

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪稚 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)	

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解

杨莉^{1,2}, 刘颖^{2,3}, 高婕^{2,4*}, 彭霞薇^{1*}, 白志辉^{2,4}, 庄绪亮^{2,4}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心中国科学院环境生物技术重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学技术大学生命科学学院, 合肥 230026; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408)

摘要: 聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 是广泛使用且难以降解的主要塑料材料之一。在本研究中, 选择大麦虫幼虫 (*Zophobas morio*) 对 PS 进行生物降解, 发现大麦虫幼虫在为期 50 d 的培养时间仅摄取 PS, 能够保持较高存活率 (73%)。使用傅里叶变换红外光谱分析大麦虫的虫粪, 证实了虫粪中的 PS 形成了新的含氧官能团。凝胶渗透色谱分析表明, 大麦虫摄入 PS 后其虫粪的重均分子量 (M_w) 和数均分子量 (M_n) 均向减小的方向偏移, 表明大麦虫摄入的 PS 发生了降解。使用 16S rRNA 基因测序技术, 分析 PS、麦麸和麦麸加 PS 这 3 种不同的饲喂条件下大麦虫的肠道细菌, 结果表明在不同的摄食条件下, *Z. morio* 的肠道菌群表现出显著差异。在 PS 饲喂条件下, 大麦虫肠道中具有降解 PS 功能的优势菌群, 例如克雷伯氏菌 (*Klebsiella*) 和柠檬酸杆菌属 (*Citrobacter*) 等显著富集。以 PS 为唯一碳源, 对大麦虫肠道微生物进行为期 90 d 的体外培养实验, 结果发现具有 PS 降解功能的肠道菌群显著富集。本研究证明了肠道细菌在大麦虫幼虫降解 PS 的过程中发挥了重要作用, 为 PS 的生物降解提供了新的理论依据与应用思路。

关键词: 大麦虫; 聚苯乙烯 (PS); 生物降解; 肠道菌群; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5609-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003273

Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in *Zophobas morio*: Effects of Gut Microbiota

YANG Li^{1,2}, LIU Ying^{2,3}, GAO Jie^{2,4*}, PENG Xia-wei^{1*}, BAI Zhi-hui^{2,4}, ZHUANG Xu-liang^{2,4}

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Polystyrene (PS) foam is one of the main plastic materials dispersed in the environment. In this study, we observed that the insect-super mealworms (*Zophobas morio*), which belong to a species of the *Tenebrio* genus, are able to consume and degrade PS foam. Individual *Z. morio* consumed an extracellular polymeric substance (EPS) over 50 days with high survival rates. Analyses of the frass egested using fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the formation of a new oxygen-bearing functional group in the EPS. Gel permeation chromatography (GPC) analyses indicated that the depolymerization of ingested EPS with decreases in both M_w and M_n was observed, suggesting that the EPS was biodegraded. We also used 16S rRNA gene sequences to analyze the gut bacteria of *Z. morio* under three different feeding conditions, including with polystyrene, bran, and bran plus polystyrene. Under different dietary conditions, the gut microbiota of *Z. morio* showed significant differences, such as *Klebsiella* and *Citrobacter* becoming significantly enriched. In vitro studies using 90-days gut microbial culturing experiments indicated that gut microbiota contributed to PS degradation. Our research demonstrates that intestinal bacteria played an essential role in the degradation of PS by *Z. morio*, and provides a new theoretical basis and application ideas for the biodegradation of PS.

Key words: *Zophobas morio*; polystyrene; biodegradation; gut microbiota; high-throughput sequencing

全世界每年生产超过 3 亿 t 的石油基合成塑料^[1~5], 塑料废物造成的环境污染已成为人们日益关注问题。聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 作为分布广泛又难以在自然环境中降解的一类塑料制品, 对生态环境造成了严重的破坏。自 1960 年以来, 人们为研究塑料的生物降解做出了巨大的努力^[6~9], 关于塑料生物降解的相关研究日益增加, 研究人员尝试从各种来源的环境中分离细菌, 如垃圾、土壤、污水和污泥^[10~13], 将 PS 降解成低分子中间体, 或是将 PS 矿化为二氧化碳和水。但结果表明, 即使对聚合物进行了预处理, 由于塑料本身的大分子结构紧密,

PS 的降解效率仍然很低^[14~17]。

最近的研究表明, 来源于世界各地的黄粉虫, 能够咀嚼、摄取和降解 PS^[5,18~21], 同时, 也有报道证实了黑粉虫 (*Tenebrio obscurus*) 肠道也具有解聚 PS 的能力^[17]。通过肠道微生物的抗生素抑制实验, 证实了在肠道微生物被抑制的情况下, 黄粉虫对 PS 的降

收稿日期: 2020-03-26; 修订日期: 2020-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505803-01, 2016YFC0500401)

作者简介: 杨莉 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: 673010041@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiecao@rcees.ac.cn; xiaoweipeng@163.com

解能力也发生了抑制^[17,19,22]. 这些研究表明,肠道微生物组对分解难消化的塑料起到了很大的作用.

