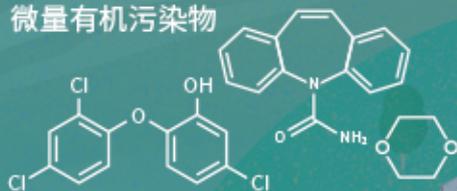


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 携带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
 天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
 南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
 太湖流域上游南苕溪水体夏季二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)
 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
 CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
 pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
 超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
 S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
 连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
 嗜热脂肪地芽胞杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)
 罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

嗜热脂肪地芽胞杆菌对聚苯乙烯的降解性能

邢睿智¹, 赵子强¹, 赵文琪¹, 陈志^{1*}, 陈金凤², 周顺桂¹

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 中国检验认证集团福建有限公司, 福州 350002)

摘要: 微生物降解是废旧聚苯乙烯塑料 (polystyrene, PS) 最具持续性的处理方法。嗜热微生物具有较高的生物转化效率, 可有效促进有机固废的降解, 然而目前对嗜热微生物介导的 PS 塑料降解缺乏深入地研究。本文以堆肥中分离的 1 株嗜热脂肪地芽胞杆菌-FAFU011 菌株 (*Geobacillus stearothermophilus* FAFU011) 为研究对象, 分析其对 PS 的降解性能及机制。结果表明, FAFUA011 可以将 PS 作为碳源进行生长, 并在其表面形成稳定的生物膜; 经过 56 d 的处理后, FAFUA011 可使 PS 塑料膜的质量下降 4.2%, 重均分子质量和数均分子质量分别降低 17.4% 和 18.2%; SEM 分析表明, FAFUA011 可造成 PS 表面产生侵蚀坑洞; XPS 和接触角分析结果表明, 经过 FAFUA011 的作用, 增加了 PS 表面含氧结构的种类和数量, 并改变了 PS 表面的亲水性能, 从而有利于微生物在 PS 塑料表面的定殖, 并进一步促进 PS 生物降解; 基于 2D-COS 分析, 确定了 PS 降解过程中官能团随时间变化的顺序为: $1491\text{ cm}^{-1}(\text{C—H}) > 1450\text{ cm}^{-1}(\text{C—H}) > 1601\text{ cm}^{-1}(\text{C}=\text{C}) > 1027\text{ cm}^{-1}(\text{C—O}) > 1068\text{ cm}^{-1}(\text{C}=\text{O}) > 1366\text{ cm}^{-1}(\text{C—OH})$ 。本研究结果表明 FAFU011 能够促进 PS 塑料的嗜热生物氧化降解。

关键词: 聚苯乙烯; 嗜热菌; 降解; 二维相关性分析; 生物氧化

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3056-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009298

Biodegradation of Polystyrene by *Geobacillus stearothermophilus*

XING Rui-zhi¹, ZHAO Zi-qiang¹, ZHAO Wen-qi¹, CHEN Zhi^{1*}, CHEN Jin-feng², ZHOU Shun-gui¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. China Certification & Inspection Group Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: Biodegradation is the most sustainable treatment method for waste polystyrene (PS). Thermophiles possess highly efficient biotransformation capabilities that could enhance the biodegradation efficiency of organic solid wastes. However, detailed research on the degradation of PS plastics by thermophile is scarce. Here, the degradation performance of a strain of *Geobacillus stearothermophilus* FAFU011 (FAFUA011) isolated from compost was examined. The results showed that strain FAFUA011 could utilize PS as the sole carbon source for growth and formed a stable biofilm on the surface of PS fragments. During 56 days of degradation, FAFU011 caused a total mass loss of PS of 4.2% and decrease in molecular weight of 17.4%-18.2%. Based on SEM observations, FAFUA011 causes erosion hollows on the surface of PS, thus increasing the type and number of oxygen-containing structures that alter its hydrophilic properties. These changes facilitate the colonization of other microorganisms and further promote biodegradation. Based on 2D-COS analysis, the chronological order of the change in functional groups during the degradation process were identified as follows: $1491\text{ cm}^{-1}(\text{C—H}) > 1450\text{ cm}^{-1}(\text{C—H}) > 1601\text{ cm}^{-1}(\text{C}=\text{C}) > 1027\text{ cm}^{-1}(\text{C—O}) > 1068\text{ cm}^{-1}(\text{C}=\text{O}) > 1366\text{ cm}^{-1}(\text{C—OH})$. Overall, these results reveal that FAFU011 could promote the thermophilic bio-oxidative degradation of PS plastic.

