Eco-Environmental Knowledge Web

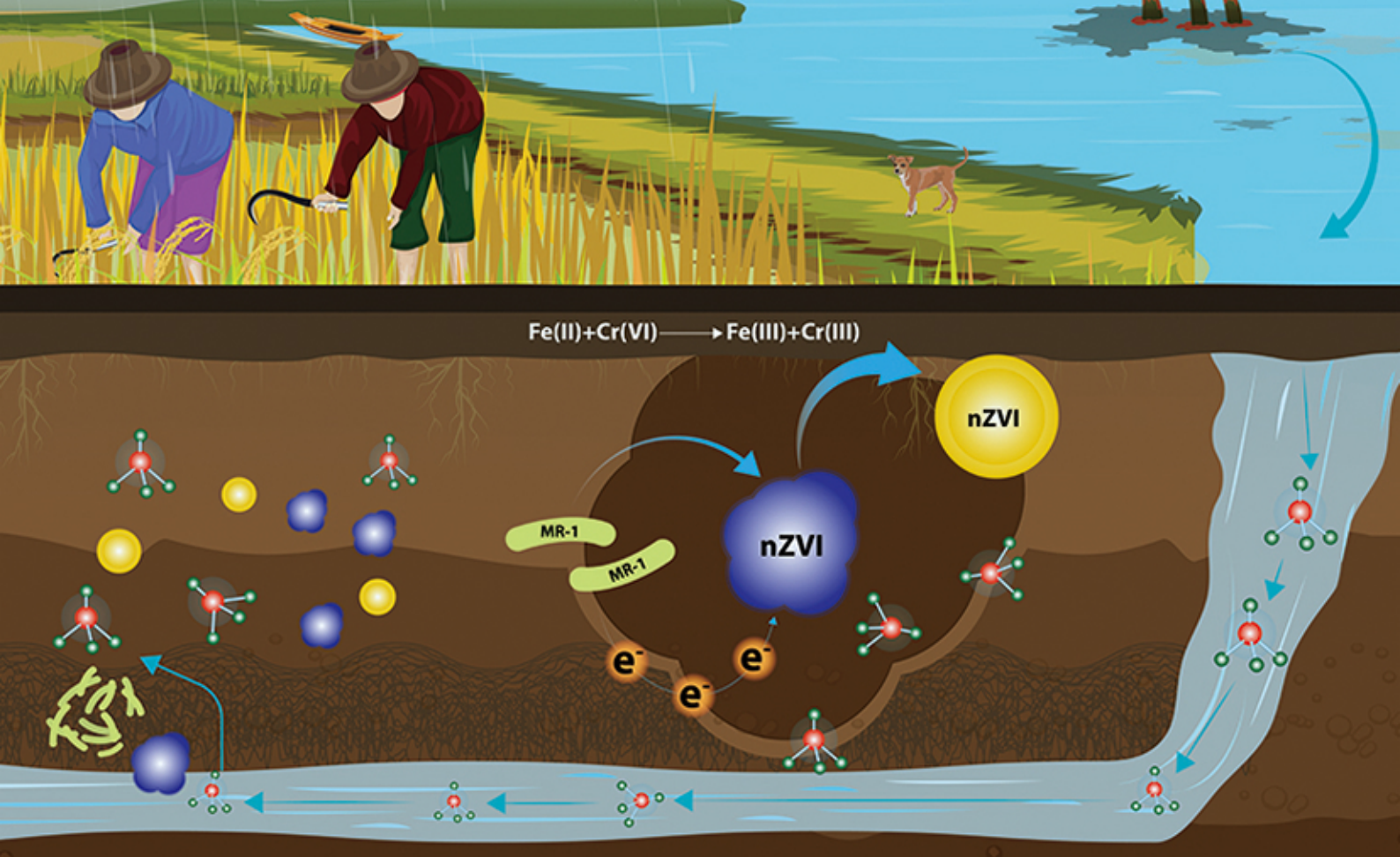
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚，赵晓蕾，刘凯，钟松雄，李芳柏，方利平，叶挺进，石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年9月
第42卷 第9期
Vol.42 No.9

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 9 期
2021 年 9 月 15 日

目　次

北京市 2014～2020 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 时空分布与健康效应评估 …… 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化模拟与分析 …… 杨晓辉,宋春杰,范丽行,张凌云,魏强,李夫星,王丽艳,王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 $PM_{2.5}$ 污染影响 …… 邵玄逸, 王晓琦, 钟嶷盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 …… 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 …… 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峥 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 …… 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 $PM_{2.5}$ 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 …… 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 …… 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 …… 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 …… 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 …… 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 …… 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 …… 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 …… 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 … 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 …… 张婉军,辛存林,于爽,刘齐,曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 …… 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 …… 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 …… 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 …… 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 …… 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 …… 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除 …… 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除镉污染底泥的应用效果 …… 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 …… 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 …… 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 …… 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)生长的拮抗效应及其作用机制 …… 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 …… 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 …… 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 …… 池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 …… 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性 …… 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 …… 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 …… 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 …… 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 …… 杜昊霖, 王萼, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 …… 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 …… 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 …… 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳炜, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 …… 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 …… 庞杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应 …… 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 …… 刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 …… 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 …… 马寰菲, 胡汗, 李益, 郭垚鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(Ⅵ)及机制 …… 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 …… 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N_2O 排放的影响 …… 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH_4^+-N生物炭对土壤 N_2O-N 排放和 NH_3-N 挥发的影响 …… 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘刈, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 …… 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985～2019 年中国全氟辛烷磺酰基化合物的动态物质流分析 …… 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)　《环境科学》征稿简则(4340)　信息(4382, 4537, 4565)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第9期 2021年9月
Vol.42, No.9 Sep., 2021

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用

王嘉旋[1], 宋可心[1], 孙一鑫[1], 方涛[1,2,3], 李瑾祯[1], 张涛[1,2,3], 冯志华[1,2,3]*

(1. 江苏海洋大学江苏省海洋生物资源与环境重点实验室, 连云港 222005; 2. 江苏海洋大学江苏省海洋生物产业技术协同创新中心, 连云港 222005; 3. 江苏海洋大学江苏省海洋生物技术重点实验室, 连云港 222005)

摘要: 2018 年 7 月于海州湾潮滩设置 3 个断面共 9 个站位,通过对海州湾潮滩沉积物中以及沙蚕体内微塑料的丰度和形态特征的研究,探讨了沙蚕体内微塑料的来源,以及沙蚕对潮滩沉积物微塑料的指示作用. 结果表明,潮滩沉积物中微塑料的平均丰度为(0.49 ±0.17) n·g^{-1},处于国内近岸环境研究的较高水平. 所有检测到的微塑料中,最为丰富的形态和颜色类型分别为纤维和黑灰色,材质以聚乙烯(polyethylene, PE)、聚酯纤维(polyester, PET)和聚苯乙烯(polystyrene, PS)为主. 沙蚕中微塑料检出率为 77.78%~86.67%,平均丰度为(6.68 ±2.21) n·ind^{-1},其丰度与个体质量显著正相关(r =0.42, P =0.002),个体质量 1.5 g 以上的沙蚕中微塑料丰度显著高于 <0.5 g 和 0.5~1 g 两个组别(F_3 =141.029, P =0.000),微塑料形态以黑色或蓝色小纤维为主,主要材质同样为聚乙烯和聚酯纤维. 通过对 0~3 mm 范围内的微塑料各项特征分析发现,沉积物与沙蚕中的微塑料丰度强相关(r =0.79, P =0.01),其主要形态组成(r =0.90, P =0.035)和材质组成(r =0.73, P =0.024)同样显著相关,表明沙蚕会摄取沉积环境中的微塑料,存在与沉积物之间的微塑料交换,沙蚕作为沉积物中微塑料污染指示生物物种是可行的.

