Eco-Environmental Knowledge Web

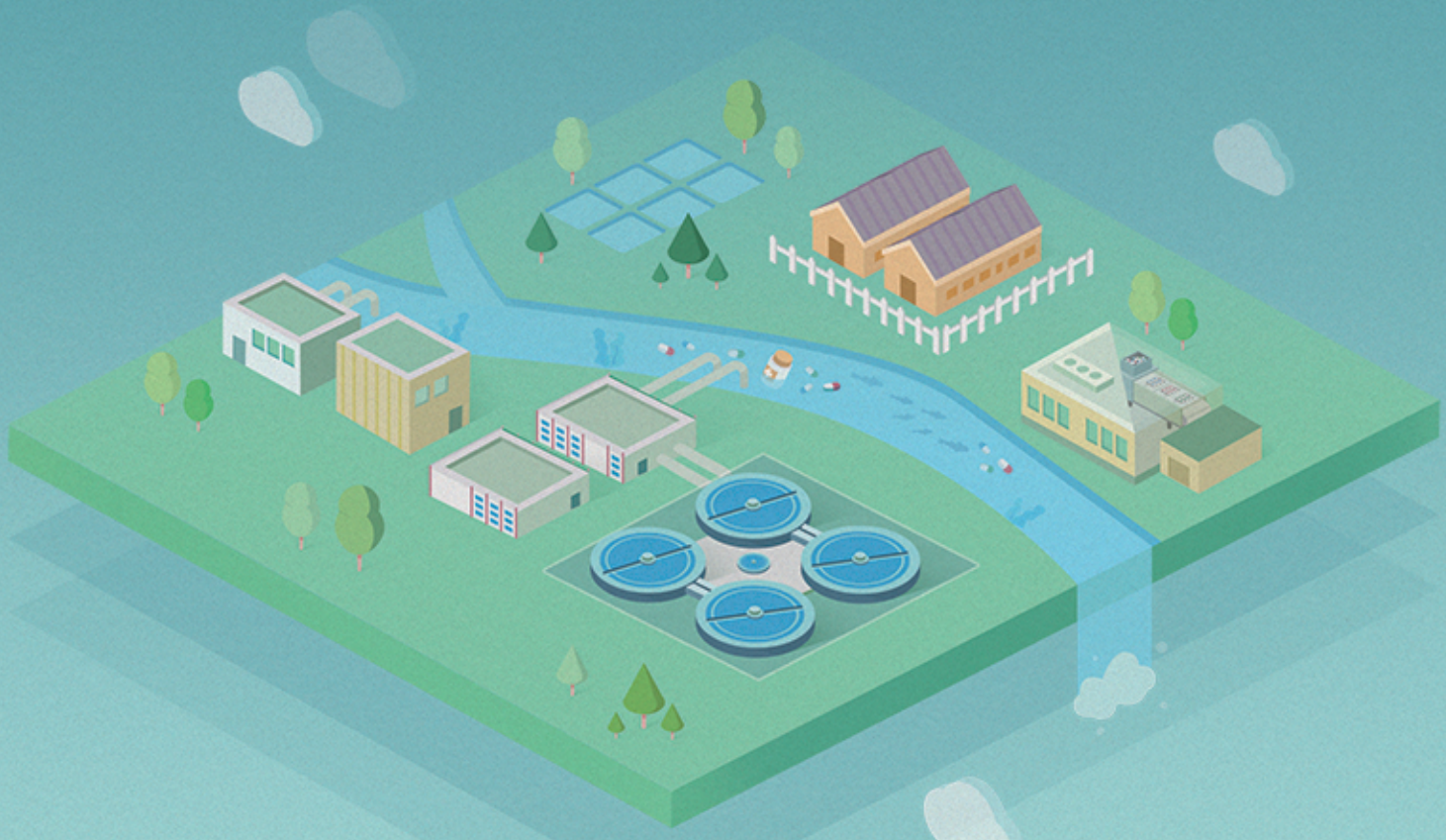
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2022年6月
第43卷 第6期
Vol.43 No.6

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 6 期
2022 年 6 月 15 日

目　次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度影响 …… 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇(2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 …… 黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹(2840)
COVID-19 管控期间苏州市 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度变化及来源解析 …… 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强(2851)
2015～2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 …… 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜娴, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉(2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 $PM_{2.5}$ 来源 …… 彭超, 李振亮, 曹云擎, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬(2867)
保定市冬季 $PM_{2.5}$ 的氧化潜势特征及其影响来源分析 …… 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟(2878)
南京江北新区 $PM_{2.5}$ 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 …… 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜(2888)
广西十万大山背景点 $PM_{2.5}$ 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 …… 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜娴, 章炎麟(2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素:以京津冀地区为例 …… 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋,程苗苗(2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 …… 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹(2917)
天津市 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染特征及气象影响分析 …… 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟赟, 徐虹, 戢运峰, 邓小文(2928)
2016～2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 …… 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华(2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 …… 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹(2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 …… 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 …… 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华(2966)
运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王妘涛, 马俊杰, 刘新罡(2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 …… 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕(2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 …… 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌(2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 …… 张坤锋, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王恩瑞, 孙兴滨, 王山军(3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 …… 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞蒙, 李鹏飞(3016)
高原湖泊周边浅层地下水:氮素时空分布及驱动因素 …… 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹(3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 …… 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇(3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 …… 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰(3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 …… 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞(3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 …… 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻(3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 …… 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健(3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 …… 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲(3088)
2015～2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 …… 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明(3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 …… 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松(3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 …… 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越(3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 …… 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华(3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 …… 顾晶晶, 冶运涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉(3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 …… 陈旭东, 高良敏(3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 …… 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹(3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 …… 吴香香, 艾萍, 李大鹏(3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 …… 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献(3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 …… 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉(3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 …… 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 …… 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭(3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 …… 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永(3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 …… 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军(3221)
2000～2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 …… 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利(3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 …… 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡(3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 …… 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红(3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 …… 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕(3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 …… 张倩, 韩贵琳(3269)
南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析 …… 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京(3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 …… 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华(3288)
石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 …… 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红(3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 …… 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒(3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 …… 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平(3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 …… 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰(3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 …… 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰(3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 …… 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰(3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 …… 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉(3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 …… 梁建设, 白永平, 杨雪荻, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩(3365)
《环境科学》征订启事(3004)　《环境科学》征稿简则(3047)　信息(3252, 3298, 3327)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第6期 2022年6月
Vol.43, No.6 Jun., 2022

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响

吴香香[1], 艾萍[2], 李大鹏[1]*

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州市昆山环境科学研究所, 苏州 215300)

摘要: 以太湖为研究对象,针对老化聚苯乙烯微塑料(PSMPs),探讨了水力扰动强度对 PSMPs 在泥水两相间的迁移过程,并通过 FTIR 和 SEM-EDS 等微观表征手段对 PSMPs 的形貌和元素等进行表征. 结果发现,扰动条件下(55 r·min^{-1}和 120 r·min^{-1}),上覆水中悬浮物(SS)和 PSMPs 均高于对照实验. 这是缘于无扰动条件下,PSMPs 受浮力影响,团聚在水面. 在低强度(55 r·min^{-1})扰动下,上覆水中 SS 和 PSMPs 分别为(264.67 ± 16.01) mg·L^{-1}和(239.67 ± 6.51) n·mL^{-1},而高强度(120 r·min^{-1})扰动下,上覆水中 SS 和 PSMPs 分别为(264.67 ± 16.01) mg·L^{-1}和(239.67 ± 6.51) n·mL^{-1}. 在底泥中,PSMPs 分别为(491.00 ± 23.46) mg·L^{-1}和 2.00 n·mL^{-1}. 且根据 SEM-EDS 分析,PSMPs 表面具有底泥元素(Si 等),这表明高强度下更易于促使 PSMPs 被悬浮物吸附. 底泥中 PSMPs 的丰度也证实,扰动强度越大,越容易促进 PSMPs 向底泥迁移.

