塑料,随出水排放而进入环境,增加污染风险.因此,需针对污水深度处理工艺中微、纳塑料的产生机制及影响因素开展研究,明晰其形成的关键过程和因子,为控制出水中微、纳塑料提供科学依据.

(4)微塑料形状、粒径和聚合物类型等因素对污水处理工艺性能和微塑料去除率的影响研究还很少,具体的影响机制仍不明晰,有待深入研究.

5 结论

(1)污水处理厂进水和出水的微塑料丰度分别在 $1.56\times10^{-2}\sim3.14\times10^{4}$ $n\cdot L^{-1}$ 和 $1.70\times10^{-3}\sim3.09\times10^{2}$ $n\cdot L^{-1}$ 之间,进水中微塑料形状以纤维和碎片为主,颜色主要以透明为主,粒径以 <0.5 mm 为主,PE 和 PP 是主要的检出聚合物类型.最终排泥的微塑料丰度在 $1.8\times10^{-1}\sim9.38\times10^{3}$ $n\cdot g^{-1}$ 之间,纤维的丰度均值最大,<0.5 mm 为主要赋存粒径,PET 在污泥中检出的丰度均值最高,颜色以透明和黑色为主.

(2)以 OD、CAS 和 biofilm 为核心工艺的污水处理厂对微塑料的去除效果较好,总去除率均超过 90%,其次为 SBR 和 A^2O 工艺,最差为 AO 工艺(71.31%).一级处理(62.87%)对微塑料的去除效果优于二级处理(55.78%)和三级处理(58.45%),"格栅+沉砂池+初沉池"是一级处理中去除率最高的工艺组合(78.47%),而沉砂池的去除效果最差(13.88%),MBR 工艺为二级处理最佳工艺单元(98.74%),过滤技术在三级处理中去除率最高(72.71%).

(3)污水处理厂可有效去除薄膜、泡沫和碎片,粒径 >0.5 mm 的微塑料,对 PE、PET 和 PP 的去除率在 80% 以上.纤维易被一级处理和二级处理去除,而碎片在二级处理中去除率较高,三级处理则是对薄膜和球状的去除效果较好.一级处理易去除 >0.5 mm的微塑料,而三级处理对 <0.5 mm 的微塑料去除效果最佳.

参考文献:

[1] Zhang Q J, Liu T, Liu L, *et al*. Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake [J]. Science of the Total Environment, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745.

[2] 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.

[3] Li J, Song Y, Cai Y B. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks [J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113570.

[4] Klein M, Fischer E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the metropolitan area of Hamburg, Germany [J]. Science of the Total Environment, 2019, **685**: 96-103.

[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] Eo S, Hong S H, Song Y K, *et al*. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea[J]. Water Research, 2019, **160**: 228-237.

[7] Zhang J J, Wang L, Trasande L, *et al*. Occurrence of polyethylene terephthalate and polycarbonate microplastics in infant and adult feces[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2021, **8**(11): 989-994.

[8] Jenner L C, Rotchell J M, Bennett R T, *et al*. Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy [J]. Science of the Total Environment, 2022, **831**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907.

[9] Leslie H A, Van Velzen M J M, Brandsma S H, *et al*. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. Environment International, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.

[10] Sun J, Dai X H, Wang Q L, *et al*. Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal[J]. Water Research, 2019, **152**: 21-37.

[11] Bayo J, Olmos S, López-Castellanos J. Microplastics in an urban wastewater treatment plant: the influence of physicochemical parameters and environmental factors[J]. Chemosphere, 2020, **238**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124593.

[12] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, *et al*. How well is microlitter purified from wastewater? A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2017, **109**: 164-172.

[13] Hidayaturrahman H, Lee T G. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **146**: 696-702.

[14] 赵肖, 何蕾, 赵文静, 等. 珠江口典型生活污水处理厂微塑料处理与排放研究[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(3): 359-363, 393.
Zhao X, He L, Zhao W J, *et al*. Study on microplastics treatment and discharge of typical sewage treatment plants in Pearl River Estuary [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, **43**(3): 359-363, 393.

[15] Ziajahromi S, Neale P A, Silveira I T, *et al*. An audit of microplastic abundance throughout three Australian wastewater treatment plants[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128294.