大麦虫 (*Zophobas morio*) 属于鞘翅目 (Coleoptera) 拟步甲科 (Tenebrionidae), 是我国由东南亚国家引进的新型蛋白源昆虫^[23]. 苗少娟^[24] 的研究发现, 大麦虫幼虫对不同种塑料的取食有选择性, 对薄、软和泡沫化程度较高的塑料较为喜食, 且幼虫取食聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 和可发性聚苯乙烯 (expanded polystyrene, EPS) 泡沫塑料后, 排泄物中原料基本特征变化较大, 物质组分也产生较大变异. 殷涛等^[25] 也发现大麦虫对于 EPS 泡沫塑料的取食量总体大于其它泡沫塑料. 但是, 对于大麦虫的肠道群落结构, 之前的研究中均没有涉及; 对于大麦虫体内降解 PS 的机制, 仍然不清楚.

本研究检测了大麦虫虫粪中 PS 的化学结构和组成是否发生了变化, 以研究大麦虫对 PS 的解聚作用. 通过扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测大麦虫肠道内与 PS 表面的微生物群落形态. 利用 16S rRNA 高通量测序技术对不同饲喂条件和不同地域来源大麦虫肠道的细菌群落进行测定, 以探究不同食物对肠道细菌的影响和不同来源大麦虫的肠道细菌对于 PS 的响应. 将肠道悬液与 PS 在体外进行共培养实验, 来探究肠道细菌在体外

对 PS 的降解能力. 本研究初步揭示了大麦虫肠道微生物降解 PS 的机制.

1 材料与方法

1.1 测试材料

PS 购买自中国北京的亿兴塑料厂. 大麦虫 (平均每只幼虫体重 800 ~ 1 000 mg) 购买自中国北京和山东泰安, 用于 PS 测试. 四氢呋喃 (tetrahydrofuran, THF, GC 级纯度 $\geq 99.9\%$), 1, 2, 4-三氯苯 ($\geq 99\%$, Alfa Aesar, Haverhill, MA), 麦麸购买自北京锐志汉兴公司.

1.2 聚苯乙烯泡沫喂食实验

根据大麦虫的取食差异, 本研究设置 3 个处理组: PS、麦麸 + PS 和麦麸组. 3 个处理组均使用了北京海淀区 (B1) 虫源, 将其分别命名为 B1 + PS、B1 + B 与 B1 + B + PS 组, 每组设置 3 个平行. 在实验前, 将大麦虫保持 48 h 的饥饿状态. 喂食实验开始后, 为了评估大麦虫存活率, 每个平行实验选择 100 只大麦虫. 在为期 50 d 内, 每 5 d 对大麦虫的存活数进行记录, 去除死亡的大麦虫, 清理培养容器并且收集虫粪保存于 -80°C 以备后续实验. 另从北京房山区 (B2) 与山东泰安地区 (TA) 购买的大麦虫作为对照批实验, 分别命名为 B2 + PS 和 TA + PS 组 (图 1).



图 1 大麦虫啃食 PS 的图片

Fig. 1 Photos of *Z. morio* gnawing PS

1.3 大麦虫的肠道菌群 SEM 观察

将 5 只 PS 组的大麦虫放在体积分数 75% 乙醇中浸泡 1 min, 然后用 0.85% NaCl 无菌生理盐水洗涤 2 次. 使用无菌镊子取下大麦虫的头和尾, 取出大麦虫的肠道. 使用 2.5% 戊二醛固定剂 (中国 MACKLIN) 固定肠道 4 h. 之后, 将其用磷酸盐缓冲液 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$) 洗涤 3 次, 每次 15 min. 然后依次用体积分数 30%、50%、85% 和 95% 的乙醇脱水, 每阶段 15 min, 最后用 100% 的乙醇脱水 15 min. 放置在培养皿中, 倒入 5 mL 六甲基二硅氮烷, 干燥并脱水 5 min, 然后在室温下干燥. 纵向

切开肠, 用导电胶固定在样品台上, 在 6 mA 电流下喷金 1 min, 并在 SEM (HITACHI S-3000N, 日本) 下观察.

1.4 大麦虫肠道悬液与 PS 的体外培养

从 B1 + B、B1 + B + PS、B1 + PS、B2 + PS 和 TA + PS 组分别取 10 只大麦虫在体积分数 75% 乙醇中浸泡 1 min, 然后用 0.85% NaCl 无菌生理盐水洗涤 2 次. 用无菌镊子除去大麦虫的头和尾后, 将肠道组织转移至有 2 mL 0.85% NaCl 无菌生理盐水的研钵中充分研磨至匀浆状 [图 2(a)], 再将其转移至无菌离心管中, 用 0.85% NaCl 无菌生理盐水定

容至 10 mL. 分别将 3.5 g 的 PS 碎块用 75% 的无水乙醇灭菌并吹干, 然后将其放入血清瓶中作为唯一的碳源, 并加入灭菌的无机盐液体培养基. 最后, 将 B1 + PS、B2 + PS 和 TA + PS 组的肠道悬液分别加入血清瓶中, 使其占总体积的 5%, 这些体外培养组被分别命名为 B1-PS、B2-PS 和 TA-PS 组. 同时, 将未灭菌的 PS 添加到含有液体无碳矿物盐培养基的血清瓶中, 并且以不添加肠道细菌悬液作为对照组, 命名为 PS-CK 组. 以上所有实验样品均在 30℃ 和 150 r·min⁻¹ 下进行兼性厌氧培养[图 2(b)]. 在 90 d 的培养期结束时, 将液体培养物用于 DNA 提取和 PCR 扩增.