关键词: 太湖; 聚苯乙烯微塑料(PSMPs); 扰动强度; 迁移; DLVO 理论

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)06-3168-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202109225

Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water

WU Xiang-xiang[1], AI Ping[2], LI Da-peng[1]*

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Kunshan Bureau of Ecology and Environment, Suzhou 215300, China)

Abstract: Taking Taihu Lake as the research object, for the aged polystyrene microplastics (PSMPs), the influence of hydraulic disturbance intensity on the migration process of PSMPs between mud and water phases was discussed, and the morphology and elements of PSMPs were analyzed using microscopic characterization methods including FTIR and SEM-EDS, as was done for characterization. The results showed that under disturbance conditions (55 r·min^{-1} and 120 r·min^{-1}), the suspended solids (SS) and PSMPs in the overlying water were higher than those in the control experiment. This was due to the fact that the PSMPs were affected by buoyancy and reunited on the water surface under undisturbed conditions. Under low-intensity (55 r·min^{-1}) disturbances, SS and PSMPs in the overlying water were (264.67 ± 16.01) mg·L^{-1} and (239.67 ± 6.51) n·mL^{-1}, respectively, and (120 r·min^{-1}) under high intensity. Under disturbance, the SS and PSMPs in the overlying water were (264.67 ± 16.01) mg·L^{-1} and (239.67 ± 6.51) n·mL^{-1}, respectively. In the bottom mud, PSMPs were (491.00 ± 23.46) mg·L^{-1} and 2.00 n·mL^{-1}, respectively. Additionally, according to the SEM-EDS analysis, the surface of PSMPs had sediment elements (Si, etc.), which showed that it was easier to promote the adsorption of PSMPs by suspended solids under high strength. The abundance of PSMPs in the sediments also confirmed that the greater the intensity of the disturbance, the easier it was to promote the migration of PSMPs to the sediments.

Key words: Taihu Lake; polystyrene microplastics (PSMPs); disturbance intensity; migration; DLVO theory

近几年,我国淡水中微塑料(粒径小于 5 mm)的污染调查工作也陆陆续续展开,在三峡大坝[1]、太湖流域[2]、长江流域[3]、洞庭湖[4]、武汉城市水体[5]、广州城市水体[6]、珠江支流及上海城市河道[7]和洪湖[8]等地区检测到微塑料,表明微塑料污染在我国淡水系统中也很常见.

因为水环境中的微塑料容易被水生生物摄食,容易对水生生态系统产生威胁[9,10],使得水环境中微塑料在泥水两相间的迁移转化备受关注. 由于体积小和比表面积大等特点,微塑料容易吸附污染物,并随着风浪扰动,将污染物携带至水网中,危害水体. 因此,了解微塑料在水体中的迁移具有重要意义. 目前很多研究突出了微塑料在不同环境条件下的团聚过程,研究了微塑料粒径、不同离子和 pH 等因素对微塑料团聚的影响[11,12],针对微塑料在水体中的迁移相关研究较少.

微塑料在自然光的作用下,产生老化现象[13],经研究老化微塑料对污染物具有更强的吸附作用[14],对环境危害性更强,因此本研究主要针对老化 PSMPs. 风浪扰动使得水体底泥再悬浮,导致上覆水中悬浮物浓度增大,扰动强度越高,则水体悬浮物浓度越大. 然而,当水体中悬浮物浓度增加,是否会有利于对微塑料的吸附,强化水体中微塑料向底泥的迁移,也尚未见报道. 因此,本研究以太湖为例,探讨了不同底泥扰动强度下,微塑料在泥水两相间的

收稿日期: 2021-09-26; **修订日期**: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778393); 江苏省研究生创新计划项目(KYCX19_2031)

作者简介: 吴香香(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境中微塑料迁移规律,E-mail:wxxsinoma@163.com

* 通信作者,E-mail:ustsldp@163.com

迁移规律,以期为水体微塑料防治策略提供数据支持和理论支撑.

1　材料与方法

1.1　实验材料

本实验所用 PSMPs (polystyrene microplastics, PSMPs),购于赛默飞世尔科技(中国)有限公司. 本实验所用底泥、上覆水和沉积物均采自太湖梅梁湾附近(N31°30′23″,E120°12′34″). 使用直立式采水器采集上覆水于 50 L 容器中; 同一样点,使用重力柱状采泥器采集沉积物,避光存储于 50 L 容器中. 采集结束后,立即运往实验室,在 4℃下保存待用.

1.2　实验装置设计

本实验所用装置为底部直径为 200 mm,高为 1 200 mm 的有机玻璃反应器,如图所示,底部泥厚约 170 mm,将底泥均匀铺好后,采用虹吸的方法向其中加入上覆水,水深大约为 80 cm. 上部装有搅拌机,通过控制搅拌机的转速,改变水体在水柱中的流动状态. 本实验装置见图 1.

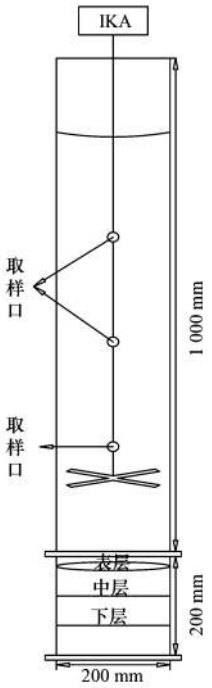


图 1　上覆水-沉积物环境模拟实验装置

Fig. 1　Overlying water-sediment environment simulation test device diagram

1.3　上覆水与沉积物理化指标的测定

底泥含水率的测定采用烘干法. 所用水样 COD 的测定采用重铬酸钾法. pH 值采用 C220-CN 型便携式酸度计测定,LOI 采用灼烧法,TP 采用分光光度法. 其基本参数见表 1.