关键词: 微塑料; 沙蚕; 潮滩沉积物; 海州湾; 指示生物

中图分类号: X55 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)09-4341-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202012069

Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone

WANG Jia-xuan[1], SONG Ke-xin[1], SUN Yi-xin[1], FANG Tao[1,2,3], LI Jin-zhen[1], ZHANG Tao[1,2,3], FENG Zhi-hua[1,2,3]*

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 2. Co-innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology, Jiangsu Qcean University, Lianyungang 222005, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Sediment samples were collected from nine sites of three sections, in the intertidal zone of Haizhou bay in July 2018. The abundance and characteristics of microplastics in the sediments (and ragworms within the sediments) were then determined to identify the source of microplastics in ragworms, and to explore the effects of ragworms on microplastics in sediment. The average abundance of microplastics in tidal flat sediments was (0.49 ±0.17) n·g^{-1}, which was at a high level in domestic offshore environmental studies. Among all the microplastics detected, the most common form and color were fiber and black-gray, respectively, and the materials were mainly polyethylene (PE), polyester (PET), and polystyrene (PS). The detection rate of microplastics in ragworm was 77.78%-86.67%, with an average abundance of (6.68 ±2.21) n·ind^{-1}; the abundance was significantly correlated with individual mass (r = 0.42, P =0.002). The microplastic abundance was significantly higher in ragworms with individual mass over 1.5 g than in those with a mass of <0.5 g or 0.5-1 g (F_3 =141.029, P =0.000). In ragworms, microplastics were dominated by small black or blue fibers, and the main materials were PE and PET. By analyzing the various characteristics of microplastics with a particle size of 0-3 mm, it was found that the abundance of microplastics in sediments was strongly correlated with that in ragworms (r =0.79, P =0.01); the main form (r =0.90, P =0.035) and the material composition (r =0.73, P =0.024) also showed significant correlation between sediments and ragworms. This indicates that ragworms ingest microplastics in the sedimentary environment and exchange the microplastics with the sediments. Therefore, ragworms can be used as an indicator species of microplastic pollution in sediments.

Key words: microplastic; ragworm; intertidal sediments; Haizhou Bay; indicator species

塑料自从被发明以来,就在各行各业得到了广泛应用,据报道,每年塑料增长量约 9%, 2018 年年产量达到了 3.59 亿 t[1]. 由于处理不当,随之而来的污染问题也不可忽视. Eriksen 等[2]的研究表明,超过 5.25 万亿颗粒,重达268 940 t的塑料碎片进入海洋环境. 这些塑料垃圾在太阳能、风能、海洋物理化学和生物降解作用下形成更小的塑料碎片,其中粒径小于 5 mm 的塑料碎片被称为微塑料[2~6]. 微塑料具有更小的粒径,能够随着洋流、波浪和潮汐运动在海洋中进行转移,因此广泛分布于海水[7~10]、入

收稿日期: 2020-12-08; **修订日期**: 2021-02-28

基金项目: 江苏省产学研合作项目(BY2020428); 国家自然科学基金项目(41876113); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 王嘉旋(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋环境中微塑料赋存特征, E-mail: 2018211021@jou.edu.cn

* 通信作者,E-mail:fengzhihua@jou.edu.cn

海河流[11]、海岸带[12,13]和沉积物[7,14]中,包括两极[15]和深海[16]等极端环境,被科学家称为海洋中的 $PM_{2.5}$. 环境介质中微塑料会被许多海洋生物主动或被动摄食. 有研究表明,鱼类和蟹类的鳃和消化道中都发现微塑料的聚集[17~19],在海胆的生殖腺和体腔液中同样发现较高丰度的微塑料累积[20]. 海洋生物对微塑料的摄食行为不仅会造成胃肠道的物理损伤和堵塞,减少营养物质摄取[21,22]. 室内毒理实验表明,微塑料还会产生包括抑制生长、能量下降、死亡率升高、幼体存活率下降和生殖能力下降等不利影响[23].

环节动物门多毛纲游走目的沙蚕科,在海洋无脊椎动物中占据重要地位,其种类达 80 余种,数目巨大,是潮滩沉积物中最为常见的生物类群之一[24]. 由于生长速度快,生产成本低和营养丰富等特征,沙蚕是众多甲壳类动物、鱼类和鸟类等海洋生物的重要食物来源[25]. 尽管沙蚕在海洋生态系统中起到重要作用,但是目前国内关于沙蚕的微塑料污染研究却鲜见报道. 本文以海州湾地区沙蚕和潮滩沉积物为研究对象,探究其微塑料的分布和污染特征,进一步分析沙蚕中微塑料的来源,考察沙蚕作为微塑料污染指示生物的可能性.

1 材料与方法

1.1 站位设置与样品采集

海州湾是黄海的一个半开阔性海湾,也是中国重要的养殖海湾之一. 由于地理位置处于基岩-砂质海岸和淤泥质海岸的交汇地带,海州湾拥有较长的海岸线和丰富的潮间带生物资源[26]. 本研究选择柘汪镇、海头镇和西墅村临海区域这 3 个海水养殖区作为研究对象,共设置 3 个断面(断面 1~3)和 9 个采样站位(S1~S9)(图 1). 站位信息详见表 1.

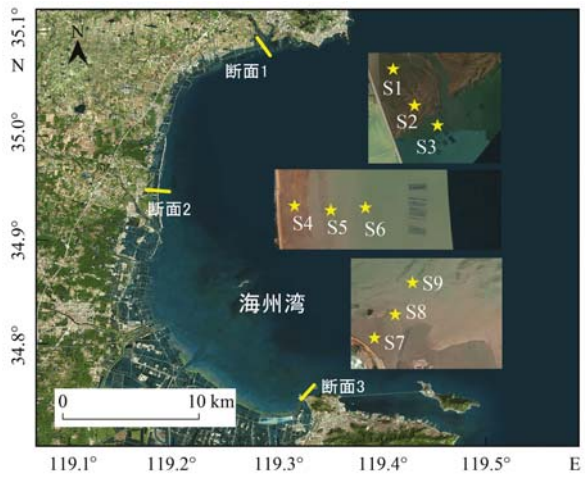


图 1 调查站位示意

Fig. 1 Sampling sites

表 1 调查站位信息

Table 1 Summary of research sites

断面	潮区	站位编号	经度(E)	纬度(N)
断面 1	高潮	S1	119°17′29.64″	35°04′31.52″
	中潮	S2	119°17′41.07″	35°04′12.17″
	低潮	S3	119°17′51.27″	35°03′51.43″
断面 2	高潮	S4	119°11′57.17″	34°56′53.45″
	中潮	S5	119°12′08.45″	34°56′53.26″
	低潮	S6	119°12′21.81″	34°56′52.88″
断面 3	高潮	S7	119°19′20.34″	34°46′04.56″
	中潮	S8	119°19′41.50″	34°46′10.78″
	低潮	S9	119°19′30.69″	34°34′46.32″

选择退潮时段采集样品,在每一断面的高、中和低这 3 个潮区分别布设取样点. 每一站位使用沉积生物定量采样框(25 cm × 25 cm × 30 cm)采集生物样品,每个取样点各采集 3 个样方. 同时用于分析潮滩沉积物中微塑料,全部样品在同一天采集完毕. 以孔径 1 mm 的筛子筛出生物样品并挑选沙蚕. 沙蚕样品用 PE 材质的密封储物袋密封,放入冷冻箱中暂存,并迅速转移至实验室,在 -20℃的冰箱中储存. 沉积物样品采用 PE 材质的密封储物袋密封保存,在转移至实验室后于避光阴凉处存放. 此外,现场调查同时收集研究区域内的绳索、养殖网帘、泡沫球和塑料材质的废弃物等物品,用于微塑料的来源解析.

