

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

微塑料 PES 与 2,4-DCP 复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响

林旭萌^{1,2}, 宿程远^{1,2*}, 吴淑敏², 黄娴², 邓雪², 林香凤², 黄尊², 魏佳林²

(1. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541004; 2. 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541004)

摘要: 考察了聚醚砜(PES)微塑料及2,4-二氯苯酚(2,4-DCP)对厌氧颗粒污泥疏松胞外聚合物(LB-EPS)和紧密胞外聚合物(TB-EPS)组分的影响,并利用高通量测序技术对厌氧颗粒污泥的微生物群落及基因功能变化进行了分析.结果表明,2,4-DCP以及PES+2,4-DCP实验组COD去除率分别为35%和37%,与空白对照组相比降低了57%和55%;而PES实验组COD去除率仍在90%左右.投加PES+2,4-DCP后,厌氧颗粒污泥LB-EPS中的蛋白及多糖含量与对照组相比出现了降低,TB-EPS中多糖含量增加最少.无论投加PES还是2,4-DCP均会抑制辅酶F₄₂₀的活性.通过高通量测序发现投加了PES或2,4-DCP实验组厌氧颗粒污泥的微生物丰度及多样性均减少.在对照组和实验组中,门水平下优势菌群为Proteobacteria(13.45%~44.47%)、Firmicutes(6.86%~21.67%)和Actinobacteria(3.16%~18.11%);纲水平下PES+2,4-DCP实验组中β-Proteobacteria含量与对照组相比减少了15.28%,γ-Proteobacteria含量与对照组相比增加了28.44%.基于PICRUST1分析发现PES或2,4-DCP实验组中,污泥中能量代谢功能相关基因比对照组增多了0.25%~0.72%;而2,4-DCP实验组污泥中膜运输功能组相关基因丰度减少明显.

关键词: 聚醚砜(PES); 2,4-二氯苯酚(2,4-DCP); 厌氧颗粒污泥; 胞外聚合物(EPS); 微生物群落

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1946-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006030

Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge

LIN Xu-meng^{1,2}, SU Cheng-yuan^{1,2*}, WU Shu-min², HUANG Xian², DENG Xue², LIN Xiang-feng², HUANG Zun², WEI Jia-lin²

(1. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 2. School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: The effects of polyether sulfone (PES) microplastics and 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP) on the loosely-bound extracellular polymeric substances (LB-EPS) and tightly-bound EPS (TB-EPS) of anaerobic granular sludge were investigated. In addition, high-throughput sequencing technology was used to analyze the changes in the microbial community and gene functions in the anaerobic granular sludge. The results revealed that the chemical oxygen demand (COD) removal rates of the 2,4-DCP and PES + 2,4-DCP experimental groups were 35% and 37%, which were 57% and 55% lower than that of the blank control group, while the COD removal rates of the PES experimental group remained around 90%. After the addition of the PES microplastics and 2,4-DCP, the protein and polysaccharide contents in the LB-EPS decreased compared with the control group, and the polysaccharide content in TB-EPS increased the least. In presence of the PES microplastics and 2,4-DCP, the activity of coenzyme F₄₂₀ was inhibited. Through high-throughput sequencing, the microbial richness and diversity of the anaerobic granular sludge in the experimental group were reduced with the addition of the PES microplastics or 2,4-DCP. In the control group and the experimental group, the dominant bacteria at the phylum level were Proteobacteria (13.45% - 44.47%), Firmicutes (6.86% - 21.67%), and Actinobacteria (3.16% - 18.11%). The abundance of β-Proteobacteria in the PES + 2,4-DCP experimental group was reduced by 15.28%, while the abundance of γ-Proteobacteria increased by 28.44% compared with the control group. Based on the phylogenetic investigation of the communities using the reconstruction of unobserved states (PICRUST) analysis, it was found that in the experimental group with the PES microplastics or 2,4-DCP, the genes related to the sludge energy metabolism function were 0.25% - 0.72% more than the control group; therefore, the abundance of genes related to the transport function group decreased significantly.