(a) 大麦虫肠道微生物 DNA 的提取;

(b) 肠道菌悬液与 PS 体外培养

图 2 大麦虫肠道微生物 DNA 提取过程和肠道菌悬液与 PS 的体外培养

Fig. 2 Steps of intestinal microbial extraction from *Z. morio* and intestinal bacterial suspension and in vitro PS culture

1.5 体外培养 PS 的 SEM 观察

分别准备 4 个 1 g 形状相似的 PS 碎块用 75% 的无水乙醇灭菌并吹干, 用 B1 + PS、B2 + PS 和 TA + PS 组无机盐液体培养基制备 5% 的肠道菌悬液分别将 PS 块浸没; 另取无机盐液体培养基将 PS 块浸没作为空白对照. 30℃ 静置培养 21 d, 培养结束后将 PS 块取出, 用磷酸盐缓冲液 (0.1 mol·L⁻¹, pH = 7.0) 冲洗, 用 2.5% 戊二醛固定剂 (中国 MACKLIN, 0.1 mol·L⁻¹, pH 7.0 磷酸盐缓冲液) 固定 4 h. 再用磷酸盐缓冲液洗涤 3 次, 每次 15 min. 然后依次用体积分数 30%、50%、85% 和 95% 的乙醇脱水, 每阶段 15 min, 最后用 100% 的乙醇脱水 15 min. 冷冻

干燥 3 h, 使用 SEM (HITACHI S-3000N, 日本) 进行观察.

1.6 DNA 提取和高通量测序

采用 TIANamp 细菌 DNA 试剂盒 (TIANGEN BIOTECH, 中国) 提取 B1 + B、B1 + B + PS、B1 + PS、B2 + PS 和 TA + PS 组肠道悬液的 DNA. 细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 区的扩增采用细菌 16S rRNA 通用引物 357F: 5'-CCTACGGGAGGCAGCAG-3' 和 926R: 5'-CCGTGAATTCMTTTRACT-3'. 反应条件如下: 预变性 (95℃, 2 min) → 变性 (95℃, 20 s, 30 个循环) → 退火 (50℃, 30 s) → 延伸 (72℃, 5 min). 高通量测序在北京奥维森基因技术有限公司的 MiSeq 测序平台进行, 原始数据上传至 NCBI 数据库中 (序列号: PRJNA603609).

1.7 数据分析

原始数据下机后, 结果以 Fastq 格式存储, 该文件包含每条测序序列的名称、碱基序列以及其对应的测序质量信息. MiSeq 测序得到的是双端序列数据, 首先对测得的数据进行过滤处理, 过滤 read 尾部质量值 20 以下的碱基, 设置 50 bp 的窗口, 如果窗口内的平均质量值低于 20, 从窗口开始截去后端碱基, 过滤质控 50 bp 以下的 read, 然后根据 PE 测序的 overlap 关系将成对的序列拼接成一条序列^[26]. 根据测序前的条形码标签, 确定应将哪个样品分类到每个序列中, 并从融合数据中分离出每个样品数据. 最后, 对通过分离获得的每个样本数据进行质量控制过滤, 以获得有效数据^[27].

为了探索每个采集样品的物种组成结构信息, 使用 Uparse 生物信息学分析软件对所有样品的所有 Clean Reads 进行 OTU (操作分类单位) 的聚类分析, 以 97% 的一致性作为基本标准. 然后将频率最高的序列作为 OTU 的代表性序列进行测序, 并在 Sliva 数据库中进行分析以进行物种注释. 为了消除实验误差和统计误差, 最后对每个样品的数据进行处理. 均质化的方法是设置阈值 (通常是序列数最少的样品), 然后从样品中随机提取由阈值设置的序列数, 以进行进一步分析. 在后续步骤中, 不同组之间的两种多样性分析 (α 多样性和 β 多样性) 均基于均化后获得的数据. 在多样本比较分析 (β 多样性) 中, 本研究使用 QIIME 生物信息学分析软件 (1.9.1 版) 和 R 软件 (3.5.1 版) 来分析所有样本.

1.8 凝胶渗透色谱与傅里叶变换红外光谱法

收集和分析虫粪的方法与先前报道的一致^[5,18]. 在第 31 d 的饲喂实验结束时, 用流动的空气清洗了 *Z. morio* 幼虫, 并将其转移到一个干净的盒子中, 以便在 24 h 内收集虫粪, 将收集到的虫粪

保存在 -80°C , 备用. 凝胶渗透色谱法 (gel permeation chromatography, GPC, Waters Breeze, Waters, U. S. A) 用于分析聚合物分子量的变化. 用四氢呋喃 (THF) 萃取制备 PS 样品的步骤与之前所述的步骤相似. 从 PS 原样 (1.0 g) 和 PS 虫粪中 (1.0 g) 中萃取 PS. 在温和加热 (60°C) 的磁力搅拌器上, 将 THF 溶液与样品混合, 然后通过 $0.22\ \mu\text{m}$ PVDF 过滤器过滤. 将 THF 萃取的溶液浓缩至 5 mL 的体积以达到约每 mL 有 5 mg 聚合物. 将提取物 (体积为 $20\ \mu\text{L}$) 以 $0.8\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速注入 GPC 分析仪.