1.2 微塑料分离与鉴定

为减少实验误差,蒸馏水与所有试剂均通过 3 μm 玻璃纤维滤膜抽滤后使用; 实验台和实验仪器使用前用蒸馏水冲洗; 实验人员全程着纯棉实验服,佩戴丁腈手套; 设置空白对照,以减少实验过程中的微塑料污染.

样品解冻后,用已过滤的蒸馏水将沙蚕表面冲洗干净,用吸水纸吸干表面水分,随后使用精密电子天平测量质量. 生物样品的消解参考 Karami 等[27]的研究:使用 10% KOH 溶液对样品进行消解,并在 40℃的电热恒温振荡水槽恒温水浴 24 h,直至消解液清澈透明. 称取 300~400 g 的沉积物(湿重)于玻璃烧杯中,用铝箔纸封口以避免污染. 样品在 70℃的烘箱中烘干,以获得准确干重(精确到 1 mg). 每一样品中加入 800 mL 饱和氯化钠(NaCl)溶液用以浮选,自然沉降 24 h 后,取上清液进行抽滤,抽滤过程与生物样品相同. 使用玻璃纤维滤膜(孔径 3 μm,直径 47 mm,海宁金正)对消解液进行抽滤,滤膜保存在干净的培养皿中.

将滤膜置于 Nikon 体视镜下观察、测量并拍照,记录微塑料的形态、颜色和粒径特征以便后续统计分析. 粒径统计中按照每 500 μm 一个梯度将其分为 10 组进行统计[28,29]. 随机挑选微塑料,使用傅里

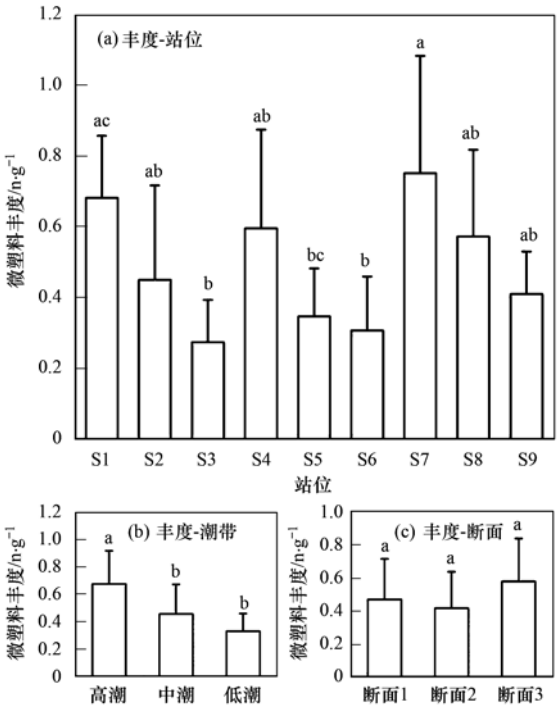
叶变换红外光谱仪(μ-FT-IR, Nicolet iN10, Thermo Fisher Scientific, USA)对微塑料材质进行鉴别. 本研究中站位使用 Surfer 16 绘制,其它使用 Origin 2018 绘制,实验结果使用 SPSS 2020 进行统计分析.

2　结果与分析

2.1　沉积物中的微塑料

2.1.1　沉积物中微塑料的丰度特征

海州湾潮滩沉积物中共分离微塑料 1392 个, 9 个采样站位丰度介于 0.27 ~ 0.75 n·g^{-1}之间[平均丰度为(0.49 ± 0.24) n·g^{-1}]. 所有站位中, S7 站位[(0.75 ± 0.33) n·g^{-1}]沉积物中微塑料丰度最高,并显著高于 S3[(0.27 ± 0.12) n·g^{-1}]、S5[(0.35 ± 0.14) n·g^{-1}]和 S6[(0.31 ± 0.15) n·g^{-1}]这 3 个站位[独立样本 t 检验, $P < 0.05$, 图 2(a)]. 但单因素方差分析表明,各站位之间微塑料丰度无显著性差异($F_8 = 1.860$, $P = 0.131$). 对不同断面和潮带进行双因素方差分析发现,不同潮带沉积物样品中的微塑料存在丰度差异($F_{2,4} = 5.902$, $P = 0.011$),高潮带[(0.68 ± 0.24) n·g^{-1}]显著高于中潮带[(0.46 ± 0.22) n·g^{-1}]和低潮带[(0.33 ± 0.13) n·g^{-1}],但中潮和低潮之间微塑料丰度并无显著性差异,如图 2(b). 断面 1 的潮滩沉积物中微塑料丰度最高,为(0.58 ± 0.26) n·g^{-1},断面 2 最低,为(0.42 ± 0.22) n·g^{-1}, 3 个断面之间并无显著性差异[$F_{2,4} = 1.312$, $P = 0.294$,图 2(c)]. 不同断面和潮带对沉积物中微塑料丰度不存在交互作用($F_{2,4} = 0.112$, $P = 0.977$).



相同的小写字母表示无显著性差异($P > 0.05$),
不同的小写字母表示有显著性差异($P < 0.05$)

图 2　海州湾潮滩沉积物中微塑料站位、潮带和断面分布

Fig. 2　Distribution of microplastics from tidal flat sediments in different sites, tidal zones, and sections of Haizhou Bay

2.1.2　沉积物中微塑料的形态特征

海州湾潮滩沉积物中的微塑料可以分为纤维、碎片、泡沫、薄膜和微珠等 5 个类别[图 3(b)],其中,占比最多的是纤维类[(43.69 ± 10.92)%],随后依次为碎片类[(28.45 ± 11.07)%]、发泡类[(14.76 ± 9.23)%]、薄膜类[(10.09 ± 6.23)%]和微珠[(3.02 ± 4.02)%],不同形态类型出现频率具有显著性差异($F_4 = 90.121$, $P = 0.000$). 本研究中,潮滩沉积物中微塑料的颜色类型有 10 种以

(a)分离出的微塑料; (b)形态; (c)颜色; (d)材质

图 3　海州湾潮滩沉积物中分离出的微塑料及其形态、颜色和材质特征

Fig. 3　Microplastics and their characteristic morphology, color, and material isolated from Haizhou Bay tidal flat sediments

上,为便于统计,将其简单归类为 5 个色系,分别为黑灰色、白色透明、蓝绿色、橙黄色和红粉色,如图 3(c). 出现频率最高的为黑灰色[(37.93 ± 19.30)%]和白色透明[(31.83 ± 14.08)%]两类微塑料,并显著高于其它 3 类(F_4 = 44.738, P = 0.000). 而对于不同的断面、潮带以及站位,微塑料的形态和颜色均未表现出显著性差异. 随着粒径增加,每组的微塑料检出个数逐渐减少, 0 ~ 500 μm 的微塑料个数占比 22.76%, 而 4 500 ~ 5 000 μm的微塑料仅有 2.27%.