[16] Do M V, Le T X T, Vu N D, *et al*. Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants [J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, **26**, doi: 10.1016/j.eti.2022.102286.

[17] Liu W Y, Zhang J L, Liu H, *et al*. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: characteristics and mechanisms[J]. Environment International, 2021, **146**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106277.

[18] Erni-Cassola G, Zadjelovic V, Gibson M I, *et al*. Distribution of plastic polymer types in the marine environment; a meta-analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **369**: 691-698.

[19] Lim K P, Lim P E, Yusoff S, *et al*. A meta-analysis of the characterisations of plastic ingested by fish globally[J]. Toxics, 2022, **10**(4), doi: 10.3390/toxics10040186.

[20] 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 等. 基于 Meta 分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1678-1687.
Zhao Z X, Wang X Y, Tian Y J, *et al*. Effects of straw returning on soil ammonia volatilization under different production conditions based on meta-analysis[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1678-1687.

[21] 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 等. 不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 37-45.
Ruan F F, Liu J X, Chen Z W, *et al*. Meta-analysis of the impact of different ozone metrics on total mortality in China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 37-45.

[22] Egger M, Smith G D, Schneider M, *et al*. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test[J]. BMJ, 1997, **315**(7109): 629-634.

[23] Lares M, Ncibi M C, Sillanpää M, *et al*. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology[J]. Water Research, 2018, **133**: 236-246.

[24] Galafassi S, Di Cesare A, Di Nardo L, *et al*. Microplastic retention in small and medium municipal wastewater treatment plants and the role of the disinfection[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(7): 10535-10546.

[25] Magni S, Binelli A, Pittura L, *et al*. The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant[J]. Science of the Total Environment, 2019, **652**: 602-610.

[26] Raju S, Carbery M, Kuttykattil A, *et al*. Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant[J]. Water Research, 2020, **173**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115549.

[27] 陈瑀, 张宴, 苏良湖, 等. 南京城市污水处理厂中微塑料的赋存特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3835-3841.
Chen Y, Zhang Y, Su L H, *et al*. Occurrence characteristics of microplastics in Nanjing urban wastewater treatment plant[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3835-3841.

[28] Kazour M, Terki S, Rabhi K, *et al*. Sources of microplastics pollution in the marine environment: importance of wastewater treatment plant and coastal landfill[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **146**: 608-618.

[29] Franco A A, Arellano J M, Albendín G, *et al*. Microplastic pollution in wastewater treatment plants in the city of Cádiz: abundance, removal efficiency and presence in receiving water body[J]. Science of the Total Environment, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145795.

[30] Ren P J, Dou M, Wang C, *et al*. Abundance and removal characteristics of microplastics at a wastewater treatment plant in Zhengzhou[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(29): 36295-36305.

[31] Zhang L S, Liu J Y, Xie Y S, *et al*. Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125968.

[32] Yuan F, Zhao H, Sun H B, *et al*. Investigation of microplastics in sludge from five wastewater treatment plants in Nanjing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113793.

[33] Kittipongvises S, Phetrak A, Hongprasith N, *et al*. Unravelling capability of municipal wastewater treatment plant in Thailand for microplastics: effects of seasonality on detection, fate and transport[J]. Journal of Environmental Management, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113990.

[34] Long Z X, Pan Z, Wang W L, *et al*. Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China[J]. Water Research, 2019, **155**: 255-265.

[35] Cheng Y L, Kim J G, Kim H B, *et al*. Occurrence and removal of microplastics in wastewater treatment plants and drinking water purification facilities: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, **410**, doi: 10.1016/j.cej.2020.128381.

[36] Ali I, Ding T D, Peng C S, *et al*. Micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: occurrence, removal, fate, impacts and remediation technologies - a critical review[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, **423**, doi: 10.1016/j.cej.2021.130205.

[37] Vardar S, Onay T T, Demirel B, *et al*. Evaluation of microplastics removal efficiency at a wastewater treatment plant discharging to the Sea of Marmara[J]. Environmental Pollution, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117862.

[38] Jiang J H, Wang X W, Ren H Y, *et al*. Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **746**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141378.