1.4　PSMPs 标记

尼罗红(NR)是一种疏水、变色和光化学稳定的染料,常用于微塑料研究[15]. 2010 年 Shim 等[16]首先提出了利用尼罗红鉴别环境样品中的微塑料. 与其他染料相比,NR 对微塑料标记具有吸附性高、荧光强度高、培养时间短和亲和力好等优点,是微塑料检测中最有前景的着色剂[17,18]. 在本实验中,通过标记,可快速测定 PSMPs 丰度,并且可防止水体中原有的微塑料对本实验的结果产生影响. 将 10 mg 尼罗红粉末溶解在 100 mL 甲醇中,配置成浓度为 100 μg·L^{-1}尼罗红染液,将纯水和二甲亚砜溶液 DMSO 等比例混合,配置成 DMSO 溶液. 取 70 mL 的上述 DMSO 溶液于 5 只 250 mL 锥形瓶中,并向其中投加 0.1 g 的 PSMPs 材料. 将锥形瓶置于五联磁力搅拌器上加热反应,在 25、50 和 75℃时,同时加入 2 mL 尼罗红溶液,染色时间分别为 10、20 和 30 min. 反应后,将 5 只锥形瓶置于恒温振荡器中,以 25℃、100 r·min^{-1}的条件充分反应 24 ~ 72 h,以增强聚苯乙烯的荧光强度[19]. 从振荡器中取出 5 只锥形瓶,利用真空抽滤法提取溶液中 PSMPs,超声清洗 15 min,冲洗完全后,在 60℃烘箱中烘 2 ~ 3 h,去除水分,备用.

表 1　上覆水、底泥基本参数

Table 1　Basic parameters of overlying water and sediment

底泥		上覆水	
平均含水率/%	54.65	pH	7.63
LOI/%	5.74	DO/mg·L^{-1}	4.58
TP/mg·L^{-1}	0.432	微塑料丰度/n·mL^{-1}	3.4 ~ 25.8
微塑料丰度/n·kg^{-1}	11 ~ 234.6		

1.5　PSMPs 分离

1.5.1　上覆水中 PSMPs 分离

取 2 mL 的水样,利用真空抽滤系统,使用直径为 1.6 μm 玻璃纤维滤膜,将 PSMPs 截留在滤膜上. 截留在滤膜上的物质用 30% H_2O_2 冲洗到锥形瓶中,封口膜密封,置于 65℃、100 r·min^{-1}恒温振荡器中反应 72 h,以完全消解有机物质. 将样品从振荡器中取出,再次利用真空抽滤系统进行抽滤,将滤膜放入 60 mm 的培养皿中,室温下干燥,备用[20]. 干燥完全的样品置于荧光显微镜下,计算得出水中微塑料的丰度[21].

1.5.2　沉积物中 PSMPs 分离

利用环境样品中微塑料与杂质的密度差进行分离,采用密度分离法提取沉积物中的微塑料. 取一定量的沉积物样品在恒温 70℃的烘箱中干燥,备用. 本实验选择氯化钠(NaCl)作为密度浮选液. 取 100 g 干燥好的沉积物放入预先冲洗过的玻璃烧杯中,加入 400 mL 氯化钠(NaCl)溶液(1.2 g·mL^{-1})[22]. 装有样品的烧杯在室温下搅拌 2 min,静置 30 min,

再搅拌 2 min,室温静置 12 h,取上清液,真空泵过滤(1.0 μm 滤膜)[23]. 将滤膜放入 60 mm 培养皿中,在室温下干燥 72 h,每个样品的提取过程重复 3 次.

1.6 PSMPs 老化方法

取一定量新制的聚苯乙烯颗粒于石英玻璃培养皿中,在培养皿中加入体积分数为 10% 的过氧化氢溶液(H_2O_2),过氧化氢溶液具有氧化作用,能产生羟基自由基,从而降解有机物中 C—C 和 C—H[24,25],加速 PSMPs 表面的氧化,在其表面形成含氧官能团,增强表面的氧化程度,再用石英玻璃盖盖上[26,27]. 将培养皿暴露于 300 W 的 UVA340 紫外灯下,培养 96 h[28]. 老化后的样品用去离子水洗涤,并于 60℃的烘箱中烘干. UVA340 是模拟自然界紫外线的最佳选择;模拟临界短波长范围阳光光谱,波长范围为 315 ~400 nm 的光谱,可以模拟夏天正中午日光照射后的情况[29]. 利用 SEM-EDS、光学显微镜和 FTIR 对新制和老化的 PSMPs 进行微观表征分析.

1.7 扰动强度实验

实验所用装置为底部直径为 200 mm,高为 1 200 mm的有机玻璃反应器,底部沉积物厚约 170 mm,将底泥均匀铺好后,采用虹吸的方法向其中加入上覆水,水深大约为 0.8 m. 上部配备有搅拌机,实验装置如图 1 所示.

共设有 3 个实验组(A、B 和 C 组),其 PSMPs 投加量均为 2.5 g,水温均为 10℃左右,电动机转速分别为 0、55 和 120 $r\cdot min^{-1}$. 探求扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响. 每 2 d 扰动 1 次,均在 09:00 ~11:00 扰动,扰动后(下一次扰动前),静置 2 d 测定上覆水中 PSMPs 丰度,实验结束后,测定底泥中 PSMPs 丰度.

1.8 相互作用能计算(DLVO 理论)

范德华引力和静电斥力之和形成了经典的 DLVO 理论,是研究带电胶粒和悬浮粒子稳定性的经典理论[30]. Wu 等[31]的研究利用经典 DLVO 理论解释了聚苯乙烯纳米塑料在天然土壤中的迁移,表明聚苯乙烯纳米塑料迁移主要受土壤矿物和 pH 值的影响. Delforce 等[32]的研究利用经典 DLVO 理论解释了 TiO_2 纳米颗粒在不同溶剂中的稳定性. 本实验中,DLVO 理论用于评估 PSMPs 之间,PSMPs 与 SS 之间的相互作用能. 假设 PSMPs 与 SS 均为球形颗粒,PSMPs 之间的 HAMAKER 常数为 9.27×10^{-18},PSMPs 与 SS 之间的 HAMAKER 常数为 3.16×10^{-18}.

2 结果与讨论

2.1 SS 变化规律

太湖实时监测发现[33],当实地风速为 12 $m\cdot s^{-1}$ 时,水体中悬浮物浓度可增至 507 $mg\cdot L^{-1}$,而当风速减小到 8 $m\cdot s^{-1}$ 时,悬浮颗粒物浓度达到 258 $mg\cdot L^{-1}$,太湖地区每年出现风速大于 8 $m\cdot s^{-1}$ 且保持 1 h 以上的天数多达 125 d. 本实验模拟的太湖风速分别为 12 $m\cdot s^{-1}$ 和 8 $m\cdot s^{-1}$. 扰动时,B 组和 C 组的 SS 浓度分别为(269.00 ± 20.07) $mg\cdot L^{-1}$ 和(491.00 ± 23.46) $mg\cdot L^{-1}$. 扰动前,A、B 和 C 组浊度值分别为(1.86 ± 0.12)、(28.57 ± 5.57)和(98.63 ± 29.45) NTU.