通过傅里叶变换红外光谱 (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR, Thermo Fisher IS5 和 Thermo Fisher IS10) 对 PS 原样的主要功能基团以及从虫粪中提取的残留聚合物进行了表征, 范围为 $4\ 000\sim 500\ \text{cm}^{-1}$. 样品制备的方法与已有的报道一致^[17,19,28]. 使用衰减全反射 (attenuated total reflection, ATR) 方法 (Thermo Fisher IS10) 测试了 PS 组的虫粪样品, 在分析之前, 将样品干燥至少 36 h 至 50°C , 用溴化钾 (potassium bromide, KBr) 研磨以制备均匀的 KBr 颗粒进行扫描 (Thermo Fisher IS5).

2 结果与讨论

2.1 不同喂食条件下大麦虫的存活率

PS 的生物降解实验进行了 50 d. 在不同饮食条件下, 大麦虫的存活率 (survival rate, SR) 顺序为 (图 3): B1 + B 组 (88%) > B1 + B + PS 组 (85%) > B1 + PS 组 (73%). 饲喂麦麸和 PS 的大麦虫幼虫比饲喂 PS 组具有更好的存活率, 麦麸饲喂的大麦虫在 32 d 时的存活率可保持在 90% 左右, PS 饲喂的大麦虫存活率大约为 80%. 表明幼虫可通过 PS 来获得碳源以维持生命, 与先前在黄粉虫中观察到的结果相似^[21]. 与已报道的能摄食 PS 的黄粉虫和黑粉虫相比, 大麦虫的存活率较低, 这可能是由于大麦虫体形较大, 其自身基础代谢较高所致. 总体而言, 单

纯饲喂 PS, 在 50 d 内大麦虫存活率可维持在 70% 左右.

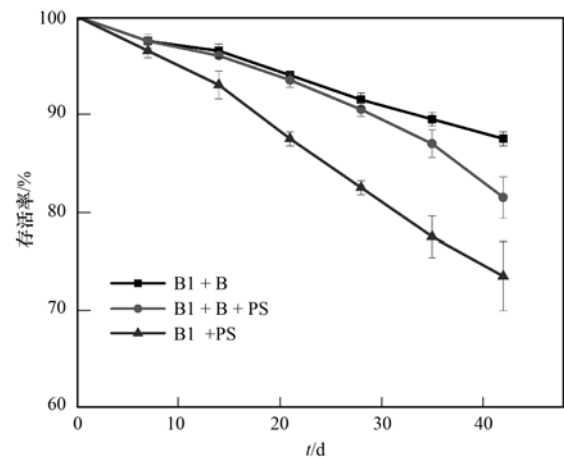


图 3 大麦虫在 50 d 内存活率

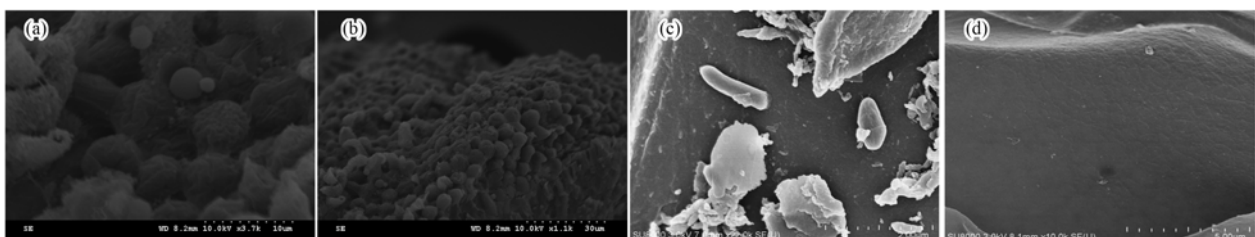
Fig. 3 Survival rate of *Z. morio* over the test period (50 days)

2.2 肠内菌群与肠道悬液处理 PS 表面的扫描电镜观察

从大麦虫肠道内容物的 SEM 照片中可以发现, 中肠富含微生物群落, 包括球状、短杆状和棒状等不同形状的微生物 [图 4(a) 和 4(b)]. 这表明大麦虫的中肠是肠道微生物的主要共生部位. 此外, 体外实验的 SEM 结果表明, 在培养 21 d 后, 未处理的用于对照的 PS 表面上没有可见的细菌细胞出现. 同时, 在与 5% 肠道悬液处理的 PS 表面上, 可以观察到大量的细菌细胞, 甚至形成了生物膜, 这表明这些细菌可以利用 PS, 可能能够从 PS 的降解中获得足够的代谢底物.

2.3 肠道微生物群落分析

使用 Illumina MiSeq 测序进行的微生物群落分析表明, 饲喂 PS 后, 大麦虫幼虫的肠道微生物群发生了显著的变化. 根据相对丰度, 大麦虫的肠道微生物组主要由 10 个科组成 [图 5(a)]. 肠杆菌科 (Enterobacteriaceae)、紫单胞菌科 (Porphyromonadaceae)、梭杆菌科 (Fusobacteriaceae)、假单胞菌科 (Pseudomonadaceae) 和肠球菌科 (Enterococcaceae)



(a) 和 (b) SEM 观察大麦虫喂食 PS 后肠道微生物群落; (c) 大麦虫肠道菌悬液与 PS 体外培养 21 d 后扫描电镜观察; (d) 未添加肠道菌悬液的 PS 培养 21 d 后扫描电镜观察