[39] Salmi P, Ryymin K, Karjalainen A K, *et al*. Particle balance and return loops for microplastics in a tertiary-level wastewater treatment plant[J]. Water Science & Technology, 2021, **84**(1): 89-100.

[40] Liu X N, Yuan W K, Di M X, *et al*. Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **362**: 176-182.

[41] Bilgin M, Yurtsever M, Karadagli F. Microplastic removal by aerated grit chambers versus settling tanks of a municipal wastewater treatment plant[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, **38**, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101604.

[42] Xu X, Zhang L, Jian Y, *et al*. Influence of wastewater treatment process on pollution characteristics and fate of microplastics[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, **169**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112448.

[43] Hatinoğlu M D, Sanin F D. Sewage sludge as a source of microplastics in the environment: a review of occurrence and fate during sludge treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113028.

[44] Koutnik V S, Alkidim S, Leonard J, *et al*. Unaccounted microplastics in wastewater sludge: where do they go? [J]. ACS ES&T Water, 2021, **1**(5): 1086-1097.

[45] Edo C, González-Pleiter M, Leganés F, *et al*. Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge[J]. Environmental Pollution, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113837.

[46] Rolsky C, Kelkar V, Driver E, *et al*. Municipal sewage sludge as a source of microplastics in the environment[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2020, **14**: 16-22.

[47] Zhang X L, Chen J X, Li J. The removal of microplastics in the wastewater treatment process and their potential impact on anaerobic digestion due to pollutants association [J]. Chemosphere, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126360.

[48] Lv X M, Dong Q, Zuo Z Q, *et al*. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **225**: 579-586.

[49] Li L, Liu D, Song K, *et al*. Performance evaluation of MBR in treating microplastics polyvinylchloride contaminated polluted surface water[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110724.

[50] Wu M J, Tang W C, Wu S H, *et al*. Fate and effects of microplastics in wastewater treatment processes[J]. Science of the Total Environment, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143902.

[51] Xu Z J, Bai X, Ye Z F. Removal and generation of microplastics in wastewater treatment plants: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125982.

[52] 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 等. 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4105-4112.
Jia Q L, Chen H, Zhao X, *et al*. Removal of microplastics by different treatment processes in Shanghai large municipal wastewater treatment plants[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4105-4112.

[53] Yuan F, Zhao H, Sun H B, *et al*. Abundance, morphology, and removal efficiency of microplastics in two wastewater treatment plants in Nanjing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(8): 9327-9337.

[54] Pramanik B K, Pramanik S K, Monira S. Understanding the fragmentation of microplastics into nano-plastics and removal of nano/microplastics from wastewater using membrane, air flotation and nano-ferrofluid processes [J]. Chemosphere, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131053.

[55] Ziajahromi S, Neale P A, Rintoul L, *et al*. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics [J]. Water Research, 2017, **112**: 93-99.

[56] Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, *et al*. Solutions to microplastic pollution - removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. Water Research, 2017, **123**: 401-407.

[57] Prata J C. Microplastics in wastewater: state of the knowledge on sources, fate and solutions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **129**(1): 262-265.

[58] Enfrin M, Lee J, Le-Clech P, *et al*. Kinetic and mechanistic aspects of ultrafiltration membrane fouling by nano- and microplastics[J]. Journal of Membrane Science, 2020, **601**, doi: 10.1016/j.memsci.2020.117890.

[59] Kelkar V P, Rolsky C B, Pant A, *et al*. Chemical and physical changes of microplastics during sterilization by chlorination[J]. Water Research, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114871.

[60] Lin J L, Yan D Y, Fu J W, *et al*. Ultraviolet-C and vacuum ultraviolet inducing surface degradation of microplastics [J]. Water Research, 2020, **186**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116360.

[61] Hou L Y, Kumar D, Yoo C G, *et al*. Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, **406**, doi: 10.1016/j.cej.2020.126715.

[62] Yang L B, Li K X, Cui S, *et al*. Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant [J]. Water Research, 2019, **155**: 175-181.

[63] Ruan Y F, Zhang K, Wu C X, *et al*. A preliminary screening of HBCD enantiomers transported by microplastics in wastewater treatment plants[J]. Science of the Total Environment, 2019, **674**: 171-178.