随机抽取约 20% 的滤膜,将上面的疑似微塑料颗粒用于傅里叶红外光谱检测. 检测结果表明,海州湾潮滩沉积物样品中的微塑料材质类型多样,占比超过 10% 的微塑料材质有 4 种,分别为聚乙烯(polyethylene, PE)、聚酯纤维(polyester, PET)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)和聚丙烯(polypropylene, PP),其总个数占检测总数的 71.17%. 除此之外,还有乙烯-丙烯共聚物(polypropylene-polyethylene, PP-PE)、赛璐玢(cellophane, CP)、尼龙(Polyamide, PA)、人造纤维(Rayon)和聚醚型聚氨酯(polyether polyurethane, PEU)等[图 3(d)].

2.2 沙蚕中微塑料污染特征

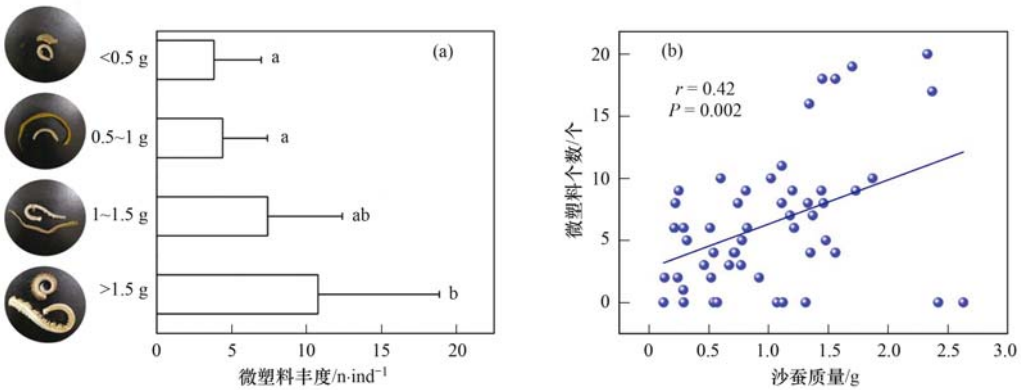
2.2.1 沙蚕中微塑料丰度

本研究共捕获 52 只沙蚕,每一站位采集到 4 ~ 8 只. 3 个潮带中,高潮带平均每个站位 4.33 只,显著低于中潮带(平均 7 只)和低潮带(平均 6 只)(F_2 = 12.250, P = 0.008),体重范围为 0.12 ~ 2.63 g. 按照质量将沙蚕分为 <0.5、0.5 ~ 1、1 ~ 1.5 和 >1.5 g 4 个组别,每组 9 ~ 17 只(表 2). 其中, 43 只沙蚕体内发现微塑料,检出率为 77.78% ~ 86.67%,最高检出率出现在 0.5 ~ 1 g 质量组,最低则为 >1.5 g 质量组. 本研究发现,沙蚕中微塑料的丰度差异较大,最低时未检出,最高可达 20 n·ind^{-1}. 按照质量分组进行统计,沙蚕中微塑料丰度为 3.82 ~ 10.78 n·ind^{-1},质量组之间存在显著性差异(F_3 = 141.029, P = 0.000). 如图 4(a),最高质量组(> 1.5 g)沙蚕中微塑料丰度显著高于最低的两个质量组(<0.5 g 和 0.5 ~ 1 g, P < 0.05),且随着质量增加,每组沙蚕中微塑料的平均丰度同样出现增长. 数据分析表明,沙蚕摄入微塑料个数与其个体质量显著正相关[Pearson 相关分析, r = 0.42, P = 0.002,图 4(b)].

表 2 沙蚕生物特征与摄入微塑料情况

Table 2 Summary of biological characteristics and microplastic uptake of ragworms

分组/g	个体数	检出个体	平均体重/g	微塑料丰度/n·ind^{-1}	纤维比例/%
<0.5	11	9	0.26	3.82 ± 3.16	90.48
0.5 ~ 1	15	13	0.68	4.40 ± 3.00	90.91
1 ~ 1.5	17	14	1.27	7.41 ± 4.98	88.10
>1.5	9	7	2.02	10.78 ± 8.11	91.75



相同的小写字母表示无显著性差异(P > 0.05),不同的小写字母表示有显著性差异(P < 0.05)

图 4 沙蚕中微塑料丰度及其与个体质量的相关性

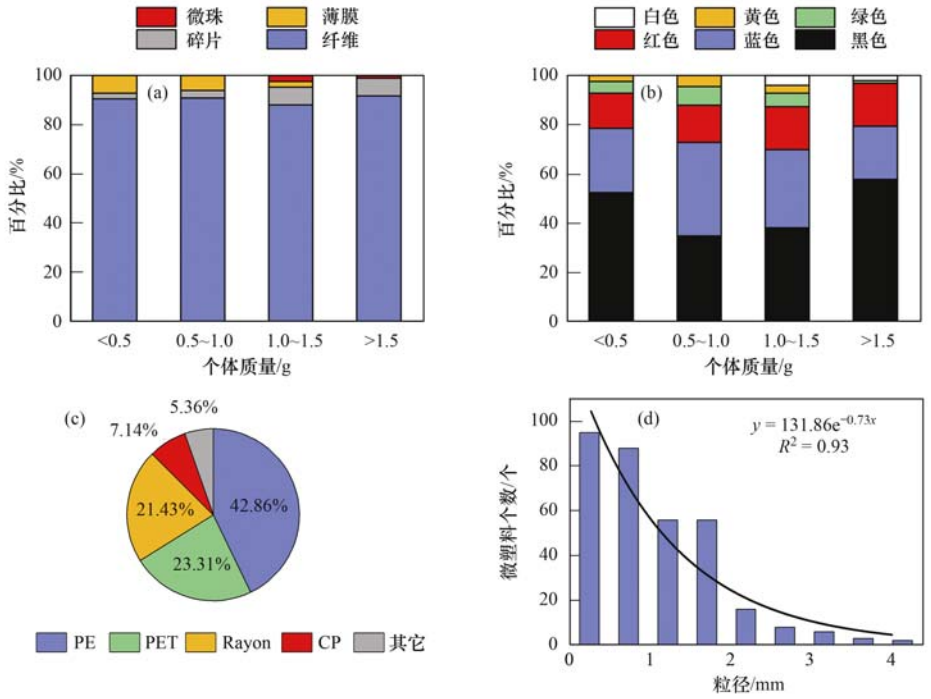
Fig. 4 Microplastic abundance in ragworm and correlation between the number of microplastic particles and individual mass of the ragworm

2.2.2 沙蚕中微塑料污染特征

本研究发现,沙蚕中微塑料的形态以纤维为主,4 组沙蚕中纤维状微塑料占比达 88.10% ~ 91.75%,随后依次为薄膜和碎片. 在较低的两个质量组(<0.5 g 和 0.5 ~ 1 g)中,薄膜(7.14% 和 6.06%)占比高于碎片(2.38% 和 3.03%),在较高的两个质量组(1 ~ 1.5 g 和 >1.5 g)中恰恰相反. 此外,两个较高的质量组中还发现了一定比例的微珠(1 ~ 1.5 g:微珠占比 2.38%; >1.5 g:微珠占比 1.03%),但两个低质量沙蚕组中并无发现. 而颜色的对比中,不同质量的沙蚕

之间并未发现较明显的差异，整体以黑色、蓝色和红色塑料为主. 在 1 ~ 1.5 g 和 >1.5 g 两组沙蚕中发现了白色微塑料，另外两组则没有发现. 这表明低质量和高质量沙蚕之间存在差异性.