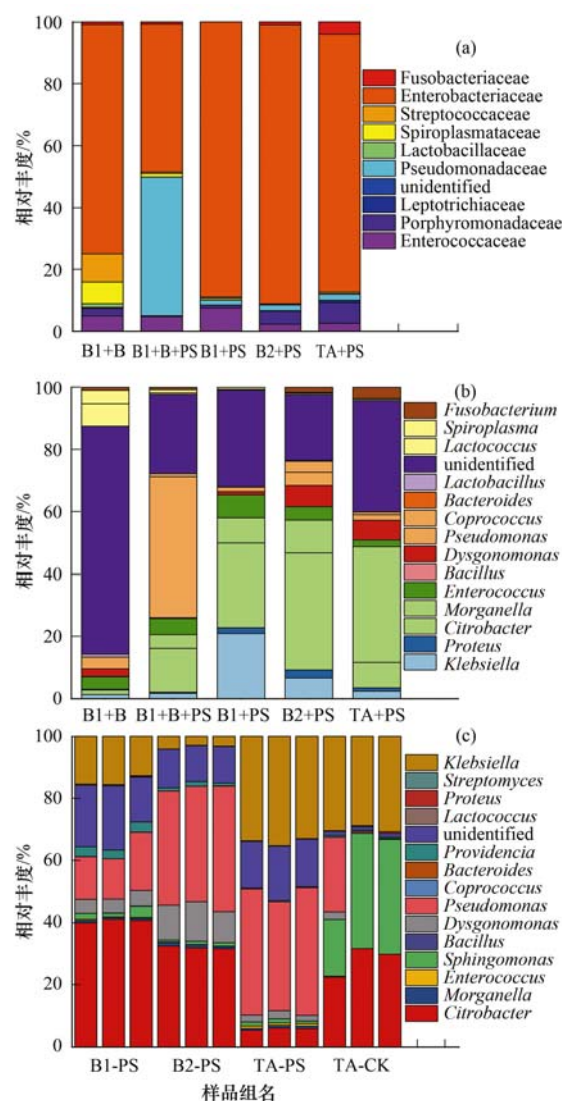
图 4 大麦虫肠道微生物扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images of microbial communities in the gut of *Z. morio*

是优势科。饲喂 PS 后, *Enterobacteriaceae*、链球菌科 (*Streptococcaceae*) 和 *Pseudomonadaceae* 的相对丰度均上升了。先前的研究发现黄粉虫中的柠檬酸杆菌属 (*Citrobacter* sp.) 被证明与 PE 和 PS 的降解密切相关,而这种菌属于 *Enterobacteriaceae*^[19]。当同时饲喂麦麸和 PS (B1 + B + PS 组) 时, *Enterobacteriaceae* 的丰度会显著下降, *Pseudomonadaceae* 的丰度会显著上升。这可能是由于麦麸的添加,增加了肠道菌群所需要的氮源等营养源,同时 *Pseudomonadaceae* 作为塑料降解效率较高的一类菌群^[29],麦麸与 PS 混合饲喂的条件,促进了 *Pseudomonadaceae* 对 PS 底物的利用,因此此处理组 *Pseudomonadaceae* 的相对丰度显著升高。彭博宇等人的研究发现^[17],黑粉虫对 PS 的降解能力比黄粉虫更高,而黑粉虫肠道内的螺原体科 (*Spiroplasmataceae*)、肠球菌科 (*Enterococcaceae*) 和 *Enterobacteriaceae* 的相对丰度也发生了显著的变化。

使用 PS 作为唯一碳源与大麦虫的肠道菌悬液在体外培养 90 d,通过 16S rRNA 测序微生物群落分析发现,大麦虫幼虫的肠道中含有几种可能使用 PS 作为碳源的微生物,这可能与 PS 的降解有关[图 5 (c)]。有研究表明,柠檬酸杆菌属 (*Citrobacter*) 可以介导联苯的厌氧转化,并具有原油降解的潜力^[30],而这一菌属在 B1-PS 和 B2-PS 处理组中占有较高的比例。同时,有报道指出,假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 可以降解聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚氨酯、聚对苯二甲酸乙二酯和其他聚合物^[31],而这一菌在 TA-PS 组中占比很高。

在属水平上,摄食 PS 会导致大麦虫中摩根菌属 (*Morganella*)、*Dysgonmonas* 和克雷伯氏菌 (*Klebsiella*) 的相对丰度增加(图 6)。根据已有报道,*Dysgonmonas* 可以降解石油和木质纤维素^[32,33]。*Klebsiella* 在 B1 组中占很大比例,已有研究报道这种菌可以利用 PS 作为碳源生长,并参与原油和多环芳烃的降解^[34,35]。乳酸乳球菌 (*Lactococcus*)、螺原体 (*Spiroplasma*)、普罗威登斯菌属 (*Providencia*) 和粪球菌 (*Coprococcus*) 等都是昆虫肠道常见的内共生菌。通过对不同的分组进行比较,喂食 PS 后不同地区大麦虫的肠道菌群不同,同一地区不同来源的大麦虫的肠道细菌也有明显差异。在不同的饲喂条件下,随着饮食结构的变化,大麦虫的肠道细菌比例也会发生变化。此外,来自不同地区的大麦虫最主要的几个属的相对丰度均会因摄入 PS 而发生显著的变化。如在喂食 PS 的处理组中,*Citrobacter* 的相对丰度显著增加。在 B1 + PS 组



(a) 科水平的群落组成变化; (b) 属水平的群落组成变化;
(c) 大麦虫肠道菌悬液与 PS 体外培养 21 d 后的优势属
图 5 不同取食条件下大麦虫肠道微生物群落结构分析