2.2 上覆水和底泥中 PSMPs 丰度变化规律

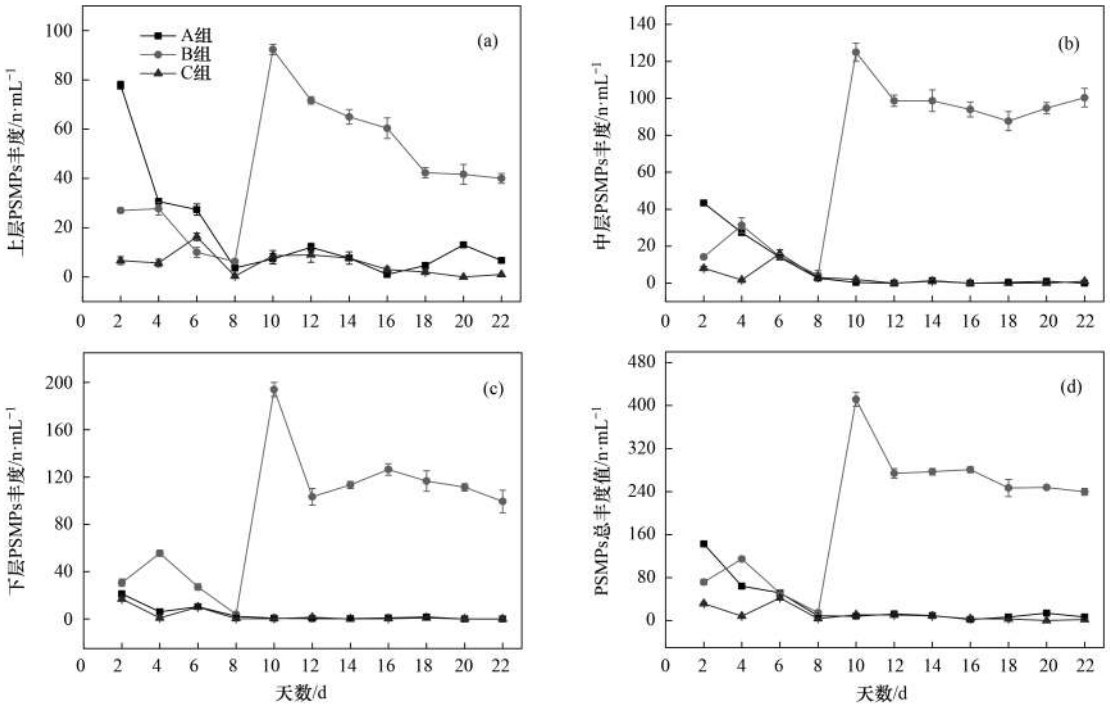
为了了解 PSMPs 在水体的迁移情况,在反应柱上部设置 3 个取样口,在扰动 2 d 后分别依次测定丰度. 结果如图 2 所示.

由图 2 可知,前 10 d 内,PSMPs 的丰度变化较大,可能是由于密度比水小的 PSMPs(ρ = 1.05 $g\cdot cm^{-3}$)漂浮在水面上,通过短暂的扰动作用并不能使其均匀地分散在水体中,且根据 DLVO 理论,PSMPs 之间主要表现为引力,因此 PSMPs 在水面易形成团聚体,悬浮在水面上. 因此,PSMPs 的丰度比后期的丰度小,不具有参考价值. A、B 和 C 组分别模拟了水面风速为 0、8 和 12 $m\cdot s^{-1}$ 的情况,探求了扰动强度(风速)对 PSMPs 丰度的影响. 在实验开始时,向上覆水中投加 2.5 g PSMPs,测定表面水中的丰度为(310 ± 12.04) $n\cdot mL^{-1}$,以此作为对比参照. 反应结束后,A、B 和 C 组的 PSMPs 总丰度分别为(6.67 ± 0.58)、(239.67 ± 6.51)和(31.67 ± 2.08) $n\cdot mL^{-1}$. 由于 A 组没有扰动作用,大量的 PSMPs 团聚在表面,因此使得上覆水水柱中 PSMPs 丰度偏低. 表明随着扰动强度的增加,上覆水中 PSMPs 丰度越来越低. B 组上覆水中上层,中层和下层的丰度分别为(40.00 ± 2.00),(100.33 ± 5.03)和(99.33 ± 9.50) $n\cdot mL^{-1}$. C 组上覆水中上层和中层丰度为(1.00 ± 0.00) $n\cdot mL^{-1}$ 和(1.00 ± 0.00) $n\cdot mL^{-1}$,而底层没有发现 PSMPs 颗粒的存在,可见随着时间的推移,表层 PSMPs 向下迁移,主要分布在水柱中层. C 组上覆水中丰度极低,可能是由于 PSMPs 沉积在底泥表层中.

2.3 沉积物 PSMPs 丰度变化规律

由于上覆水中 PSMPs 的不断变化,在反应结束后,将底泥分层(3 层)处理(图 1),提取底泥中的 PSMPs 分析,结果如图 3 所示,表示底泥中总体丰度值与底泥不同层丰度值.

A、B 和 C 组中底泥中 PSMPs 总丰度分别为(52.00 ± 13.05)、(140.00 ± 11.00)和(208.67 ± 7.09) $n\cdot kg^{-1}$. A 组水体呈静止状态,水柱中的悬浮物随着时间的推移逐渐迁移到底泥中,使得上覆水中浊度低,因此 PSMPs 难以与水体中其他物质团



(a)扰动后上层丰度值,(b)扰动后中层丰度值,(c)扰动后下层丰度值,(d)扰动后上覆水中总丰度值

图 2　上覆水中 PSMPs 丰度

Fig. 2　Abundance of PSMPs in the overlying water

聚,在垂直方向上向下迁移,使得底泥中丰度较低. 由图 3 可知,上覆水中,PSMPs 丰度 C 组比 B 组低,而底泥中 C 组比 B 组丰度低,由此可知,C 组有更多的 PSMPs 沉积到底泥中. A 组上层和下层 PSMPs 丰度分别为(51.33 ± 3.21) n·kg^{-1}和(0.33 ± 0.58) n·kg^{-1}. B 组上层和中层丰度分别为(119.67 ± 9.50) n·kg^{-1}和(20.00 ± 2.00) n·kg^{-1}. 在下层中,A 组和 B 组均没有发现 PSMPs 存在,C 组 3 层 PSMPs 丰度分别为(168.33 ± 2.89)、(40.33 ± 4.50)和(0.33 ± 0.58) n·kg^{-1}(数值较小,图 3 中不明显). 在 22 d 内,A、B 和 C 组上覆水中 PSMPs 主要沉积在底泥表层,且 C 组 > B 组 > A 组,随着底泥的加深,PSMPs 越来越少. C 组表层发现了较多的 PSMPs,与上覆水中(图 3)发现较少的 PSMPs 一致,说明 C 组上覆水中的 PSMPs 沉积在底泥中. 且在 C 组下层发现少量的 PSMPs 的存在. 表明随着扰动加强,PSMPs 更容易迁移到底泥中,随着时间的推移,在底泥中进一步向下迁移.

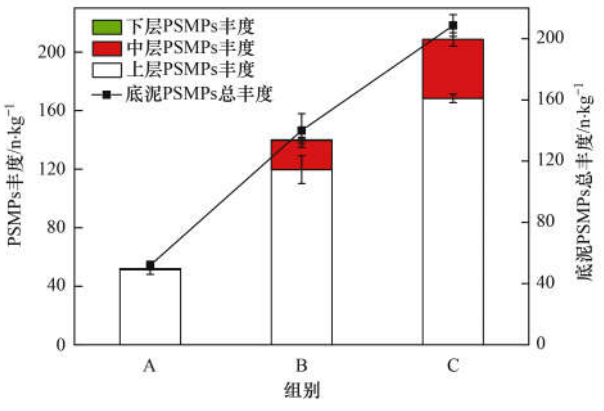


图 3　底泥中 PSMPs 丰度

Fig. 3　Abundance of PSMPs in sediments

2.4　新制与老化 PSMPs 特征变化

2.4.1　PSMPs 标记特征与粒径特征

经过尼罗红染料染色,染色效果如图 4 所示. 可明显观察到染色后,PSMPs 在荧光条件下显示出明显的橙红色. Lv 等[34]的研究使用尼罗红检测和量化微塑料,结果表明,该方法能够实现对微塑料的高通量检测和自动定量. 通过此方法可快速定量上覆水中和底泥中的 PSMPs 丰度.