所有沙蚕中共发现 331 个疑似塑料碎片，本研究随机选取其中约 20% 滤膜上的疑似微塑料颗粒，使用傅里叶变换红外光谱仪进行鉴定. 鉴定发现，其中超过 90% 的塑料为 PE、PET、Rayon 和 CP 这 4 种材质，其它则为 PP 和 PP-PE 等[图 5(c)]. 沙蚕中微塑料粒径范围为 0.12 ~ 4.59 mm，<1 mm 的微塑料占比达到 55.29%，超过 93.95% 的微塑料小于 2.5 mm，3 mm 以上的塑料微粒仅有 6 个. 本研究发现，随着微塑料粒径增加，沙蚕摄入的数量呈指数减少[图 5(d)].



(a)形态；(b)颜色；(c)材质；(d)粒径

图 5　沙蚕中微塑料形态、颜色、材质和粒径特征

Fig. 5　Characteristics of morphology, color, material, and size of microplastics in ragworm

2.3　沙蚕与沉积物中微塑料的相关性

本研究还发现，沙蚕与沉积物中的微塑料的形态特征和颜色类型等方面存在一定程度相似性，发现最多的形态类型均为纤维，黑灰色是最常见的颜色，而材质类型均为 PE 和 PET. 考虑到沙蚕对微塑料粒径的选择性，对沉积物中 3 mm 以下的微塑料进行统计(图 6)，发现沉积物和沙蚕中微塑料的丰度呈正相关($r = 0.79$, $P = 0.01$). 在这一粒径范围内，潮滩沉积物中微塑料形态以纤维和碎片为主(77.40%)，与沙蚕中的微塑料显著相关($r = 0.905$, $P = 0.035$)，并在材质比较中同样发现了相关性($r = 0.73$, $P = 0.024$). 此外，差异性分析表明，沉积物中微塑料与沙蚕中微塑料粒径不存在显著性差异.

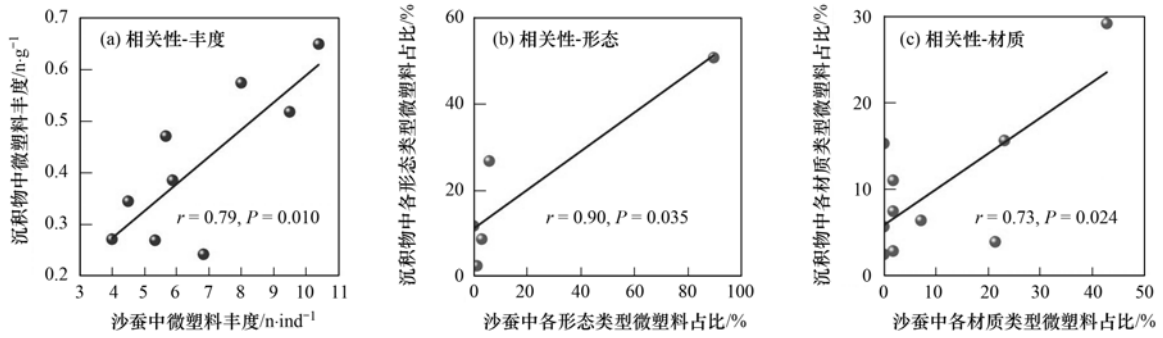


图 6　沙蚕与沉积物中微塑料丰度、形态和材质的相关性

Fig. 6　Correlation between microplastic abundance, shape, and materials in ragworm and sediment

3 讨论

3.1 海州湾海滩沉积物中微塑料污染水平

本研究中,海州湾沉积物中微塑料形态主要为纤维类(53.90%),其中又以黑色和蓝色为主,成分主要为 PE 和 PET,这一发现与李征等[30]对海州湾近海水域和沉积物中的研究结果相似,同样以蓝色和黑色纤维(58.3%)为主. 根据调查发现,海州湾海滩上遗落有较多的养殖垃圾,多为蓝色渔具,如塑料容器碎片,蓝色网帘和鱼线等,经红外分析多为 PE、PET 或 PP 制品. 此外,还有许多碎裂的白色泡沫垃圾被丢弃在海滩上,为 PS 材质,与本研究中分离出的许多白色发泡类形态类似. 由此可以推测,潮滩沉积物中微塑料与近岸海域环境存在关联.

海州湾潮滩沉积物中微塑料丰度为(0.49 ± 0.17) $n\cdot g^{-1}$,与近岸沉积物中微塑料的丰度[(0.33 ± 0.26) $n\cdot g^{-1}$]相似. 通过查阅国内外对沿海滩涂沉积物中微塑料的相关研究,以同样的粒径 <5 mm 计数、以 $n\cdot g^{-1}$ 为单位计量,与海州湾潮滩沉积物中微塑料丰度进行比较(表 3). 发现海州湾潮滩沉积物中微塑料污染虽然低于南海的 6 个海滩[31](13.88 $n\cdot g^{-1}$),但对比渤海辽东湾[32](0.128 $n\cdot g^{-1}$)和恰巴哈尔海湾[35](0.26 ± 0.017) $n\cdot g^{-1}$ 等而言,仍旧处于较高水平,并远高于厦门湾[33](0.028 ~ 0.31 $n\cdot g^{-1}$). 与同样以养殖业和旅游业作为经济支柱产业的沿岸区域相比,海州湾略低于印度本地治里海岸[36],但稍高于舟山海域[34]. 在 Dowarah 等[36]的研究中提出,旅游活动与微塑料丰度之间存在弱相关($r = 0.04$, $P = 0.932$),而养殖活动则与其存在较强的相关性($r = 0.92$, $P = 0.0103$). 考虑到海州湾是一个传统养殖海湾,该区域较高的微塑料丰度可能受到大规模海水养殖的影响. 王洪燕[34]在舟山附近的养殖海滩研究中发现,微塑料的丰度为(0.46 ± 0.18) $n\cdot g^{-1}$,与本研究中的丰度结果类似,并且,该研究中微塑料的主要材质同样为 PE、PET 和 PS 等渔业常用器具的材质. 海水养殖生产过程中,渔网、浮球、绳索和鱼线等塑料制品大量进入海洋环境并转化为微塑料[37,38]. 在山东半岛潮滩沉积物的调查中已经证明,海水养殖活动会提高其周边潮滩沉积物中微塑料的丰度[39]. 这表明密集的养殖活动是海州湾潮滩沉积物中微塑料丰度较高的重要原因. 此外,由于海州湾同时也是连云港港口所在区域,临洪河和善后河等河流从此处入海,来往船舶[40]、生活垃圾[41]和河流输入[42]同样可能是影响海州湾区域微塑料丰度的原因.