Fig. 5 Microbial community analysis of gut microbiome for different diets

的大麦虫的幼虫肠道中, *Citrobacter* 相对丰度显著增加, 相对含量为 25.8%, 而在 TA + PS 组中的含量为 8.02% (图 6)。

综上所述, 通过 B1 + B、B1 + B + PS 和 B1 + PS 组的分析可以发现, 不同的饲喂条件, 显著改变了大麦虫幼虫肠道的细菌群落组成, 与 PS 降解相关的微生物菌属相对丰度增加。通过比较 B1 + PS、B2 + PS 和 TA + PS 组肠道微生物群落结构发现, 喂食 PS 后不同来源的大麦虫幼虫肠道中所富集的细菌有明显差异。根据肠道悬液与 PS 体外共培养实验, 可以发现在体外培养的肠道菌群中包含能以 PS 为唯一碳源生存的菌属, 如克雷伯氏菌 (*Klebsiella*)、鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*) 和柠檬酸杆菌属 (*Citrobacter*) 等。

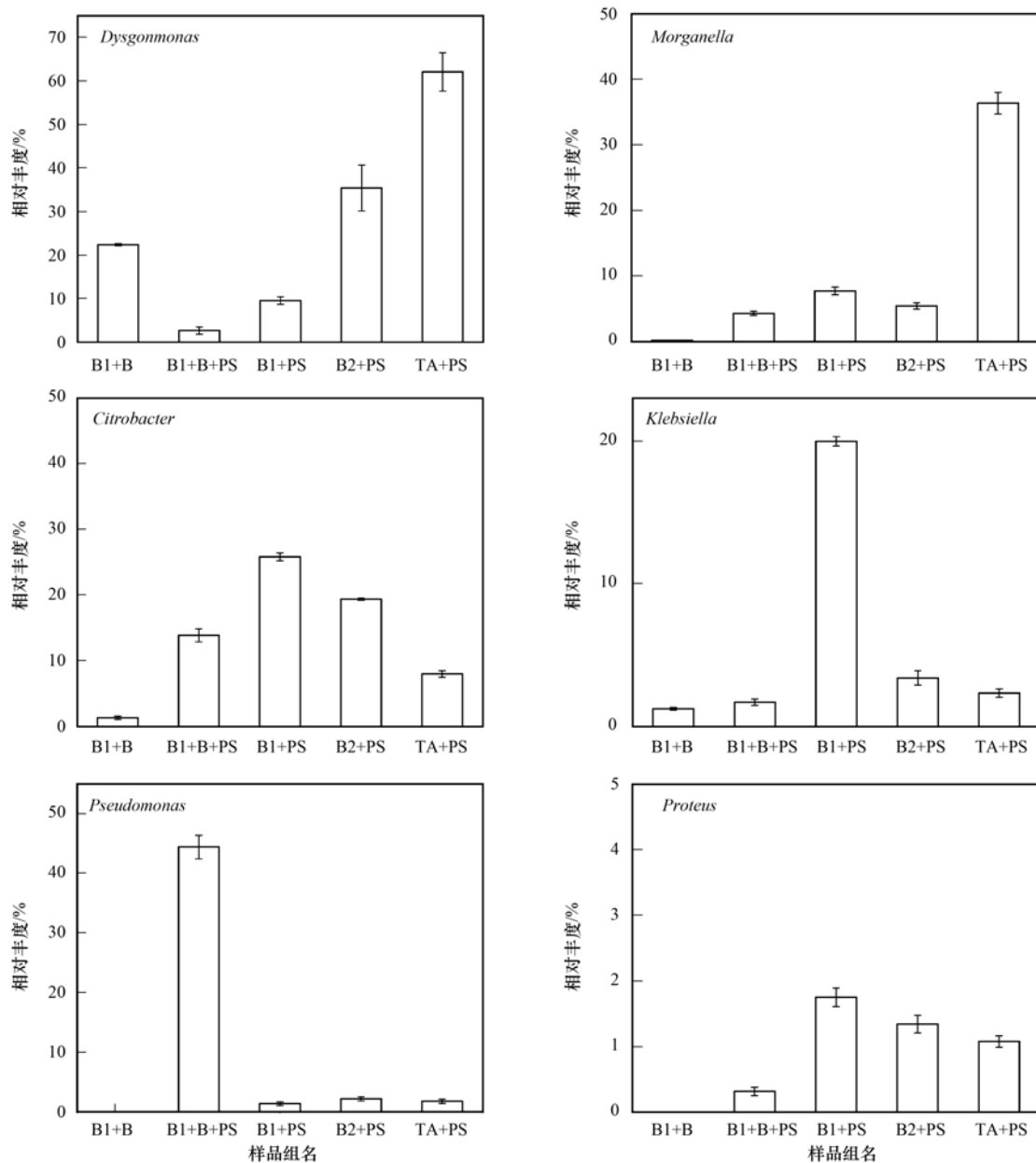


图 6 不同处理组优势菌群在属水平上的相对丰度

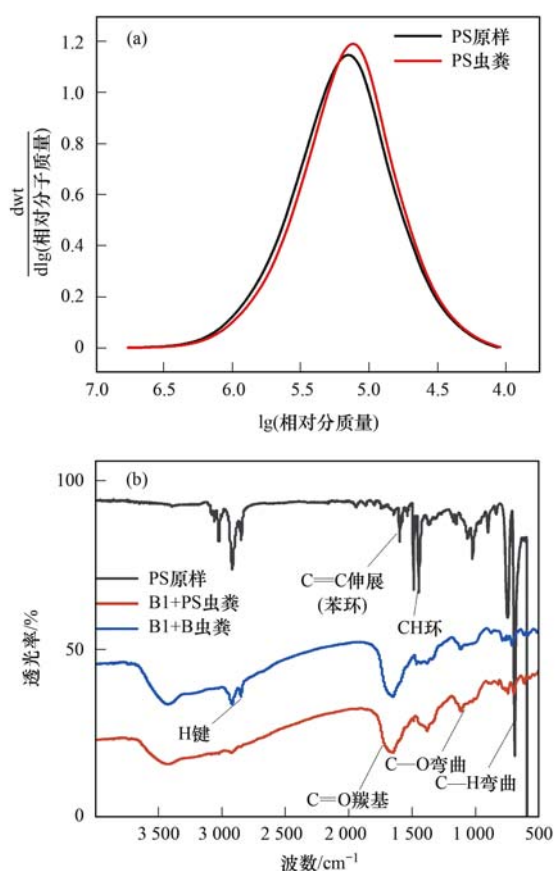
Fig. 6 Distribution of dominant bacterial communities in each sample at the genus level

2.4 聚苯乙烯的解聚和生物降解中间体的形成

在培养的第 50 d 收集大麦虫的虫粪样品,通过 GPC 分析测定了虫粪中提取的残留 PS 的相对分子质量,结果表明,B1 + PS 组虫粪中的 PS 的数均分子量 M_n (106000) 和重均分子量 M_w (218000) 与所饲喂的 PS (PS 原样) 的 M_n (112000) 和 M_w (237800) 相比显著降低,即 M_w 降低 8.3%, M_n 降低 5.3% (独立样本 t 检验, P 值均 < 0.01). PS 在经过大麦虫的肠道后,其相对分子质量分布 (MWD) 向低分子量偏移 [图 7(a)]. M_n 和 M_w 的降低表明在大麦虫中存在 PS 的解聚和降解.

通过 FTIR 检测所饲喂的 PS、B1 + PS 组虫粪以及饲喂麦麸的 B1 + B 组虫粪,结果发现 PS 组虫粪