通过马尔文激光粒度仪可测得粒径分布,图 5 分别为底泥、新制 PSMPs 和老化 PSMPs 的粒径分布. 新制 PSMPs 的中值粒径为 128.7 μm,最大粒径为 709.7 μm,最小粒径为 2.6 μm. 底泥中值粒径为 21.5μm,最大粒径为1 040.8 μm,最小粒径为 0.3

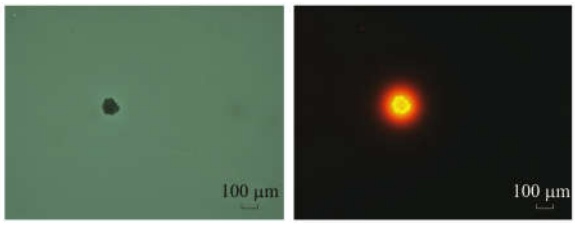


图 4　PSMPs 标记效果

Fig. 4　PSMPs marking effect

μm. 老化 PSMPs 的中值粒径为 86.9 μm,最大粒径为 309.5 μm,最小粒径为 1.5 μm. 老化使得 PSMPs 的粒径减小. 根据测得的粒径,可进一步推算 DLVO 理论结果[35]. Song 等[36]的研究表明,在相同条件下,粒径小的 MPs 在水体中更容易团聚,因此老化 PSMPs 比新制 PSMPs 在上覆水表面容易团聚,不易下沉.

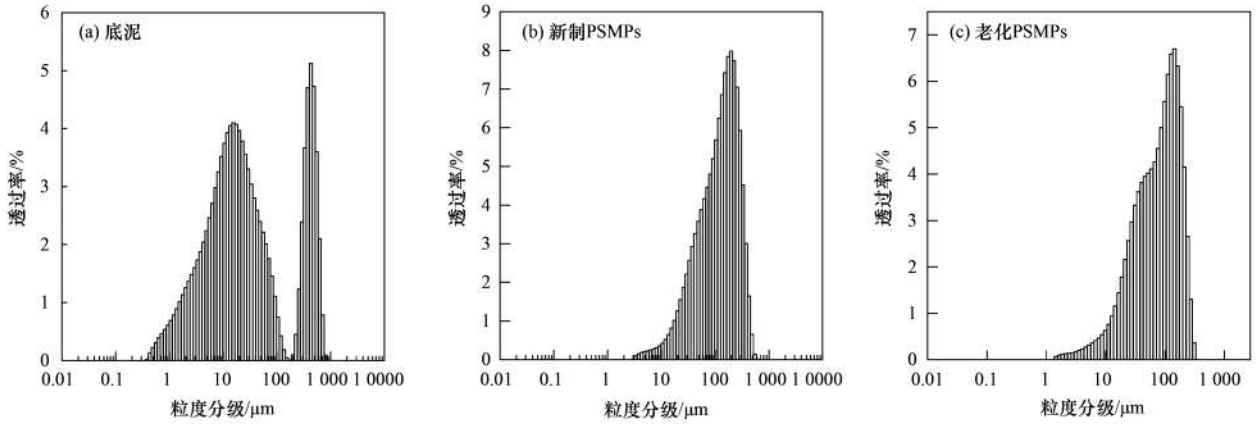


图 5 粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution

2.4.2 新制与老化 PSMPs 表面官能团特征变化

利用傅里叶红外光谱仪对 PSMPs 进行红外分析,结果如图 6 所示. 本实验中 PSMPs 的红外吸收峰位于 700、755、1 450、1 490、1 600、2 920 和 3 020 cm^{-1},在2 922 cm^{-1}处苯环的 C—H 伸缩振动以及1 492 cm^{-1}处的苯环骨架的振动,确定了有苯环的存在,证实了所采用的材料为 PS 颗粒. 羰基的吸收峰位于1 815 ~ 1 685 cm^{-1}. 本研究羰基波段位于1 750 cm^{-1},不随老化而降解的波段位于2 850 cm^{-1}处. 在1 743 cm^{-1}处的羰基(C═O)的伸缩振动以及在3 429 cm^{-1}处的羟基(O—H)的伸缩振动,表明含氧官能团增加. Liu 等[37]的研究对 PS 进行不同时长老化处理后,羟基和羰基的吸收峰增加. 基于自然环境的复杂性,老化 PSMPs 表面可能在各类环境因子,如温度、湿度和氧气条件等综合作用下会形成复杂的官能团结构. 光氧化过程是引起此变化的重要原因,PSMPs 经紫外线照射后产生初始自由基作为主要的光化学产物,并导致 C—C 和 C—H 键从聚合物的主链进一步解离[38],为微塑料表面发生脆化及同氧化剂反应产生含氧官能团提供了条件.