Key words: polyether sulfone (PES); 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP); anaerobic granular sludge; extracellular polymeric substances (EPS); microbial community

酚类化合物是工业废水中的有机污染物之一,特别是氯酚由于其致癌性和诱变性,这类化合物若得不到有效处理将对环境造成严重危害^[1]. 2,4-二氯苯酚(2,4-dichlorophenol, 2,4-DCP)作为代表性的氯酚之一,广泛存在于石化废水、炼油废水、农药

收稿日期: 2020-06-03; 修订日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768009); 广西研究生教育创新计划项目(XYCSZ2020046)

作者简介: 林旭萌(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为废水及污泥处理理论与技术,E-mail:474325174@qq.com

* 通信作者,E-mail:suchengyuan2008@126.com

制造废水和塑料制造废水中. 由于 2,4-DCP 不易自然降解, 且易通过食物链累积对生物体造成急性与慢性毒性作用, 因此已被美国环保署 (EPA) 列为优先污染物控制清单^[2,3]. 废水中 2,4-DCP 处理的研究引起了人们的广泛关注. 微塑料是一种直径小于 5 mm 的塑料颗粒^[4]. 日常生活中的塑料制品无处不在, 其会随着生活污水进入污水处理厂, 因此污水处理厂中存在大量的微塑料; 有研究报道表明, 虽经过多级处理工段, 污水处理厂仍会排放微塑料进入自然水体中^[5]. 微塑料体积小, 就意味着更大的比表面积, 这将增加其吸附能力. 微塑料可吸附环境污染物, 包括持久性有机污染物和内分泌干扰物等^[6]. 而持久性有机污染物一旦与微塑料结合, 可能会对生态系统造成更高的风险^[7,8]. 聚醚砜 (polyether sulfone, PES) 是一种高性能, 无定形的特种工程塑料, 由于其具有的优良特性使得 PES 在诸多领域得到广泛应用. 有学者在北极地区发现了 PES 微塑料的痕迹, 造成微塑料转移的原因是由于建筑、制造等行业意外和不可避免地排放^[9,10].

对于含 2,4-DCP 及微塑料废水的生物处理而言, 有研究发现 2,4-DCP 在缺氧/好氧活性污泥系统中会明显积累脱氯中间产物的浓度, 从而增加了其对污泥的生物毒性^[11]. Wei 等^[11] 指出在污泥消化过程中, 微塑料会影响微生物群落并抑制污染物水解, 从而影响氢生成和甲烷生成. 污泥胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是由微生物分泌的生物化学物质, 通过细胞裂解或介质中的有机物释放细胞物质或产物而形成^[12]. 多糖与蛋白是 EPS 的主要成分, 由于 EPS 的特殊成分, 其具有吸附能力和生物降解性^[13,14]. 同时确定关键酶的活性是定量评估微生物细胞活性的一种方法, 乙酸激酶 (AK) 是负责生产乙酸的关键酶, 辅酶 F₄₂₀ 是甲烷产生的关键酶^[15~17]. 微塑料吸附持久性有机物后可能会对微生物产生复合效应, 但目前缺乏微塑料与持久性有机物复合污染对厌氧颗粒污泥理化特性和微生物菌群协同机制等的探究, 而这对于厌氧生物反应器处理含有毒废水的高效与稳定运行具有重要意义.

鉴于此, 本文探究了 2,4-DCP 和 PES 复合污染对厌氧颗粒污泥 COD 去除、污泥 EPS 含量和组分的影响, 同时利用高通量测序研究了 2,4-DCP 和 PES 对厌氧颗粒污泥中微生物群落的影响并基于测序数据进行了基因功能预测分析 (PICRUSt).