中 PS 的结构发生了改变 [图 7(b)]. 在 PS 原样中, $625 \sim 970 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰强度 (环弯曲振动) 强烈,但在啮食 PS 后其虫粪样品中强度减弱. PS 的特征环 ($\text{C}=\text{C}$ 伸展, $1550 \sim 1610 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1800 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$) 在虫粪样品中明显削弱,这证实了 PS 经大麦虫肠道消化后,其特征环受到了破坏. 同时 PS 的特征峰强度降低以及羰基功能团的出现 ($\text{C}=\text{O}$ 伸展, 1700 cm^{-1}), 也表明了 PS 在大麦虫的肠道内发生了降解. 所有虫粪样品 FTIR 光谱中,在 $2500 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰宽与羟基或羧酸基团的氢键相关,这也证实了经大麦虫肠道系统消化后,虫粪中的 PS 残留物从疏水性向亲水性表面性质的转变^[22].



(a) 质量对数微分布曲线; (b) 傅里叶变换红外光谱检测

图7 PS原样与喂食PS大麦虫虫粪的分析

Fig. 7 Analysis of PS sample and frass of *Z. morio* fed with PS

3 结论

北京和泰安地区的大麦虫均可以啃食PS塑料, 大麦虫幼虫具有降解PS的能力。GPC和FTIR测试表明, 在大麦虫中存在PS的解聚现象, 且与黄粉虫的降解模式相似。通过SEM观察发现PS经大麦虫肠道菌悬液处理后, 肠道细菌可以在体外利用PS作为碳源生存繁殖。此外, 使用Illumina MiSeq进行高通量测序, 结果显示, 随着PS的摄入, 大麦虫的肠道微生物菌群发生了显著的变化, *Morganella*、*dysgonmonas*、*Klebsiella*和*Pseudomonas*等显著富集, 这与降解PS的黄粉虫肠道中的优势菌群相似。这些微生物种群已被证明在黄粉虫肠道中降解PS发挥了重要作用, 因此, 笔者推断大麦虫中也正是这些降解PS的肠道核心菌群发挥了重要作用。同时, 部分肠道核心菌群可以在体外以PS为唯一碳源进行富集, 这为微生物降解聚苯乙烯的工业化提供了可能。

致谢: 王娜和谢飞在实验方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

[1] Li W C, Tse H F, Fok L. Plastic waste in the marine

environment: a review of sources, occurrence and effects [J]. Science of the Total Environment, 2016, **566-567**: 333-349.