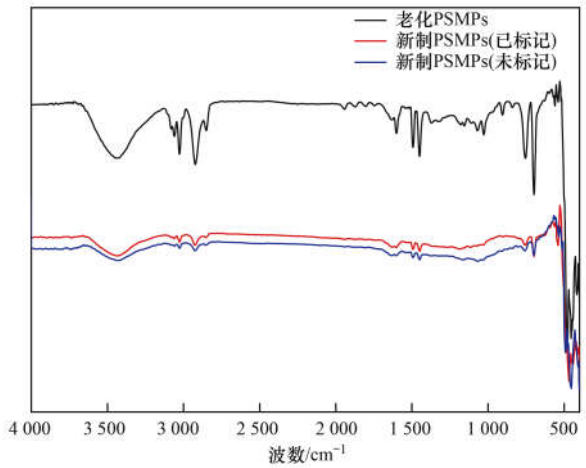


图 6 FTIR 分析

Fig. 6 FTIR analysis

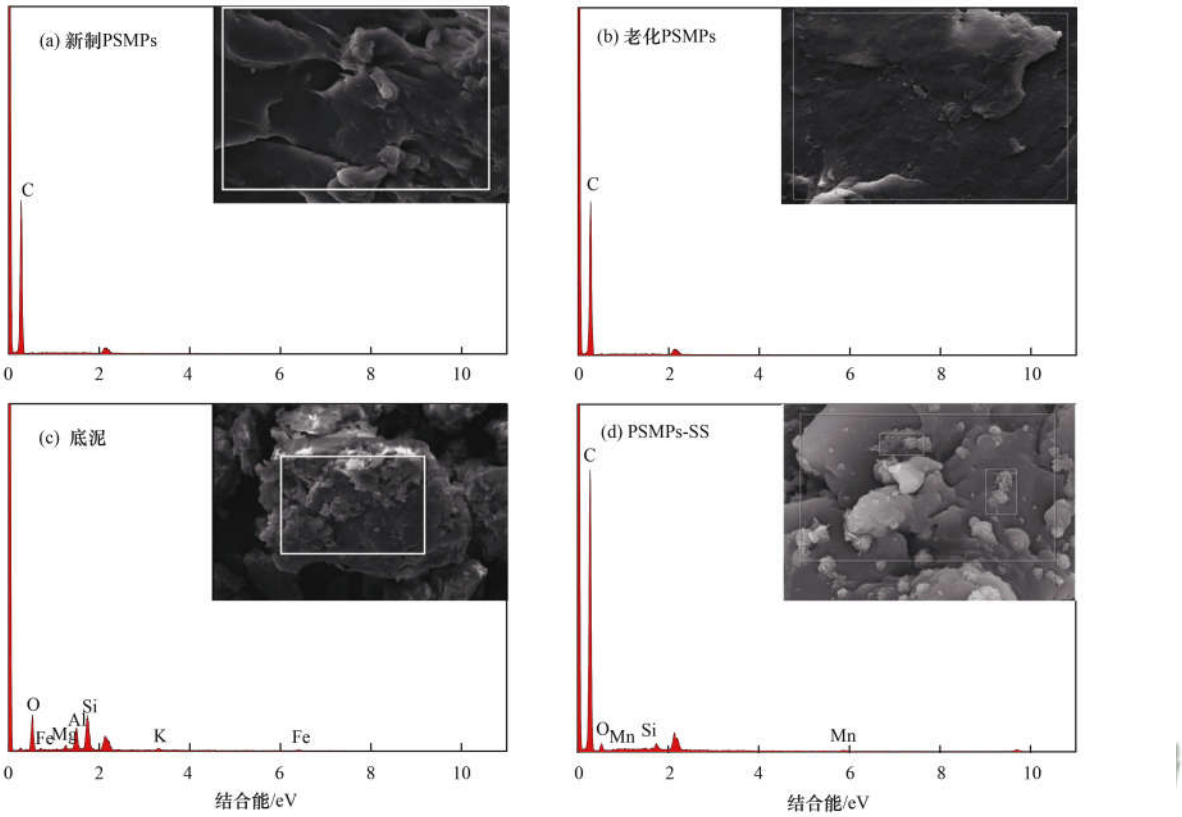
采用尼罗红标记前羰基指数为 0.465,标记后 0.466. 老化后,羰基指数为 0.684,增加了 47%. 羰基指数越大,老化程度越深. 李婉逸等[39]的研究表明,老化 20 d 后的 PHB、PP、PS 和 LDPE 羰基指数分别增加了 17.05%、11.09%、6.45% 和 31.48%. 对暴露于户外 2 a 老化后的聚丙烯样品分析检测,发现在此过程中形成了不同的羰基产物,且随时间的增加,羰基化的区域面积增大[40].

2.4.3 新制与老化 PSMPs 表面形态与元素特征变化

通过 SEM-EDS 分析,对底泥和 PSMPs 表面形态与元素进行分析,其结果如图 7 所示.

本实验所用材料为老化 96 h 的 PSMPs,新制 PSMPs 的表面相对光滑,几乎没有凹凸,而老化 PSMPs 表面形成小的隆起、凹痕、片状和孔隙等. 本实验表明,通过紫外辐射、10% H_2O_2 的老化作用,使得 PSMPs 的表面形态发生变化. Cai 等[41]的研究表明 PS 在老化过程中也有轻微的裂纹形成. 聚苯乙烯颗粒是非晶体结构,具有相对开放的结构,表面更容易产生裂纹,更容易与周围的环境发生一定的反应,从而能够影响水体中的分布.

通过 EDS 分析发现,底泥表面存在氧(O)、硅(Si)、铁(Fe)、铝(Al)和镁(Mg)等元素. PSMPs 的表面仅存在碳(C)元素. 反应结束后,将水体中的老化 PSMPs 提取,发现其表面增加了小的颗粒状物质,表面出现了 O、Si 和 Mn 元素. 可能是悬浮物中的黏土和沙砾等物质黏附在 PSMPs 表面,这可能改变了 PSMPs 性质,影响了在水体中的分布.



(a)新制 PSMPs,(b)老化 PSMPs,(c) 底泥,(d)PSMPs-SS

图 7　PSMPs 与底泥 SEM-EDS 分析

Fig. 7　SEM-EDS analysis of PSMPs and sediment

Zhang[42]的研究表明,微塑料表面含有疏水性官能团,有利于藻类和细菌附着. Li 等[43]的研究表明,微塑料与黏土矿物和纳米颗粒形成团聚.

2.5　DLVO(derjaguin-landau-verwey-overbeek)理论

根据 DLVO 理论,PSMPs 之间的相互作用力计算公式如式(1)和式(2)所示.

范德华力:

$$F_v = -A/2\pi d^2 \tag{1}$$

静电斥力:

$$F_e = \frac{64nKT}{k}\left[\tanh\left(\frac{ze\xi}{4KT}\right)\right]\exp(-kd) \tag{2}$$

根据 DLVO 理论,PSMPs 与 SS 之间相互作用力计算公式如式(3)和式(4)所示.

范德华力:

$$F_v = -\frac{A}{6}\left[\frac{r}{d} + \frac{r}{d+2r}\right] \tag{3}$$

静电斥力:

$$F_e = \pi\zeta_1\zeta_2(\xi_1^2+\xi_2^2)\left[\frac{2\xi_1\xi_2}{\xi_1^2+\xi_2^2} + \ln\frac{1+\exp(-kd)}{1-\exp(-kd)} + \ln\{1-\exp(-2kh)\}\right] \tag{4}$$

式中,A 为 HAMKER 常数,3.16×10^{-18};d 为两个相互作用粒子之间的距离(nm);n 为离子种类数浓度(m^{-3}),用离子种类量浓度($mol\cdot m^{-3}$)乘以阿伏伽德罗常数(6.02×10^{23} mol^{-1})计算;K 为玻耳兹曼常数,1.38×10^{-23} $J\cdot K^{-1}$;k 为反德拜长度(m^{-1});T 为绝对温度,298 K;r 为 PSMPs 半径(m),8.69×10^{-5};ξ_1 为 PS 的 Zeta 电位(图 8);ξ_2 为 SS 的 Zeta 电位(图 8);h 为单位电荷,1.602×10^{-19} C;ζ_1 为真空介电常数,8.854×10^{-12} $C\cdot(V\cdot m)^{-1}$;ζ_2 为水的介电常数,78.5 $F\cdot m^{-1}$.