表 3 不同地区沉积物中微塑料丰度

Table 3 Microplastic abundance in sediments of different regions

研究区域	沉积物种类	微塑料丰度 /$n\cdot g^{-1}$	主要形态	主要材质	文献
海州湾	近岸	0.33 ± 0.26	纤维	PE 和 PET	[30]
南海	海滩	13.88	颗粒和纤维	PP 和 PE	[31]
渤海	海滩	0.128	—	PE	[32]
厦门湾	海滩	0.028 ~ 0.31	碎片、泡沫	PE 和 PS	[33]
舟山	海滩	0.46 ± 0.18	纤维	PET、PS 和 PE	[34]
恰巴哈尔海湾(伊朗)	海滩	0.26 ± 0.017	碎片和纤维	PE	[35]
本地治里(印度)	海滩	0.72 ± 0.19	碎片	PP 和 PE 等	[36]
海州湾	海滩	0.49 ± 0.17	纤维	PE 和 PET	本研究

3.2 海州湾沙蚕中微塑料污染水平

沙蚕中发现的塑料形态多为黑色或蓝色小纤维,与沉积物中相似,丰度为(6.68 ± 2.21) $n\cdot ind^{-1}$ 或(9.57 ± 9.32) $n\cdot g^{-1}$. Missawi 等[43]在南地中海海岸的沉积物研究中发现,沙蚕会摄入一定量的微塑料,丰度仅为 0.2 ~ 1.9 $n\cdot g^{-1}$. 而 Bour 等[44]在挪威奥斯陆峡湾的研究中发现,沙蚕中微塑料的丰度为 2 $n\cdot ind^{-1}$,孔雀缨鳃蚕中微塑料的丰度仅为 1 $n\cdot ind^{-1}$. 本研究中沙蚕体内微塑料的含量处于较高水平.

在潮滩环境中,行动能力较弱、分布广泛的贝类通常被作为微塑料指示生物. 由于沙蚕乃至环节动物门的相关研究较少,本文选择了同一生境中经常被建议作为微塑料指示生物的其它物种进行比较(表 4). 沙蚕中微塑料含量与中国沿海贻贝中的微塑料丰度(5 ~ 7.6 $n\cdot ind^{-1}$)相近[45],低于加拿大野生贻贝中微塑料的含量[48],而远高于中国太湖和象山湾的双壳类研究[46,47]. 同样作为潮间带常见物种,贻贝等双壳类属于滤食性生物,而沙蚕属于沉积食性,二者摄食行为的不同或许是影响微塑料摄入的原因之一. 对潮间带生物而言,微塑料丰度的影响因素并不是单一的[45],传统研究表明,微塑料在不同生物体内存在差异,沙蚕与双壳类生物微塑料污染水平差异或与微塑料滞留时间有关. 沙蚕对沉积物中的微塑料进行无区别的摄入,而更多的微塑料累积会影响沙蚕的代谢过程,导致更长的肠道滞留时间[49].

表 4　不同地区底栖生物中微塑料丰度

Table 4　Microplastic abundance in benthos of different regions

研究区域	生物物种	微塑料丰度	粒径范围/mm	文献
南地中海海岸	沙蚕 *Hediste diversicolor*	0.2 ~ 1.9 $n \cdot g^{-1}$	0 ~ 3	[43]
挪威奥斯陆峡湾	沙蚕 *Hediste diversicolor*	2 $n \cdot ind^{-1}$	0.041 ~ 9	[44]
挪威奥斯陆峡湾	孔雀缨鳃蚕 *Sabella pavonina*	1 $n \cdot ind^{-1}$	0.041 ~ 9	[44]
中国沿海	贻贝 *M. edulis*	5 ~ 7.6 $n \cdot ind^{-1}$	0 ~ 5	[46]
象山湾	缢蛏 *Sinonovacula constricta*	(1.8 ± 0.34) $n \cdot ind^{-1}$	0 ~ 3	[47]
中国太湖	亚洲蛤 *Corbicula fluminea*	0.4 ~ 5.0 $n \cdot ind^{-1}$	0.021 ~ 4.83	[45]
哈利法克斯港	贻贝 *Mytilus edulis*	34 ~ 178 $n \cdot ind^{-1}$	0.008 ~ 5	[48]
海州湾	沙蚕科	(6.68 ± 2.21) $n \cdot ind^{-1}$ 或 (9.57 ± 9.32) $n \cdot g^{-1}$	0 ~ 5	本研究

3.3　沙蚕生物体内微塑料及对沉积物中微塑料的指示作用

有研究表明海洋生物会摄入环境中的微塑料[7, 50]，并提供了底栖生物摄入微塑料的相关佐证[51~53]. 如 Muller-Karanassos 等[53]的研究中提出，沙蚕会摄取沉积物中的防污油漆颗粒(0.5 ~ 2 mm). 本研究发现，沙蚕中微塑料的材质主要为 PE (42.86%)和 PET(23.21%)，这同时也是潮滩沉积物中出现频率最高的微塑料材质. 沙蚕中微塑料与潮滩沉积物中 0 ~ 3 mm 粒径范围内的微塑料在丰度上具有正相关，其形态和材质同样存在相关性. 由此推测，沙蚕摄取微塑料的主要来源是潮滩沉积物，并主要摄取 0 ~ 3 mm 粒径范围内的微塑料. Missawi 等[43]在南地中海的研究中同样指出沙蚕会摄取沉积物中 0 ~ 3 mm 的微塑料，并进一步表明，沙蚕对微塑料粒径的选择受到过氧化氢酶的影响，与其体内的氧化作用有关.

有研究指出，海洋物种可以作为指示生物对微塑料污染积累和影响提供支持[54]. 目前微塑料指示生物研究多集中于海洋水体环境，对沉积物，尤其是潮滩沉积物中的生物研究较少. Li 等[45]的研究中提出，贻贝可以富集环境中的微塑料，并提出贻贝或许可以作为微塑料污染的指示生物. 也有研究认为，斑马鱼[22]、浒苔[55]和浮游动植物[56]同样考虑作为微塑料污染的指示种. Wang 等[57]的研究发现，底栖生物中微塑料的含量与沉积环境呈正相关，为底栖生物作为微塑料污染的指标提供了研究方向.

然而，需要特别指出的是，底栖生物摄入微塑料的行为取决于微塑料的形态大小等特征与相关物种的摄食习惯[58]. 因此，在指示种的选择中，应充分考虑其生态特征与对微塑料的选择性. 沙蚕的消化管是一条直管，其口、咽、食道、胃肠和肛门笔直连通，由食道中微小的颚齿对摄入的沙石和泥土等进行磨碎，并利用食道腺分泌的消化液消化，每隔约 40 min 进行一次排泄，排出无法消化的摄入物. 在这一过程中，微塑料会随着沙石和泥土进入沙蚕体内，一部分经过简单的生物降解后再被排出体外. 但同时，许多物种的研究中发现，存在微塑料在生物器官中滞留的现象[59~61]. 因此认为，沙蚕与沉积物中的微塑料存在交换现象，且会随着不断的进食在体内积累微塑料，在一定程度上能够反映其所在沉积环境中微塑料的污染状况.