- [2] Bergmann M, Sandhop N, Schewe I, et al. Observations of floating anthropogenic litter in the barents sea and fram strait, arctic [J]. Polar Biology, 2016, **39**(3): 553-560.
- [3] Engler R E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(22): 12302-12315.
- [4] Elsayy M A, Kim K H, Park J W, et al. Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, **79**: 1346-1352.
- [5] Yang Y, Yang J, Wu W M, et al. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part I. chemical and physical characterization and isotopic tests [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(20): 12080-12086.
- [6] Lee B, Pometto A L, Fratzke A, et al. Biodegradation of degradable plastic polyethylene by *Phanerochaete* and *Streptomyces* species [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **57**(3): 678-685.
- [7] Guillet J E, Reguluski T W, McAneney T B. Biodegradability of photodegraded polymers. II. tracer studies of biooxidation of ecolyte PS polystyrene [J]. Environmental Science & Technology, 1974, **8**(10): 923-925.
- [8] Kyrikou I, Briassoulis D. Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2007, **15**(2): 125-150.
- [9] Jones P H, Prasad D, Heskins M, et al. Biodegradability of photodegraded polymers. I. development of experimental procedures [J]. Environmental Science & Technology, 1974, **8**(10): 919-923.
- [10] Tian L L, Kolvenbach B, Corvini N, et al. Mineralisation of 14 C-labelled polystyrene plastics by *Penicillium variable* after ozonation pre-treatment [J]. New Biotechnology, 2017, **38**: 101-105.
- [11] Gautam R, Bassi A S, Yanful E K. A review of biodegradation of synthetic plastic and foams [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2007, **141**(1): 85-108.
- [12] Kaplan D L, Hartenstein R, Sutter J. Biodegradation of polystyrene, poly (metnyl methacrylate), and phenol formaldehyde [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1979, **38**(3): 551-553.
- [13] Nakamiya K, Sakasita G, Ooi T, et al. Enzymatic degradation of polystyrene by hydroquinone peroxidase of *Azotobacter beijerinckii* HM121 [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1997, **84**(5): 480-482.
- [14] Krueger M C, Harms H, Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(21): 8857-8874.
- [15] Mor R, Sivan A. Biofilm formation and partial biodegradation of polystyrene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*: biodegradation of polystyrene [J]. Biodegradation, 2008, **19**(6): 851-858.
- [16] Shah A A, Hasan F, Hameed A, et al. Biological degradation of plastics: a comprehensive review [J]. Biotechnology Advances, 2008, **26**(3): 246-265.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Brandon A M, Gao S H, Tian R M, *et al.* Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(11): 6526-6533.
- [20] Yang X T, Song Z, Zhou S H, *et al.* Insights into functional microbial succession during nitrogen transformation in an ectopic fermentation system [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **284**: 266-275.
- [21] Yang S S, Chen Y D, Kang J H, *et al.* Generation of high-efficient biochar for dye adsorption using frass of yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus) fed with wheat straw for insect biomass production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **227**: 33-47.
- [22] Yang S S, Wu W M, Brandon A M, *et al.* Ubiquity of polystyrene digestion and biodegradation within yellow mealworms, larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Chemosphere*, 2018, **212**: 262-271.
- [23] 姜嫄, 张翌楠, 马玲, 等. 大麦虫成虫活体的雌雄鉴别 [J]. *林业科学*, 2012, **48**(6): 175-177.
- Jiang Y, Zhang Y N, Ma L, *et al.* Identification of alive female and male adult of *Zophobas morio* (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(6): 175-177.
- [24] 苗少娟, 张雅林. 大麦虫 *Zophobas morio* 对塑料的取食和降解作用研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2010, **32**(4): 435-444.
- Miao S J, Zhang Y L. Feeding and degradation effect on plastic of *Zophobas morio* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, **32**(4): 435-444.
- [25] 殷涛, 周祥, 王艳斌, 等. 泡沫塑料的取食对黄粉虫和大麦虫生长的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, **53**(2): 74-79.
- Yin T, Zhou X, Wang Y B, *et al.* Effects of plastic foam feeding on the growth of *Tenebrio molitor* L. and *Zophobas morio* Fabricius [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, **53**(2): 74-79.
- [26] Zhang J J, Kobert K, Flouri T, *et al.* PEAR: a fast and accurate illumina paired-end read merger [J]. *Bioinformatics*, 2014, **30**(5): 614-620.
- [27] Schmieder R, Edwards R. Quality control and preprocessing of metagenomic datasets [J]. *Bioinformatics*, 2011, **27**(6): 863-864.
- [28] Yang S S, Brandon A M, Flanagan J C A, *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.
- [29] Nowak B, Pająk J, Drozd-Bratkowicz M, *et al.* Microorganisms participating in the biodegradation of modified polyethylene films in different soils under laboratory conditions [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(6): 757-767.
- [30] Grant D J W. Kinetic aspects of the growth of *klebsiella aerogenes* with some benzenoid carbon sources [J]. *Microbiology*, 1967, **46**(2): 213-224.
- [31] Wilkes R A, Aristilde L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges [J]. *Applied Microbiology*, 2017, **123**(3): 582-593.
- [32] Yang J, Yang Y, Wu W M, *et al.* Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(23): 13776-13784.
- [33] Subramanian A, Menon S. Novel polyaromatic hydrocarbon (PAH) degraders from oil contaminated soil samples [J]. *International Journal of Advanced Research*, 2015, **3**(7): 999-1006.
- [34] Sun X X, Pinacho R, Saia G, *et al.* Transcription factor sp4 regulates expression of nervous wreck 2 to control NMDAR1 levels and dendrite patterning [J]. *Developmental Neurobiology*, 2015, **75**(1): 93-108.
- [35] You Z Y, Li Z, Zhang S J, *et al.* Treatment of oil-contaminated water by modified polysilicate aluminum ferric sulfate [J]. *Processes*, 2018, **6**(7): 95.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)