根据式(1)和式(2)可得,PSMPs 颗粒之间的相互作用力,如图 9(a)所示. PSMPs 之间的相互

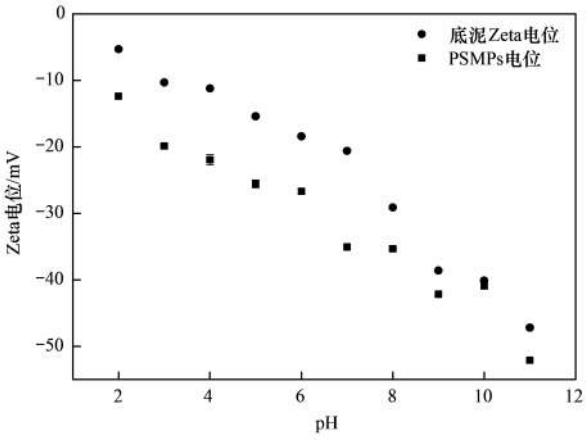
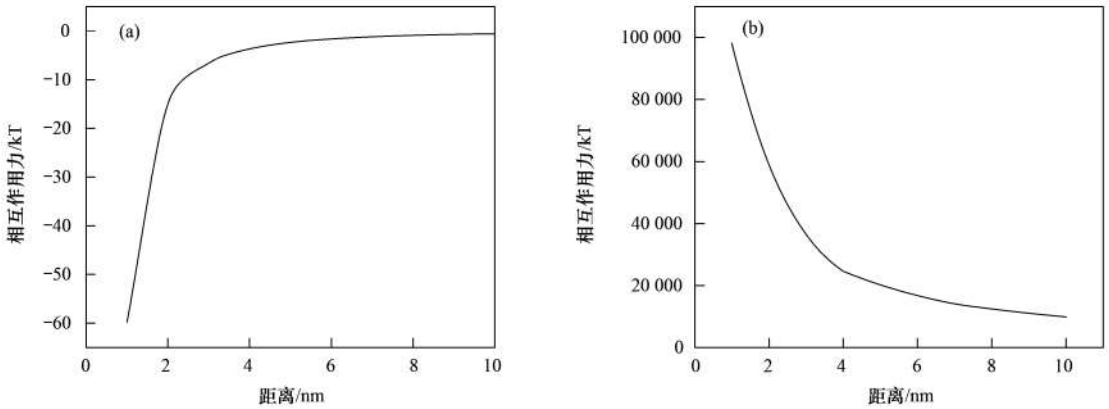


图 8　PSMPs 与 SS 的 Zeta 电位

Fig. 8　Zeta potential on PSMPs and SS

作用力小于0 kT,主要表现为引力,相互作用能垒低,与在实验过程中, A 组观察到 PSMPs 的均匀聚集现象一致. 根据式(3)和式(4)可得,PSMPs 颗粒与 SS 之间的相互作用力,结果如图 9(b)所示. PSMPs 与 SS 之间的相互作用力主要表面为斥力,而且排斥能垒较高. 理论上,PSMPs 对 SS 的吸附程度较低,与实验结果相悖,经典的 DLVO 理论可能不能解释这一现象. Zhang 等[44]和 Ruan 等[45]的研究用扩展 DLVO 理论分别解释了玄武岩纤维与细菌的黏附行为,蒙脱石与细菌的黏附行为. 扩展 DLVO 不仅包含范德华引力和静电斥力,还包括路易斯酸碱相互作用能. 因此 PSMPs 与 SS 之间不仅存在范德华引力和静电斥力,还存在路易斯酸碱相互作用能等.



(a)PSMPs 之间的相互作用力,(b)PSMPs 与 SS 之间的相互作用力

图 9 PSMPs 间以及 PSMPs 与 SS 之间相互作用力

Fig. 9 Interaction force between PSMPs and between PSMPs and SS

3 结论

(1) 通过老化作用,使得 PSMPs 表面含氧官能团增加,羰基指数增加了 47%,表面出现孔隙等结构,改变 PSMPs 理化性质,影响 PSMPs 在上覆水和底泥中的分布. SEM-EDS 分析,实验后的 PSMP 颗粒表面出现了 Si 和 Mn 等元素,证实了 PSMPs 与水体中某些物质结合,促进了上覆水中 PSMPs 沉积于底泥中.

(2) 随着扰动强度的增加,上覆水中 PSMPs 丰度减少,沉积物中的 PSMPs 丰度增加. 当模拟风速达到 8 $m\cdot s^{-1}$ 和 12 $m\cdot s^{-1}$,上覆水中的丰度分别可达(239.67 ± 16.01) $n\cdot mL^{-1}$ 和 2.00 $n\cdot mL^{-1}$,底泥中的丰度可达(140.00 ± 11.00) $n\cdot kg^{-1}$ 和(208.67 ± 7.09) $n\cdot kg^{-1}$. 本研究表明,扰动强度越大,老化 PSMPs 越容易沉积在底泥中.

(3)经典 DLVO 证实了 PSMPs 之间的作用力主要表现为斥力,解释 PSMPs 漂浮在水面的原因. 但这并不能证实 PSMPs 与 SS 之间吸附现象,PSMPs 与 SS 之间可能存在着路易斯酸碱相互作用能等.

参考文献:

[1] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 1620-1627.

[2] Xiong X, Zhang K, Chen X C, *et al*. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake - Qinghai Lake[J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 899-906.

[3] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al*. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 711-719.

[4] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, *et al*. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 283-290.

[5] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, *et al*. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 539-545.

[6] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, *et al*. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1369-1374.

[7] Teng J, Zhao J M, Zhang C, *et al*. A systems analysis of microplastic pollution in Laizhou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140815.

[8] Luo W Y, Su L, Craig N J, *et al*. Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters[J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 174-182.

[9] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, *et al*. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 127-141.

[10] Liu P, Zhan X, Wu X W, *et al*. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: properties, sorption and potential risks[J]. Chemosphere, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125193.

[11] Lu S H, Zhu K R, Song W C, *et al*. Impact of water chemistry on surface charge and aggregation of polystyrene microspheres suspensions[J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 951-959.

[12] Li Y, Wang X J, Fu W Y, *et al*. Interactions between nano/micro plastics and suspended sediment in water: implications on

aggregation and settling[J]. Water Research, 2019, **161**: 486-495.

[13] Long M, Moriceau B, Gallinari M, *et al*. Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: impact on their respective fates[J]. Marine Chemistry, 2015, **175**: 39-46.

[14] Maes T, Jessop R, Wellner N, *et al*. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1): 44501.

[15] Martinez V, Henary M. Nile red and Nile blue: applications and syntheses of structural analogues[J]. Chemistry - A European Journal, 2016, **22**(39): 13764-13782.

[16] Shim W J, Song Y K, Hong S H, *et al*. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, **113**(1-2): 469-476.

[17] Prata J C, Reis V, Matos J T V, *et al*. A new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT)[J]. Science of the Total Environment, 2019, **690**: 1277-1283.

[18] Hüffer T, Weniger A K, Hofmann T. Sorption of organic compounds by aged polystyrene microplastic particles[J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 218-225.

[19] Wen X F, Du C Y, Xu P, *et al*. Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: abundance, composition, surface textures[J]. Marine Pollution Bulletin, **2018**, 136: 414-423.

[20] Strungaru S A, Jijie R, Nicoara M, *et al*. Micro- (nano) plastics in freshwater ecosystems: abundance, toxicological impact and quantification methodology[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, **110**: 116-128.

[21] Di M X, Liu X N, Wang W F, *et al*. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, **65**: 82-89.

[22] Sighicelli M, Pietrelli L, Lecce F, *et al*. Microplastic pollution in the surface waters of Italian Subalpine Lakes[J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 645-651.

[23] 周崇胜, 范铭煜, 丁云浩, 等. 常见微塑料的自然光解老化[J]. 环境化学, 2021, **40**(6): 1741-1748.
Zhou C S, Fan M Y, Ding Y H, *et al*. Insights into natural photo-aging of common-used microplastics[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(6): 1741-1748.