Key words: polystyrene; thermophile; degradation; 2D correlation analysis; bio-oxidation

聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 具有良好的可塑性以及稳定性, 主要用途为各类工业品外壳和绝缘材料等, 被广泛应用于建筑、制造和包装等诸多领域^[1-3]。据统计 2015 年全球 PS 产量为 2 500 万 t, 而同年产生的 PS 废料为 1 700 万 t, 回收率不足 40%^[4,5]。大量的 PS 沦为废弃物, 并在陆地、海洋甚至空气中不断累积, 是构成“白色污染”的主要来源^[6-8]。此外, 环境中废弃的 PS 可沦为有毒有害物质、微生物和持久性有机污染物的良好载体, 对生态环境造成破坏, 威胁人类及动物的生命安全^[9-13]。因此, 如何妥善且有效地处理 PS 废弃物, 已成为全世界有待解决的环境问题。

传统处理废弃 PS 的方法主要包括焚烧、填埋和物理化学回收利用等^[14,15]。但这些方法存在着二次污染、处置不彻底和处理成本高等缺点^[16]。而生

物降解是一种环境友好型的处理方法, 利用昆虫或微生物的取食及代谢过程, 将塑料及其他有机废弃物转化为水和二氧化碳等产物, 经济有效且无二次污染^[17-19]。有研究表明, 蜡螟 (*Galleria mellonella*) 幼虫能够快速啃食并高效降解聚乙烯 (polyethylene, PE) 塑料袋, 生成乙二醇^[20]。黄粉虫 (*Tenebrio molitor*) 能够对聚苯乙烯发泡塑料进行取食和降解, 降低其相对分子质量, 并改变其分子结构^[18,21]。然

收稿日期: 2020-09-30; 修订日期: 2020-11-26

基金项目: 福建农林大学校杰青项目 (xjq201904); 福建省自然科学基金项目 (2018J05039, 2020J01564); 福建省土壤环境健康与调控重点实验室开放基金项目 (2020FRKLSHR02); 福建农林大学科技创新专项 (CXZX2020068A)

作者简介: 邢睿智 (1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业环境保护和固体废弃物资源化, E-mail: 13799964441@163.com

* 通信作者, E-mail: chen_zhi0529@163.com

而,随着进一步的研究发现,导致塑料降解的主要原因是寄生在昆虫肠道内的微生物群落^[17,18].有学者在蜡虫和黄粉虫的肠道中分离获得 *Bacillus* sp. YP1、*Enterobacter asburiae* YT1 和 *Exiguobacterium* sp. YT2 菌株,这些微生物能够以 PE 或 PS 作为碳源进行生长,并将其降解成低分子物质^[17,21].同时,陈冠舟等^[22]的研究发现黄粉虫肠道微生物菌群具有 17 个与芳香族化合物和烷烃降解相关功能基因,进一步从基因学的角度证实了微生物在塑料降解过程中具有重要作用.

高温氧化处理,可以促使废弃塑料中 C—C 结构的断裂,C—O 和 C=O 结构的增加,从而提高 PS 塑料的生物可降解性^[23~25].嗜热微生物广泛存在于堆肥、火山和温泉等高温环境中,具有热稳定性好和生物转化效率高等特点,能够促进有机污染物的高效降解^[26].然而,目前对嗜热微生物介导的 PS 塑料降解还缺乏深入研究.本文以 1 株从超高温堆肥中筛选出的嗜热菌为研究对象,探究其在高温环境下对 PS 的降解性能及降解过程中 PS 表面结构的变化,以期利用嗜热微生物发展高效塑料降解技术奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试菌源

嗜热脂肪地芽胞杆菌-FAFU011 菌株 (*Geobacillus stearothermophilus* FAFU011) 由本实验室从北京顺义污水处理厂超高温堆肥腐熟料中筛选,保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心,保藏号为 CGMCC No. 15303.

1.2 供试聚苯乙烯塑料

由于无市售 PS 薄膜样品,本实验采用的 PS 样品为本实验室自制.将中国石化福建分公司出售的聚苯乙烯发泡塑料溶解于二甲苯(阿拉丁试剂上海有限公司,分析纯)中,配置浓度为 $3.0 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合溶液^[17],均匀倒在玻璃平板上,干燥 48 h 后将 PS 膜揭下,并用甲醇浸泡清洗薄膜表面残留的二甲苯,经去离子水超声洗涤后,裁剪至 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的大小以供使用.在实验前,所有样品均使用 75% 乙醇(国药集团化学试剂有限公司,分析纯)溶液浸泡灭菌 20 min,再用无菌水清洗和风干后备用.

1.3 培养基的制备

菌体富集培养基^[27](国药集团化学试剂有限公司,分析纯): $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 酵母提取物、 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4SO_4 和 10 mL 微量元素 ($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4 \cdot$

$5\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

液体无碳矿物盐培养基^[17](LCFBM, 国药集团化学试剂有限公司,分析纯): $0.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 、 $0.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2HPO_4 、 $0.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4NO_3 、 $5.0 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $1.0 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 所有培养基均经过 121°C 的高压灭菌 20 min.

1.4 实验过程

首先,将 FAFU011 接种到以酵母提取物作为碳源的富集培养基中, $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 70°C 水浴摇床培养 48 h, 离心收集菌体,用生理盐水将菌体洗涤 3 次,去除菌体中代谢物和培养基,再将菌体用生理盐水进行重悬,制成浓度为 $1 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的菌悬液.取 2 mL 的菌悬液接种到含有 100.0 mg PS 样品的 LCFBM 培养基中,其中 PS 作为底物提供碳源,并放置到 70°C 的环境中进行培养.对照组中不接种菌液其他条件相同.