1 材料与方法

1.1 实验材料与方法

利用 4 个 500 mL 锥形瓶 (A、B、C 和 D) 进行

厌氧生物处理序批实验 (如图 1), 废水量为 150 mL, 厌氧颗粒污泥为 100 mL, 每天进行配换水 1 次且充氮气 10 min, 锥形瓶放在水浴振荡器中, 温度为 35℃, 微振荡 (105 r·min⁻¹). 每天投加的 PES 微塑料为白色圆球粉末, 尺寸为 0.25 mm, 购自东莞市某塑化有限公司; 2,4-DCP 为 99% 分析纯, 购自中国药化学药剂有限公司. PES 浓度设置参考文献^[18], 考虑到微塑料会在水体中累积, 同时为了在短期内考察 PES 对厌氧颗粒污泥的影响, 将 PES 的投加量设置较高; 2,4-DCP 浓度则参考文献^[19] 进行确定. 具体的实验组如下, A: 空白; B: 0.5 g·L⁻¹ PES; C: 40 mg·L⁻¹ 2,4-DCP; D: 0.5 g·L⁻¹ PES + 40 mg·L⁻¹ 2,4-DCP.

厌氧颗粒污泥取自桂林某啤酒厂厌氧发酵罐. 污泥取回后置于实验室厌氧装置中, 利用人工配制的废水进行驯化与实验. 废水具体成分为: 3 000 mg·L⁻¹ 葡萄糖、2 000 mg·L⁻¹ NaHCO₃、200 mg·L⁻¹ NH₄Cl、44 mg·L⁻¹ KH₂PO₄ 和 1 mL·L⁻¹ 的微量元素混合液^[20].

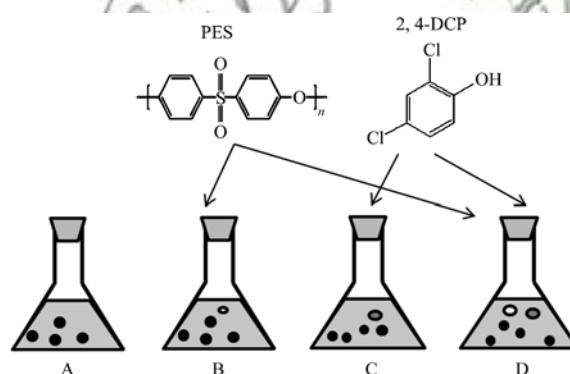


图 1 厌氧生物序批实验装置示意

Fig. 1 Anaerobic biological sequencing batch experiment device

1.2 分析方法

进水与出水 COD 浓度采用消解-分光光度法分析^[21]. 根据 Liang 等^[22] 的方法, 取第 20 d 与第 40 d 泥水混合物, 存于离心管中, 在 4 000 r·min⁻¹ 的条件下离心 10 min 后弃去上清液, 剩下污泥用 0.05% NaCl 溶液补满, 在 20 kHz 的条件下超声 2 min, 之后在 150 r·min⁻¹ 的条件下振荡 10 min, 最后置于 8 000 r·min⁻¹ 的离心机内离心 10 min, 取上清液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤保存, 即得到松散型胞外聚合物 (LB-EPS); 继而在离心管中加入 0.9% NaCl 溶液, 在 80℃ 条件下水浴 30 min 后取出, 冷却至室温, 置于 8 000 r·min⁻¹ 的离心机内离心 10 min, 取上清液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 即为紧密型胞外聚合物 (TB-EPS). 采用蒽酮-硫酸比色法在 620 nm 处测定 EPS 中的多糖含量, 利用考马斯亮蓝法在 595 nm 处

测定 EPS 中的蛋白含量^[23]. LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光光谱(EEM)使用荧光光谱仪(F-7000, Hitachi, Japan)在室温下以 700V 氙灯在扫描模式下进行,所使用的激发波长(E_x)以 5 nm 的增量在 220 ~ 500 nm 范围内,而发射波长(E_m)以 5 nm 的增量在 220 ~ 550 nm 范围内,扫描速度为 $2\,400\text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$. 40 d 时取污泥进行酶活性测定,分别采用乙酸钾分光光度法和紫外可见分光光度法测定厌氧颗粒污泥中的乙酸激酶(AK)和辅酶 F_{420} 活性^[24].