[24] 马思睿, 李舒行, 郭学涛. 微塑料的老化特性、机制及其对污染物吸附影响的研究进展[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3992-4003.
Ma S R, Li S X, Guo X T. A review on aging characteristics, mechanism of microplastics and their effects on the adsorption behaviors of pollutants[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3992-4003.

[25] Turner A, Holmes L. Occurrence, distribution and characteristics of beached plastic production pellets on the island of Malta (central Mediterranean)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(2): 377-381.

[26] Rochman C M, Hoh E, Hentschel B T, *et al*. Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: implications for plastic marine debris[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(3): 1646-1654.

[27] Lv Y D, Huang Y J, Yang J L, *et al*. Outdoor and accelerated laboratory weathering of polypropylene: a comparison and correlation study[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, **112**: 145-159.

[28] Wang Q J, Zhang Y, Wangjin X X, *et al*. The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **87**: 272-280.

[29] Carstens J F, Bachmann J, Neuweiler I. A new approach to determine the relative importance of DLVO and non-DLVO colloid retention mechanisms in porous media[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, **560**: 330-335.

[30] Martines E, Csaderova L, Morgan H, *et al*. DLVO interaction energy between a sphere and a nano-patterned plate[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **318**(1-3): 45-52.

[31] Wu X L, Lyu X Y, Li Z Y, *et al*. Transport of polystyrene nanoplastics in natural soils: effect of soil properties, ionic strength and cation type[J]. Science of the Total Environment, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136065.

[32] Delforce L, Hofmann E, Nardello-Rataj V, *et al*. TiO_2 nanoparticle dispersions in water and nonaqueous solvents studied by gravitational sedimentation analysis: complementarity of Hansen Parameters and DLVO interpretations[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, **628**, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127333.

[33] 王胜艳, 郝少盼, 王鹏, 等. 风浪模拟扰动下梅梁湾沉积物的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(11): 1-5.
Wang S Y, Hao S P, Wang P, *et al*. Experiment on Sediment of Meiliang bay under simulative disturbing conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **33**(11): 1-5.

[34] Lv L L, Qu J H, Yu Z H, *et al*. A simple method for detecting and quantifying microplastics utilizing fluorescent dyes-Safranine T, fluorescein isophosphate, Nile red based on thermal expansion and contraction property[J]. Environmental Pollution, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113283.

[35] Hwang G, Ahn I S, Mhin B J, *et al*. Adhesion of nano-sized particles to the surface of bacteria: mechanistic study with the extended DLVO theory[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2012, **97**: 138-144.

[36] Song Z F, Yang X Y, Chen F M, *et al*. Fate and transport of nanoplastics in complex natural aquifer media: effect of particle size and surface functionalization[J]. Science of the Total Environment, 2019, **669**: 120-128.

[37] Liu P, Lu K, Li J L, *et al*. Effect of aging on adsorption behavior of polystyrene microplastics for pharmaceuticals: adsorption mechanism and role of aging intermediates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121193.

[38] Song Y K, Hong S H, Jang M, *et al*. Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(8): 4368-4376.

[39] 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 等. 淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3829-3836.
Li W Y, Liu Z L, Miao L Z, *et al*. Aging process and DOC analysis of four different types of plastic particles in freshwater systems[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3829-3836.

[40] 赵靖华. 老化微/纳塑料对水中典型污染物的吸附行为及作用机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.

[41] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, *et al*. Observation of the

degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments[J]. Science of the Total Environment, 2018, **628-629**: 740-747.

[42] Zhang W. Nanoparticle aggregation: principles and modeling [A]. In: Capco D G, Chen Y S, (Eds.). Nanomaterial[C]. Dordrecht: Springer, 2014.

[43] Li P H, Zou X Y, Wang X D, *et al*. A preliminary study of the interactions between microplastics and citrate-coated silver nanoparticles in aquatic environments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **385**, doi: 10. 1016/j. jhazmat. 2019. 121601.

[44] Zhang X Y, Zhou X T, Xi H P, *et al*. Interpretation of adhesion behaviors between bacteria and modified basalt fiber by surface thermodynamics and extended DLVO theory[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2019, **177**: 454-461.

[45] Ruan B, Wu P X, Liu J, *et al*. Adhesion of *Sphingomonas* sp. GY2B onto montmorillonite: a combination study by thermodynamics and the extended DLVO theory[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, **192**, doi: 10. 1016/j. colsurfb. 2020. 111085.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 6

Jun. 15, 2022

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on $PM_{2.5}$ Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region ····· QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, *et al.* (2831)

Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China ····· HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, *et al.* (2840)

Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in $PM_{2.5}$ During COVID-19 Control in Suzhou ····· MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, *et al.* (2851)

Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 ····· XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, *et al.* (2858)

Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing ····· PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, *et al.* (2867)

Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of $PM_{2.5}$ in Baoding City in Winter ····· WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, *et al.* (2878)

Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in $PM_{2.5}$ in Jiangbei New Area, Nanjing ····· GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2888)

Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi ····· XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, *et al.* (2895)

Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example ····· ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, *et al.* (2906)

Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis ····· TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, *et al.* (2917)

Characteristics and Meteorological Factors of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, *et al.* (2928)

Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 ····· ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, *et al.* (2937)

Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province ····· YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, *et al.* (2947)

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn ····· ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, *et al.* (2957)

Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan ····· SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2966)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City ····· WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, *et al.* (2979)

Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China ····· FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)

Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River ····· WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, *et al.* (2996)

Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia ····· ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, *et al.* (3005)

Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism ····· SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, *et al.* (3016)

Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors ····· LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, *et al.* (3027)

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai ····· ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, *et al.* (3037)

Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake ····· ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, *et al.* (3048)

Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks ····· LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, *et al.* (3058)

Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area ····· ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, *et al.* (3066)

Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin ····· CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, *et al.* (3077)

Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water ····· CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, *et al.* (3088)

Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 ····· QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, *et al.* (3097)

Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City ····· WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, *et al.* (3106)

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years ····· GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, *et al.* (3118)

Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China ····· TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, *et al.* (3128)

Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data ····· GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, *et al.* (3140)

Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution ····· CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)

Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution ····· SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, *et al.* (3160)

Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water ····· WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing ····· XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, *et al.* (3177)

Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, *et al.* (3187)

Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron ····· CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, *et al.* (3195)

Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System ····· TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, *et al.* (3204)

Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions ····· GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, *et al.* (3211)

Effect of HumicAcid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis ····· LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, *et al.* (3221)

Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, *et al.* (3230)

Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland ····· SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, *et al.* (3241)

Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau ····· WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, *et al.* (3253)

Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China ····· LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, *et al.* (3262)

Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province ····· ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin ····· DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, *et al.* (3278)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus roxellana*) Habitat in Shennongjia Mountains ····· YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, *et al.* (3288)

Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation ····· XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, *et al.* (3299)

Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice ····· TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, *et al.* (3308)

Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments ····· LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, *et al.* (3315)

Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai ····· LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, *et al.* (3328)

Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops ····· JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, *et al.* (3338)

Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing ····· LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, *et al.* (3348)

Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 ····· LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, *et al.* (3357)

Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data ····· LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, *et al.* (3365)