设置 5 组与上述 PS 降解实验相同的平行体系,每周对培养基中的 PS 进行采集并测定,共观测 8 周.

1.5 实验方法

1.5.1 激光共聚焦显微镜观察

采集不同时期 LCFBM 培养基中的 PS 样品,利用 Live/Dead BacLight Bacterial Viability Kit 试剂盒(美国赛默飞世尔公司)对 PS 样品进行染色,避光静置 15 min 后,利用激光共聚焦显微镜(LSCM, LMS 880, 德国 Carl Zeiss 公司)观察 PS 表面生物膜上细菌的活性.

1.5.2 分子质量分析

取 20.0 mg PS 样品,用四氢呋喃(阿拉丁试剂上海有限公司,分析纯)溶解,放置到 90°C 的水浴中萃取 12 h,萃取液用旋转蒸发器蒸馏至 5.0 mL,经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后放置到凝胶渗透色谱仪[GPC, V2000, 沃特世(上海)有限公司]中测定 PS 的重均分子质量(M_w)和数均分子质量(M_n).

1.5.3 PS 表面形貌和化学组分分析

采集处理 56 d 后 LCFBM 培养基中对照组和有菌组的 PS 样品.将一部分的 PS 样品放入 2.5% 戊二醛溶液(阿拉丁试剂上海有限公司,分析纯)中固定 6 h,固定完成后用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸盐缓冲液冲洗 20 min,然后分别加入到 10%、30%、50%、70%、90% 和 100% 的乙醇中梯度脱水 15 min; 经过干燥后,将 PS 样品固定在导电胶上进行喷金,利用

扫描电子显微镜 (SEM, Ultima IV, 日本株式会社理化学公司) 观察 PS 表面形貌的变化. 另一部分 PS 样品放置到十二烷基磺酸钠 (SDS, 阿拉丁试剂上海有限公司, 分析纯) 水溶液中, 并利用超声波清洗仪 (KQ-400KDE, 中国昆山市超声仪器有限公司) 进行处理, 去除其表面生物膜及微生物分泌物等杂质, 经无菌水洗净烘干后, 利用水接触角测定仪 (WCA, DSA30, 德国 KRUSS 公司) 测定 PS 表面的疏水性能. 利用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, ESCALAB 250, 美国 VG 公司) 测定表面化学结构.

1.5.4 PS 表面官能团分析

采集处理 0、14、28、32 和 56 d 的 PS 样品, 用 SDS 水溶液去除生物膜, 洗净干燥后用傅里叶变换红外光谱仪 (ATR/FTIR, iS 50 FT-IR, 美国赛默飞世尔公司) 收集 $500 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 波长范围处的红外光谱, 并基于二维相关性分析 (2D-COS) 判断 PS 表面官能团随时间变化的顺序.

2 结果与讨论

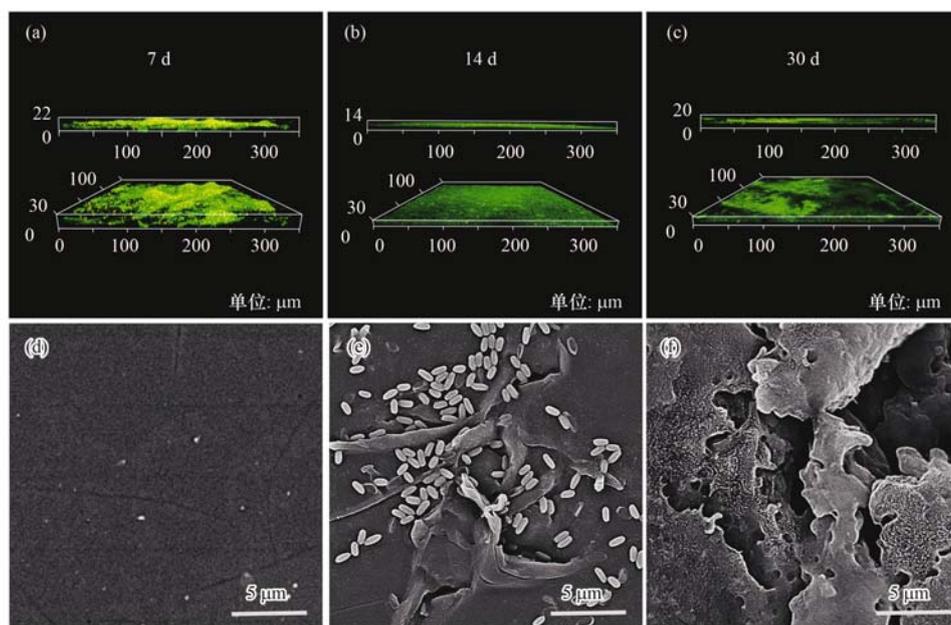
2.1 PS 表面生物膜观察及表面侵蚀形貌

为了探究 FAFU011 与 PS 培养过程中, FAFU011 的生长情况以及对 PS 表面形态造成的影响, 利用 LSCM 和 SEM 观察了 PS 表面生物膜的活性以及形貌变化. 在 LSCM 图中 [图 1(a)~1(c)], 红色代表死亡细菌, 绿色代表活体细菌. 结果表明, FAFU011 与 PS 培养的过程中, 可以利用 PS 作为碳源进行生长, 并在 PS 表面形成一层活性较高的生物