此外，Su 等[46]在微塑料的指示生物研究中指出，应该考虑生物分布范围与生物总量等因素. 全球范围内，沙蚕从潮间带上部到深海底均有分布[62]，其作为鱼类、虾蟹类和海鸟类的饵料，在生态系统中具有重要作用. 20 世纪 80 年代初，江苏省春季和秋季的沙蚕总资源量分别达到2 291 t和2 522 t. 此后，随着环境恶化该数据有所下降，但沙蚕仍旧是潮滩沉积环境中的优势物种[24]. 这表明从生理特性和物种密度两方面而言，沙蚕基本具备作为沉积物中微塑料污染的指示种的条件，对沉积物中小于 3 mm 粒径的微塑料丰度和相关特征存在指示作用，可考虑作为微塑料污染的指示物种.

4　结论

(1)海州湾潮滩沉积物中微塑料丰度为(0.49 ± 0.17) $n \cdot g^{-1}$，与国内外其它区域相比，这一微塑料丰度水平相对较高. 经过比较，海州湾沙蚕中微塑料的丰度也高于其它区域的潮间带生物. 考虑到采样区域均为养殖海滩，密集的海水养殖产业或为微塑料富集的原因之一，沙蚕特殊的摄食行为也有一定的贡献量.

(2)52 个沙蚕个体中，43 个检出微塑料，平均丰度为(6.68 ± 2.21) $n \cdot ind^{-1}$. 沙蚕中微塑料的丰度与其生物质量呈显著正相关. 沙蚕中检出的微塑料以黑色和蓝色纤维为主，主要材质为 PE、PET 和 Rayon. 高质量组沙蚕和低质量组沙蚕之间存在形态和颜色上的区别.

(3)沙蚕与潮滩沉积物中 0 ~ 3 mm 微塑料的丰度、形态和材质均呈现显著相关，本研究认为沙蚕会摄取沉积物中 0 ~ 3 mm 的微塑料. 考虑到沙蚕的生

理特性和广泛分布等特征,建议将沙蚕作为微塑料污染的指示生物的考虑物种,并进一步开展微塑料污染指示生物的选择研究.

参考文献:

[1] Plastics Europe. Plastics-the Facts 2018: an analysis of European plastics production, demand and waste data [R]. Brussels: Plastics Europe, 2019. 1-33.

[2] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, *et al*. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250, 000 tons afloat at sea[J]. PLoS One, 2014, **9**(12), doi: 10.1371/journal.pone.0111913.

[3] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat [J]. Environmental Research, 2008, **108**(2): 131-139.

[4] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, *et al*. Plastic debris in the open ocean [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(28): 10239-10244.

[5] Shim W J, Thomposon R C. Microplastics in the ocean[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2015, **69**(3): 265-268.

[6] Koelmans A A, Besseling E, Shim W J. Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review [A]. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M, (Eds.). Marine Anthropogenic Litter [M]. Cham: Springer, 2015. 325-340.

[7] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al*. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838.

[8] Qiu Q X, Peng J P, Yu X B, *et al*. Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: first observation on sediment of China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **98**(1-2): 274-280.

[9] Desforges J P W, Galbraith M, Dangerfield N, *et al*. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **79**(1-2): 94-99.

[10] Lusher A L, Tirelli V, O'connor I, *et al*. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep14947.

[11] Lebreton L C M, Van Der Zwet J, Damsteeg J W, *et al*. River plastic emissions to the world's oceans [J]. Nature Communication, 2017, **8**, doi: 10.1038/ncomms15611.

[12] Liebezeit G, Dubaish F. Microplastics in beaches of the East Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **89**: 213-217.

[13] Graca B, Szewc K, Zakrzewska D, *et al*. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea-a preliminary study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(8): 7650-7661.

[14] Claessens M, De Meester S, Van Landuyt L, *et al*. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(10): 2199-2204.

[15] Kanhai L D K, Gardfeldt K, Krumpen T, *et al*. Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean[J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-61948-6.

[16] Van Cauwenberghe L, Vanreusel A, Mees J, *et al*. Microplastic pollution in deep-sea sediments [J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 495-499.

[17] Feng Z H, Zhang T, Li Y, *et al*. The accumulation of microplastics in fish from an important fish farm and mariculture area, Haizhou Bay, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133948.

[18] Von Moos N, Burkhardt-Holm P, Köhler A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(20): 11327-11335.

[19] Li H X, Ma L S, Lin L, *et al*. Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 619-625.

[20] Feng Z H, Wang R, Zhang T, *et al*. Microplastics in specific tissues of wild sea urchins along the coastal areas of northern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138660.

[21] Kolandhasamy P, Su L, Li J N, *et al*. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: a novel way to uptake microplastics beyond ingestion [J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.053.

[22] Lei L L, Wu S Y, Lu S B, *et al*. Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 1-8.

[23] Baztan J, Jorgensen B, Pahl S, *et al*. Fate and impact of microplastics in marine ecosystems[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017. 56.

[24] 黄猛, 陈百尧, 龚琪本. 不容忽视的海水增养殖资源——沙蚕[J]. 中国渔业经济, 2002, (1): 44-45.
Huang M, Chen B X, Gong Q B. Disapproving to neglect the resource of marine aquaculture and enhancement—nereis [J]. Chinese Fisheries Economics, 2002, (1): 44-45.

[25] Buffet P E, Tankoua O F, Pan J F, *et al*. Behavioural and biochemical responses of two marine invertebrates *Scrobicularia plana* and *Hediste diversicolor* to copper oxide nanoparticles[J]. Chemosphere, 2011, **84**(1): 166-174.

[26] 王宝灿, 虞志英, 刘苍字, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向[J]. 海洋学报, 1980, **2**(1): 79-96.
Wang B C, Yu Z Y, Liu C Y, *et al*. The change of coasts and beaches and the movement of longshore sediments of Haizhou Bay [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1980, **2**(1): 79-96.

[27] Karami A, Golieskardi A, Choo C K, *et al*. A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish[J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 485-494.

[28] Jiang Y, Zhao Y N, Wang X, *et al*. Characterization of microplastics in the surface seawater of the South Yellow Sea as affected by season[J]. Science of the Total Environment, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138375.

[29] 冉文, 滕佳, 刘永亮, 等. 环渤海潮间带长牡蛎微塑料富集特征研究[J]. 海洋通报, 2018, **37**(5): 583-590.
Ran W, Teng J, Liu Y L, *et al*. Microplastic ingestion characteristics in the Pacific oysters collected from the intertidal zone of the Bohai Rim[J]. Marine Science Bulletin, 2018, **37**(5): 583-590.

[30] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3212-3221.
Li Z, Gao C M, Yang J L, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in surface water and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3212-3221.

[31] Zhao S Y, Zhu L, Li D J. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the South China Sea[J]. Regional Studies in Marine Science, 2015, **1**: 55-62.

[32] Yu X B, Peng J P, Wang J D, *et al*. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 722-730.

[33] 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 等. 厦门湾海滩微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1217-1221.
Liu Q M, Liang H T, Xi G L, *et al*. Microplastic pollution of the beaches in Xiamen Bay, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1217-1221.

[34] 王洪燕. 舟山养殖海域沉积物和海产品体内微塑料污染特征[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019. 12-21.
Wang H Y. Microplastics Pollution of marine sediments and seafood in Zhoushan aquaculture sea area[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019. 12-21.