第 40 d 时分别从实验装置 A、B、C 和 D 中收集污泥样品用于高通量测序分析,使用 Mag-Bind Soil DNA Kit 提取厌氧颗粒污泥中的 DNA(E. Z. N. ATM, OMEGA, USA),利用 Qubit 3.0 DNA 检测试剂盒对基因组 DNA 精确定量,以确定 PCR 反应加入的 DNA 量,而后进行两轮的 PCR 扩增. 第一轮 PCR 扩增所用引物融合了 MiSeq 测序平台的 V3-V4 通用引物^[25], 341F 引物: [CCCTACACGACGCTCTTC CGATCTG (barcode) CCTACGGGNGGCWGCAG]; 805R 引物: GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATT CCAGACTACHVGGGTATCTAATCC. 第二轮扩增,引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物,为 Illumina TruSeq

系列的接头. 并基于 16S rRNA 扩增测序结果运用 PICRUST 对微生物群落进行系统地功能和代谢途径分析研究.

2 结果与讨论

2.1 PES 及 2,4-DCP 对 COD 去除的影响

PES 和 2,4-DCP 对 COD 去除率的影响如图 2 所示. 其中对照组 A 的 COD 平均去除率为 $(93 \pm 4.27)\%$, 实验组 B、C 和 D 的平均去除率分别是 $(90 \pm 5.75)\%$ 、 $(35 \pm 17.59)\%$ 和 $(38 \pm 15.95)\%$. 表明投加了单一污染物 PES 的实验组 B 对 COD 的去除并未有太大影响,在实验周期的前 30 d COD 的平均去除率为 88%,随着实验的进行,PES 对厌氧颗粒污泥的抑制减弱,COD 平均去除率略有提高. 在实验组 C 与 D 中,COD 的去除率大幅度降低,由于 2,4-DCP 属于难降解有机物,2,4-DCP 对厌氧颗粒污泥出现了明显抑制. 投加了 PES + 2,4-DCP 污染物的实验组 D 中,由于受到 2,4-DCP 的影响,其 COD 去除率较低,但实验组 D 的 COD 平均去除率比实验组 C 略高,可能是 PES 吸附了 2,4-DCP,从而减轻了厌氧颗粒污泥处理难降解有机污染物的负担.