膜, 且在不同时期内, 始终保持着较高的活菌数. 利用 SEM 观察处理 56 d 后的 PS 表面形貌的变化, 结果如图 1(d)~1(f) 所示, 对照组中的 PS 表面 [图 1(d)] 没有明显的菌体, 仅在局部存在少量的细纹, 这可能是由于高温导致 PS 发生热裂解, 从而产生的细微裂痕; 而接种 FAFU011 的 PS 表面分布着大量密集的菌体 [图 1(e)], 并且原本平滑的 PS 表面也被侵蚀为层次分明并伴有微孔的坑洞结构 [图 1(f)]. LSCM 和 SEM 的结果共同说明, FAFU011 可以利用 PS 为碳源进行生长繁殖, 并对 PS 表面进行侵蚀, 致使 PS 表面的形貌发生改变.

2.2 PS 的降解效率分析

为了探究 FAFU011 对 PS 的降解情况, 以处理周期内 PS 的减重损失, 评估其降解效率. 结果如图 2(a) 所示, 在 56 d 的处理周期内, PS 的降解程度随着时间的延长而增加, 对照组中的 PS 样品有 1.0% 的质量下降, 这可能是由于 70°C 的高温环境所引起的; 接种 FAFU011 的 PS 样品有 4.2% 的质量下降, 相比对照组增加了 3.2%, 表明 FAFU011 可以促进 PS 的降解. 这个结果与 Kim 等^[28] 利用昆虫肠道内分离的 1 株假单胞菌降解 PS 的效率类似. 利用 GPC 进一步分析 FAFU011 对 PS 解聚性能的影响^[18], 结果如图 2(b) 所示. 所制备原始 PS 的 M_w 和 M_n 为 254 000 和 125 000, 经过高温处理后, 对照组中 PS 的 M_w 和 M_n 为 248 500 和 118 300, 分别下降 2.2% 和 5.4%. 这种现象的产生, 是由于高温造成了 PS 长链分子热裂解成为低分子物质导致的, 同时也解释了



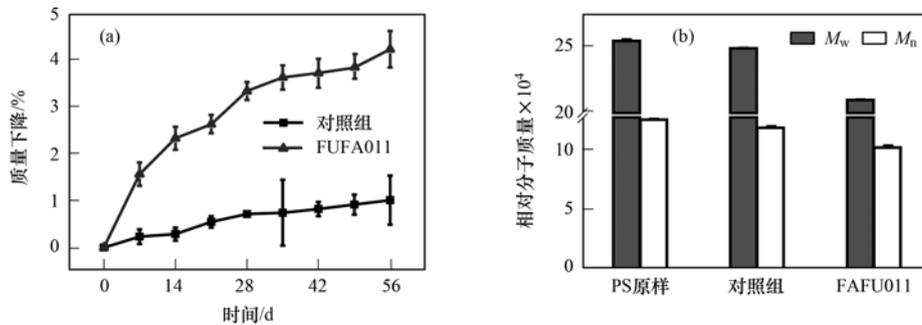
(a) 处理第 7 d, (b) 第 14 d, (c) 第 30 d 的 PS 表面生物膜情况, (d) 处理第 56 d 后对照组, (e) 和 (f) 处理第 56 d 后接菌组的 PS 表面形貌变化

图 1 利用激光共聚焦显微镜和扫描电子显微镜观察不同处理时期 PS 表面的生物膜及形貌

Fig. 1 PS surface biofilm and morphology after different culture periods visualized by CLSM and SEM

SEM 观察对照组中 PS 表面产生少量裂痕的原因。而经 FAFU011 处理后 PS 的 M_w 和 M_n 为 209 700 和 101 600, 与原始 PS 相比, M_w 和 M_n 分别下降 17.4% 和 18.2%, 与对照组相比, M_w 和 M_n 分别下降

14.1% 和 15.6%。重均分子质量和数均分子质量的下降进一步表明, FAFU011 对 PS 具有解聚或裂解的作用, 可以将 PS 分子的长链结构变为低分子质量的短链结构, 进而致使 PS 发生降解。