[35] Hosseini R, Sayadi M H, Aazami J, *et al*. Accumulation and distribution of microplastics in the sediment and coastal water samples of Chabahar Bay in the Oman Sea, Iran[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111682.

[36] Dowarah K, Devipriya S P. Microplastic prevalence in the beaches of Puducherry, India and its correlation with fishing and tourism/recreational activities[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **148**: 123-133.

[37] 熊宽旭, 赵新月, 周倩, 等. 黄海桑沟湾水体及沉积物中微塑料污染特征研究[J]. 海洋环境科学, 2019, **38**(2): 198-204, 220.
Xiong K X, Zhao X Y, Zhou Q, *et al*. The pollution characteristics of microplastics in the water and sediments of Sanggou bay in the Yellow Sea[J]. Marine Environmental Science, 2019, **38**(2): 198-204, 220.

[38] Feng Z H, Zhang T, Wang J X, *et al*. Spatio-temporal features of microplastics pollution in macroalgae growing in an important mariculture area, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137490.

[39] Zhou Q, Zhang H B, Fu C C, *et al*. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Geoderma, 2018, **322**: 201-208.

[40] Chouchene K, Da Costa J P, Wali A, *et al*. Microplastic pollution in the sediments of Sidi Mansour Harbor in Southeast Tunisia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **146**: 92-99.

[41] 周倩. 典型滨海潮滩及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016. 5-7.
Zhou Q. Occurrences and ecological risks of microplastics in the typical coastal beaches and seas[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2016. 5-7.

[42] Schmidt C, Krauth T, Wagner S. Export of plastic debris by rivers into the sea[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(21): 12246-12253.

[43] Missawi O, Bousserrhine N, Belbekhouche S, *et al*. Abundance and distribution of small microplastics (≤3 μm) in sediments and seaworms from the Southern Mediterranean coasts and characterisation of their potential harmful effects[J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114634.

[44] Bour A, Avio C G, Gorbi S, *et al*. Presence of microplastics in benthic and epibenthic organisms: Influence of habitat, feeding mode and trophic level[J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1217-1225.

[45] Li J N, Qu X Y, Su L, *et al*. Microplastics in mussels along the coastal waters of China[J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 177-184.

[46] Su L, Cai H W, Kolandhasamy P, *et al*. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems[J]. Environmental Pollution, 2018, **234**: 347-355.

[47] Wu F Z, Wang Y J, Leung J Y S, *et al*. Accumulation of microplastics in typical commercial aquatic species: a case study at a productive aquaculture site in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135432.

[48] Mathalon A, Hill P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **81**(1): 69-79.

[49] Wright S L, Rowe D, Thompson R C, *et al*. Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms[J]. Current Biology, 2013, **23**(23): R1031-R1033.

[50] Digka N, Tsangaris C, Torre M, *et al*. Microplastics in mussels and fish from the northern Ionian Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **135**: 30-40.

[51] Van Cauwenberghe L, Claessens M, Vandegehuchte M B, *et al*. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats[J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 10-17.

[52] Davidson K, Dudas S E. Microplastic ingestion by wild and cultured Manila clams (*Venerupis philippinarum*) from Baynes Sound, British Columbia[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, **71**(2): 147-156.

[53] Muller-Karanassos C, Arundel W, Lindeque P K, *et al*. Environmental concentrations of antifouling paint particles are toxic to sediment-dwelling invertebrates[J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115754.

[54] Baztan J, Jorgensen B, Pahl S, *et al*. Fate and impact of microplastics in marine ecosystems[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017. 127-128.

[55] Feng Z H, Zhang T, Shi H H, *et al*. Microplastics in bloom-forming macroalgae: Distribution, characteristics and impacts[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **397**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122752.

[56] Sun X X, Li Q J, Zhu M L, *et al*. Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **115**(1-2): 217-224.

[57] Wang J, Wang M X, Ru S G, *et al*. High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 1661-1669.

[58] Van Franeker J A, Blaize C, Danielsen J, *et al*. Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar Fulmarus glacialis in the North Sea[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2609-2615.

[59] Ohkubo N, Ito M, Hano T, *et al*. Estimation of the uptake and gut retention of microplastics in juvenile marine fish: Mummichogs (*Fundulus heteroclitus*) and red seabreams (*Pagrus major*)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111630.

[60] Yu S P, Nakaoka M, Chan B K K. The gut retention time of microplastics in barnacle naupliar larvae from different climatic zones and marine habitats[J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115865.

[61] Crooks N, Parker H, Pernetta A P. Brain food? Trophic transfer and tissue retention of microplastics by the velvet swimming crab (*Necora puber*)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2019, **519**, doi: 10.1016/j.jembe.2019.151187.

[62] Hurley R R, Woodward J C, Rothwell J J. Ingestion of microplastics by freshwater tubifex worms[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(21): 12844-12851.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 9

Sep. 15, 2021

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of $PM_{2.5}$ and O_3 in Beijing, from 2014 to 2020 ····· CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)

High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in $PM_{2.5}$ Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, *et al.* (4083)

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter ····· SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, *et al.* (4095)

Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols ····· WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, *et al.* (4104)

Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan ····· ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, *et al.* (4116)

Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm ····· WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, *et al.* (4126)

Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of $PM_{2.5}$-bound Metals in Xinxiang ····· LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, *et al.* (4140)

Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea ····· YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, *et al.* (4151)

Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin ····· LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, *et al.* (4158)

Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China ····· HE Chao, MU Hang, YANG Lu, *et al.* (4168)

Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai ····· ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, *et al.* (4180)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta ····· YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, *et al.* (4191)

Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin ····· KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, *et al.* (4202)

Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years ····· CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, *et al.* (4211)

Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province ····· ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, *et al.* (4222)

Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin ····· ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, *et al.* (4234)

Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula ····· SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, *et al.* (4246)

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area ····· XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, *et al.* (4257)

Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes ····· REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, *et al.* (4267)

Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou ····· BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, *et al.* (4275)

Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park ····· LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)

Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism ····· QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, *et al.* (4296)

Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands ····· MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, *et al.* (4304)

Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment ····· TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, *et al.* (4311)

Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, *et al.* (4319)

Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff ····· MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)

Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone ····· WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, *et al.* (4341)

Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of *Scenedesmus obliquus* ····· WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)

Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment ····· WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, *et al.* (4358)

Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation ····· LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, *et al.* (4366)

Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process ····· CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, *et al.* (4374)

Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System ····· ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, *et al.* (4383)

Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System ····· YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, *et al.* (4390)

Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration ····· LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, *et al.* (4399)

Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage ····· WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, *et al.* (4406)

Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China ····· ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, *et al.* (4414)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau ····· DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, *et al.* (4422)

Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area ····· ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)

Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter ····· WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, *et al.* (4441)

Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System ····· ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, *et al.* (4452)

Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium ····· WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)

Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in *Solanum nigrum* L. ····· PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, *et al.* (4471)

Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions ····· LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, *et al.* (4481)

High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau ····· LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)

Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area ····· SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, *et al.* (4500)

Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities ····· MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, *et al.* (4510)

Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms ····· LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, *et al.* (4520)

Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland ····· HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, *et al.* (4527)

Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N_2O Emission from Potted Maize ····· FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, *et al.* (4538)

Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH_4^+-N Loaded Biochar ····· MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, *et al.* (4548)

Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard ····· ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, *et al.* (4558)

Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China: 1985-2019 ····· WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, *et al.* (4566)