[64] Cai Y, Wu J, Lu J, *et al*. Fate of microplastics in a coastal wastewater treatment plant: microfibers could partially break through the integrated membrane system [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2022, **16**(7), doi: 10.1007/s11783-021-1517-0.

[65] Ngo P L, Pramanik B K, Shah K, *et al*. Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants[J]. Environmental Pollution, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113326.

[66] Tang N, Liu X N, Xing W. Microplastics in wastewater treatment plants of Wuhan, central China: abundance, removal, and potential source in household wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141026.

[67] Blair R M, Waldron S, Gauchotte-Lindsay C. Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period[J]. Water Research, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114909.

[68] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al*. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris [J]. Environmental Chemistry, 2015, **12**(5): 592-599.

[69] Mintenig S M, Int-Veen I, Löder M G J, *et al*. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. Water Research, 2017, **108**: 365-372.

[70] Petroody S S A, Hashemi S H, Van Gestel C A M. Factors affecting microplastic retention and emission by a wastewater treatment plant on the southern coast of Caspian Sea [J]. Chemosphere, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128179.

[71] Bhattacharya P, Lin S J, Turner J P, *et al*. Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, **114**(39): 16556-16561.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 6

Jun. 15, 2023

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals ······ ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, *et al.* (3017)

Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China ······ YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)

Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory ······ QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, *et al.* (3034)

Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City ······ CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, *et al.* (3043)

Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin ······ XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3054)

Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ During the Heating Period in Baoding ······ LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, *et al.* (3063)

Transport Influence and Potential Sources of $PM_{2.5}$ Pollution for Nanjing ······ XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, *et al.* (3071)

Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 ······ WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island ······ FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, *et al.* (3089)

Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models ······ LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, *et al.* (3098)

Health Benefit Evaluation for $PM_{2.5}$ as Well as $O_{3\text{-}8h}$ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 ······ ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, *et al.* (3108)

Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 ······ LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, *et al.* (3117)

Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province ······ WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, *et al.* (3130)

Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an ······ ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, *et al.* (3142)

Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City ······ LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, *et al.* (3152)

Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin ······ JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin ······ XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, *et al.* (3174)

Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River ······ LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, *et al.* (3184)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing ······ JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, *et al.* (3198)

Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes ······ GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, *et al.* (3206)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River ······ WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, *et al.* (3217)

Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City ······ LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, *et al.* (3228)

Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin ······ YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, *et al.* (3237)

Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir ······ CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, *et al.* (3247)

Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light ······ XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, *et al.* (3260)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar ······ CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, *et al.* (3270)

Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(Ⅱ) and Ni(Ⅱ) in Aquatic Environment ······ ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, *et al.* (3278)

Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar ······ HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, *et al.* (3288)

Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant ······ ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, *et al.* (3301)

Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis ······ FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, *et al.* (3309)

Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China ······ HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, *et al.* (3321)

Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China ······ JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, *et al.* (3329)

Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models ······ DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, *et al.* (3343)

Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye ······ SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, *et al.* (3353)

Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin ······ LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, *et al.* (3364)

Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of *Larix principis-rupprechtii* Forest in Luya Mountain ······ MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, *et al.* (3376)

Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau ······ ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, *et al.* (3386)

Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields ······ YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, *et al.* (3396)

Effects of Different Planting Years of *Dendrocalamus brandisii* on Soil Fungal Community ······ ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, *et al.* (3408)

Effects of Biochar Amendment on N_2O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas ······ CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, *et al.* (3418)

Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland ······ JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, *et al.* (3426)

Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield ······ MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, *et al.* (3439)

Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model ··· CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, *et al.* (3450)

Characterization and Health Risk of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province ······ HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, *et al.* (3463)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou ······ LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, *et al.* (3475)

Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China ······ GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, *et al.* (3488)

Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method ······ ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, *et al.* (3500)

Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics ······ WANG Mei-hua (3509)

Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area ······ LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, *et al.* (3520)

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone ······ LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, *et al.* (3531)

Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City ······ AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, *et al.* (3544)

Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City ······ TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, *et al.* (3562)

Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland ······ WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (3573)

Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials ······ WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, *et al.* (3585)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables ······ QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, *et al.* (3600)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province ······ WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-rui, *et al.* (3609)

Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning ······ NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (3619)