(a) 质量下降曲线, (b) 重均分子质量和数均分子质量的变化; mean \pm SD, $n = 5$

图2 FAFU011 对 PS 质量和分子质量的影响

Fig. 2 Change in the dry weight and average molecular weight of PS by FAFU011

2.3 PS 的化学变化分析

PS 表面的疏水性能是决定微生物定殖及可生物降解性的关键因素^[29,30]。为了探究 FAFU011 处理 PS 过程中对表面疏水性能的影响, 进行了水接触角测试, 结果如图 3(a) 所示。将 PS 表面生物膜及杂质完全去除后, FAFU011 处理后的 PS 表面水接触角为 $(72.7 \pm 0.7)^\circ$ ($n = 3$), 低于对照组的水接触角 $(84.3 \pm 0.9)^\circ$ ($n = 3$), 表明 FAFU011 具有改变 PS 表面的疏水性的能力, 增加其亲水性, 从而为微生物的定殖提供了更有利的环境, 有助于提高 PS 的生物降解性^[17,28,31]。这和 Kin 等^[28] 利用昆虫肠道微生物降解 PS, 导致其水接触角降低的研究结果类似。

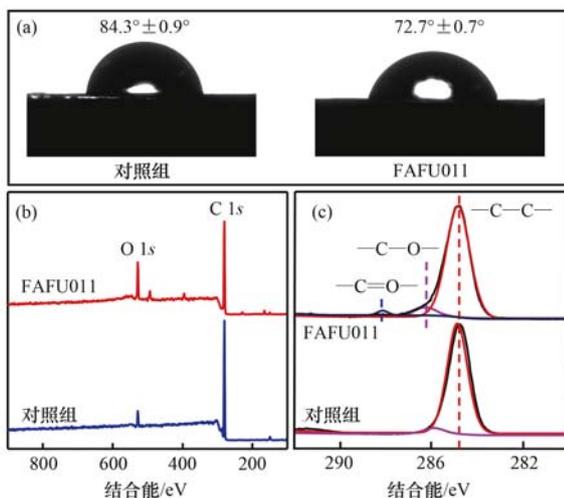
为了探究 FAFU011 对 PS 表面化学结构的影响, 利用 XPS 分析了 PS 表面的化学组分, 结果如图

3(b) 所示。对照组 PS 样品在 280.8 eV 位置上的 C1s 峰较为强烈, 而在 532.3 eV 位置上的 O1s 峰比较微弱。进一步对 PS 的 C1s 峰分析, 结果如图 3(c) 所示, 在 284.8 eV 和 286.2 eV 的位置, 分别代表 PS 分子长链结构中的 C—C 键和 C—O 键^[17,26,28]。经过 FAFU011 处理后, O1s 峰强度明显增加, 而 C1s 峰强度降低。对 C1s 进行分析表明, 在 288.2 eV 的位置产生了一个新的 C=O 键^[26]。另外, 被 FAFU011 处理后 PS 的 O/C 比值为 0.21, 远大于对照组 0.07, C—O 键和 C=O 键的相对峰面积也大于对照组 (表 1)。以上研究结果表明, FAFU011 处理 PS 的过程中, 具有改变 PS 化学结构的能力, 增加 PS 表面的含氧结构, 这也是 PS 表面水接触角降低的主要原因。

表 1 PS 表面化学成分的 O/C 比和 C 1s 中各峰的相对面积

Table 1 O/C atomic ratios and relative C 1s peak areas of PS surface chemical composition

样品	C/O	相对面积/%	
		C—C	C—O 和 C=O
对照组	0.07	88.55	11.45
FAFU011 处理组	0.21	84.67	15.33



(a) PS 表面水接触角的变化, (b) 和 (c) PS 表面的 XPS 谱图
图 3 对照组与接种 FAFU011 对 PS 表面化学结构的影响

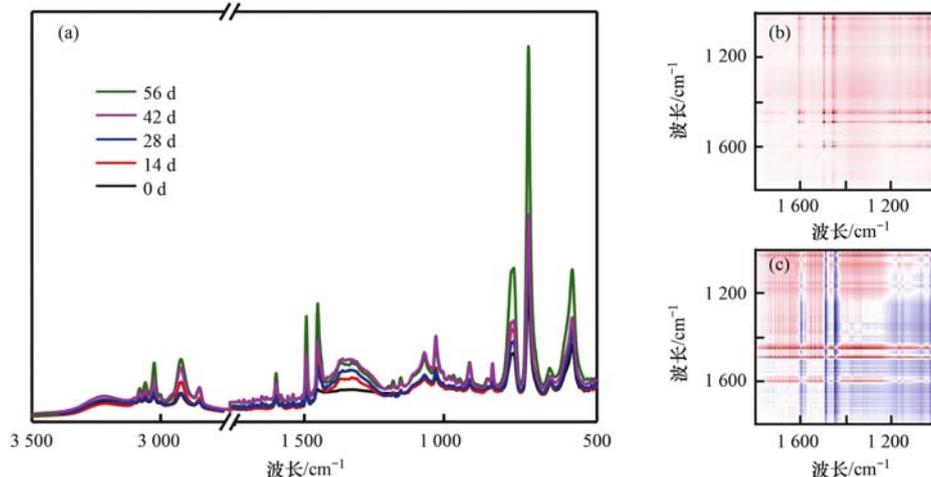
Fig. 3 WCA of PS the uninoculated control incubation and inoculated incubation surface and XPS spectra

为了进一步研究 FAFU011 处理 PS 的过程中, 对其表面官能团的影响, 利用 ATR/FTIR 光谱测定了不同处理时期 PS 表面官能团的变化情况, 结果如图 4(a) 所示。PS 的主要官能团集中在 $1800 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 区域, 其特征峰在 1601、1491、1450、1366、1068 和 1027 cm^{-1} 附近产生明显的振动。其中, 1601 cm^{-1} 处代表 PS 分子苯环上 C=C 结构, 1491 cm^{-1} 和 1450 cm^{-1} 处均代表 PS 分子中的 C—H 结构, 1366、1068 和 1027 cm^{-1} 处分别代表 PS 分子中 C—OH 结构、C=O 结构和 C—O 结

构^[1,29,32]. 其中, C—H 结构随着 FAFU011 处理 PS 的时间延长峰强不断增加, 这可能是由于 FAFU011 会破坏 PS 分子中的苯环, 使其断裂为 C—H 结构或从 PS 分子主链上脱落而导致的^[18,32,33]. 当 FAFU011 处理 PS 至 14 d 的时候, 在 $1\,366\text{ cm}^{-1}$ 的位置新增一个代表 C—OH 结构的特征峰, 并且随着处理时间的延长峰强不断增加. 这种现象的产生, 说明 C—OH 结构可能是由 FAFU011 降解 PS 产生的次生结构. 而 $1\,068\text{ cm}^{-1}$ 处 C=O 结构的峰强增加, 则表明 PS 的降解过程可能是氧化过程, 且产物可能为类羟基化合物^[17]. 这些结果表明 FAFU011 处理 PS 的过程, 会改变 PS 表面的结构, 增加 C—O、C=O 和 C—OH 含氧官能团. 而这些含氧官能团为亲水基团, 也是导致 PS 表面亲水性增强的原因, 从而促使 PS 更容易被 FAFU011 所定殖, 并通过微生物代谢持续对 PS 进行生物氧化降解^[26,28].

基于 2D-COS 分析, 对 FAFU011 处理 PS 过程中官能团随时间的变化顺序进行了探究. 同步光谱代表两个动态红外信号之间的协同程度, 结果如图 4(b) 所示. 在 $\Phi(V_1, V_2)$ 为 $(1\,601\text{ cm}^{-1}, 1\,601\text{ cm}^{-1})$ 、 $(1\,491\text{ cm}^{-1}, 1\,491\text{ cm}^{-1})$ 、 $(1\,450\text{ cm}^{-1},$

$1\,450\text{ cm}^{-1})$ 、 $(1\,366\text{ cm}^{-1}, 1\,366\text{ cm}^{-1})$ 、 $(1\,068\text{ cm}^{-1}, 1\,068\text{ cm}^{-1})$ 和 $(1\,027\text{ cm}^{-1}, 1\,027\text{ cm}^{-1})$ 处存在 6 个自相关峰, 表明谱带强度变化方向一致, 且它们所代表的官能团为 C=C、C—H、C—H、C—OH、C=O 和 C—O, 均是随着时间的增加而同步进行变化^[31]. 其中, 在 C=C 和 C—H 的强度变化较大, 这可能是在处理过程中 PS 分子中苯环的断裂或含有苯环的小分子从 PS 分子链上脱离导致的^[18,32,33]. 而异步光谱图 [图 4(c)] 可以揭示 PS 在降解过程中官能团特定的化学变化顺序, 当交叉峰 $\psi(V_1, V_2) > 0$ 时, 表明 V_1 发生变化的顺序位于 V_2 之前, 而当 $\psi(V_1, V_2) < 0$, 则 V_1 发生变化的顺序位于 V_2 之后^[32]. 如表 2 所示, $\psi(1\,027\text{ cm}^{-1}, 1\,601\text{ cm}^{-1})$ 和 $(1\,068\text{ cm}^{-1}, 1\,601\text{ cm}^{-1})$ 为负交叉峰, 意味着 $1\,601\text{ cm}^{-1}$ 处的官能团变化先于 $1\,027\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,068\text{ cm}^{-1}$ 处的官能团, $\psi(1\,491\text{ cm}^{-1}/1\,450\text{ cm}^{-1}, 1\,601\text{ cm}^{-1})$ 为正交叉峰, 意味着 $1\,491\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,450\text{ cm}^{-1}$ 处的官能团变化先于 $1\,601\text{ cm}^{-1}$ 处的官能团. 因此, PS 在 FAFU011 的处理过程中, 官能团变化的先后顺序为: $1\,491\text{ cm}^{-1}$ (C—H) $>$ $1\,450\text{ cm}^{-1}$ (C—H) $>$ $1\,601\text{ cm}^{-1}$ (C=C) $>$ $1\,027\text{ cm}^{-1}$ (C—O)



(a) 不同处理时期 PS 的红外光谱, (b) 同步谱图, (c) 异步谱图;

在同步和异步谱图中, 红色代表正相关、蓝色代表负相关, 颜色越深所代表官能团强度越高

图 4 FAFU011 处理 PS 不同时期的红外光谱和二维相关性分析

Fig. 4 PS of ATR/FTIR spectrum and 2D-COS spectrum

表 2 二维相关性分析同步 (Φ) 和异步 (ψ) 谱图上交叉峰的位置和符号¹⁾

Table 2 The 2D-COS results on the assignment and sign of each cross-peak in synchronous (Φ) and asynchronous (ψ) maps

位置(V_1) / cm^{-1}	类型	位置(V_2)/ cm^{-1}					
		1 027	1 068	1 366	1 450	1 491	1 601
1 027	C—O	+	+(+)	+(+)	+(-)	+(-)	+(-)
1 068	C=O		+	+(+)	+(-)	+(-)	+(-)
1 366	C—OH			+	+(-)	+(-)	+(-)
1 450	C—H				+	+(-)	+(+)
1 491	C—H					+	+(+)
1 601	C=C						+

1) 括号外表示 Φ , 括号中表示 ψ ; + 表示交叉峰为正值, - 表示交叉峰为负值

$>1\ 068\ \text{cm}^{-1}(\text{C}=\text{O}) >1\ 366\ \text{cm}^{-1}(\text{C}-\text{OH})$. 综上所述,基于 XPS、ATR/FTIR 等技术手段分析,证实 FAFU011 对 PS 具有降解作用,并通过 2D-COS 可以推测,FAFU011 在处理 PS 的过程中,由于微生物的作用首先促使 PS 苯环上的 C—H 和 C=C 结构发生解聚或断裂,将 PS 分子变为低分子质量物质,然后通过生物氧化作用,增加 PS 表面 C—O 键、C=O 键以及 C—OH 等含氧结构,从而提高 PS 表面的亲水性,使其更有利于微生物的定殖,提高 PS 的生物可降解性^[34,35].

3 结论

本研究结果表明,嗜热菌 *Geobacillus stearothermophilus* FAFU011 能够利用 PS 作为碳源生长,并在 PS 表面形成活性较高的生物膜;经过 56 d 的处理过程,FAFU011 对 PS 的降解率为 4.2%,使 PS 的重均分子质量和数均分子质量分别降低 17.4% 和 18.2%;通过水接触角、XPS 和 ATR/FTIR 光谱进一步分析表明,FAFU011 对 PS 的结构具有较强的作用,增加 PS 表面 C—O 和 C=O 等含氧结构,以至于提高 PS 表面的亲水性能,从而更有利于微生物的定殖,提高 PS 的生物氧化降解性。

参考文献:

- [1] 周昕原,王言仔,苏建强,等. 微塑料对河水抗生素抗性基因的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4076-4080.
Zhou X Y, Wang Y Z, Su J Q, et al. Microplastics-induced shifts of diversity and abundance of antibiotic resistance genes in river water[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4076-4080.
- [2] Brandon A M, El Abbadi S H, Ibekwe U A, et al. Fate of hexabromocyclododecane (HBCD), a common flame retardant, in polystyrene-degrading mealworms: elevated HBCD levels in egested polymer but no bioaccumulation [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(1): 364-371.
- [3] Turner A. Foamed polystyrene in the marine environment: sources, additives, transport, behavior, and impacts [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(17): 10411-10420.
- [4] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. Science Advances, 2017, 3(7), doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [5] 刘昌会,黄文博,顾彦龙,等. 废弃聚苯乙烯塑料在环境与能源中的高值化应用进展[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 2956-2972.
Liu C H, Huang W B, Gu Y L, et al. Recent advances in high value added reuse of waste polystyrene in environment and energy [J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 2956-2972.
- [6] Wang Q Q, Bai J L, Ning B A, et al. Effects of bisphenol A and nanoscale and microscale polystyrene plastic exposure on particle uptake and toxicity in human Caco-2 cells [J]. Chemosphere, 2020, 254, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126788.
- [7] Amaral-Zettler L A, Zettler E R, Mincer T J. Ecology of the plastisphere [J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18(3): 139-151.
- [8] 邹亚丹,徐擎擎,张胥,等. 6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 496-503.
Zou Y D, Xu Q Q, Zhang G, et al. Influence of six digestion methods on the determination of polystyrene microplastics in organisms using the fluorescence intensity [J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 496-503.
- [9] Zhang Y S, Jiang H R, Wang H, et al. Flotation separation of polystyrene and polyvinyl chloride based on heterogeneous catalytic Fenton and green synthesis of nanoscale zero valent iron (GnZVI) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122116.
- [10] 廖苑辰,娜孜依古丽·加合甫别克,李梅,等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4661-4667.
Liao Y C, Nazygul · Jahitbek, Li M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4661-4667.
- [11] Kirstein I V, Wichels A, Gullans E, et al. The plastisphere—uncovering tightly attached plastic "specific" microorganisms [J]. PLoS One, 2019, 14(4), doi: 10.1371/journal.pone.0215859.
- [12] Zhu K C, Jià H Z, Zhao S, et al. Formation of environmentally persistent free radicals on microplastics under light irradiation [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(14): 8177-8186.
- [13] 王志超,杨帆,杨文焕,等. 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4590-4598.
Wang Z C, Yang F, Yang W H, et al. Occurrence characteristics and quality estimation of microplastics in drainage ditches in Hetiao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4590-4598.
- [14] Nisar J, Ali G, Shah A, et al. Pyrolysis of expanded waste polystyrene: influence of nickel-doped copper oxide on kinetics, thermodynamics, and product distribution [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(12): 12666-12678.
- [15] Kalargaris I, Tian G H, Gu S. The utilisation of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine [J]. Energy, 2017, 131: 179-185.
- [16] 刘西振,张晓雅,朱康,等. 基于废弃聚苯乙烯泡沫的无溶剂快固化涂料 [J]. 化工科技, 2019, 27(1): 40-43.
Liu X Z, Zhang X Y, Zhu K, et al. Solvent-free fast curing coating based on waste polystyrene foam [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2019, 27(1): 40-43.
- [17] Yang Y, Yang J, Wu W M, et al. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 2. Role of gut microorganisms [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(20): 12087-12093.
- [18] Peng B Y, Su Y M, Chen Z B, et al. Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(9): 5256-5265.
- [19] Yang S S, Brandon A M, Andrew J C, et al. Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle [J]. Chemosphere, 2018, 191: 979-989.

- [20] Bombelli P, Howe C J, Bertocchini F. Polyethylene biodegradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella* [J]. *Current Biology*, 2017, **27**(8): R292-R293.
- [21] Lou Y, Ekaterina P, YANG S S, *et al.* Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(5): 2821-2831.
- [22] 陈冠舟, 张白鹭, 纪梦梦, 等. 高通量测序探究啮食聚苯乙烯泡沫塑料黄粉虫的肠道菌群结构[J]. *微生物学通报*, 2017, **44**(9): 2011-2018.
Chen G Z, Zhang B L, Ji M M, *et al.* Gut microbiota of polystyrene-eating mealworms analyzed by high-throughput sequencing[J]. *Microbiology China*, 2017, **44**(9): 2011-2018.
- [23] Wang X, Zheng H, Zhao J, *et al.* Photodegradation elevated the toxicity of polystyrene microplastics to grouper (*Epinephelus moara*) through disrupting hepatic lipid homeostasis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(10): 6202-6212.
- [24] Skariyachan S, Setlur A S, Naik S Y, *et al.* Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(9): 8443-8457.
- [25] Zhan F Q, Zhang H J, Cao R, *et al.* Release and transformation of BTBPE during the thermal treatment of flame retardant ABS plastics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(1): 185-193.
- [26] Chen Z, Zhao W Q, Xing R Z, *et al.* Enhanced *in situ* biodegradation of microplastics in sewage sludge using hyperthermophilic composting technology [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121271.
- [27] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, *et al.* A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) [J]. *Science*, 2016, **351**(6278): 1196-1199.
- [28] Kim H R, Lee H M, Yu H C, *et al.* Biodegradation of polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (Larvae of *Zophobas atratus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(11): 6987-6996.
- [29] Syranidou E, Karkanorachaki K, Amorotti F, *et al.* Biodegradation of mixture of plastic films by tailored marine consortia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **375**: 33-42.
- [30] Chamas A, Moon H, Zheng J J, *et al.* Degradation rates of plastics in the environment [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, **8**(9): 3494-3511.
- [31] Dussud C, Hudec C, George M, *et al.* Colonization of non-biodegradable and biodegradable plastics by marine microorganisms [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.01571.
- [32] Ding L, Mao R F, Ma S R, *et al.* High temperature depended on the ageing mechanism of microplastics under different environmental conditions and its effect on the distribution of organic pollutants [J]. *Water Research*, 2020, **174**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115634.
- [33] Song Y, Qiu R, Hu J N, *et al.* Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **746**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141289.
- [34] Liu J, Zhang T, Tian L L, *et al.* Aging significantly affects mobility and contaminant-mobilizing ability of nanoplastics in saturated loamy sand [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 5805-5815.
- [35] 徐鹏程, 郭健, 马东, 等. 新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1329-1337.
Xu P C, Guo J, Ma D, *et al.* Sorption of polybrominated diphenyl Ethers by virgin and aged microplastics [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1329-1337.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i>	(2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i>	(2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i>	(2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i>	(2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i>	(2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i>	(2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i>	(2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i>	(2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i>	(2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i>	(2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i>	(2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i>	(2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i>	(2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan	(2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i>	(2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i>	(2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i>	(2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i>	(2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i>	(2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i>	(2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i>	(2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i>	(2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui	(2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng	(2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i>	(2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang	(2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i>	(2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i>	(2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua	(2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i>	(2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i>	(2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i>	(2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i>	(2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i>	(2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i>	(2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i>	(2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i>	(2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i>	(2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i>	(2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i>	(3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i>	(3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i>	(3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i>	(3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i>	(3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i>	(3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i>	(3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i>	(3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long	(3084)