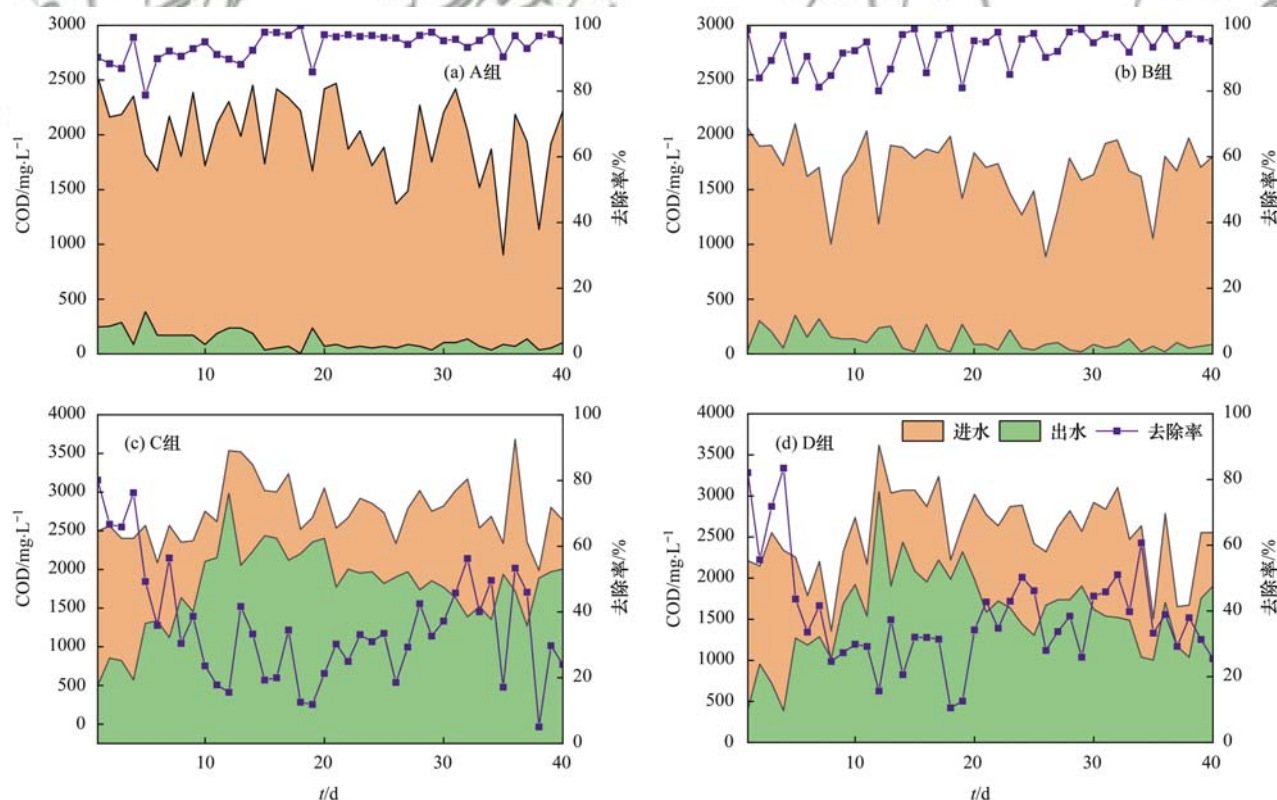


图 2 PES 和 2,4-DCP 对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effect of PES and 2,4-DCP on COD removal rate

2.2 PES 及 2,4-DCP 对污泥 EPS 的影响

本文分析了 PES 和 2,4-DCP 对厌氧颗粒污泥 EPS 组分的影响,结果如图 3 所示.

由图 3 可知,20 d 时对照组 A 中 LB-EPS 的蛋白含量为 $(0.65 \pm 0.006)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 实验组 B、C 和 D 蛋白含量分别为 (0.24 ± 0.002) 、 (0.09 ± 0.005) 和

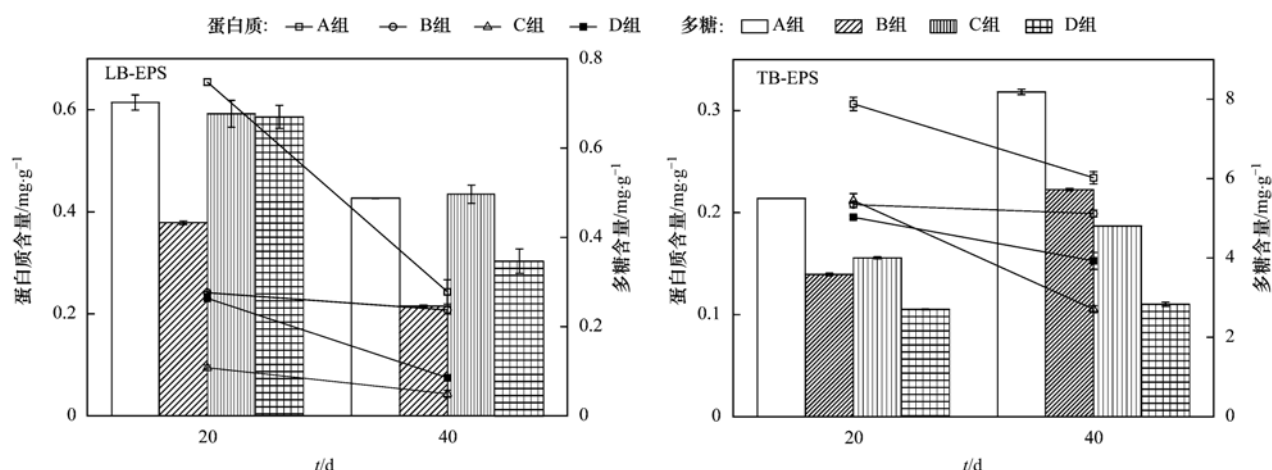


图3 PES 和 2,4-DCP 对 EPS 中蛋白和多糖含量的影响

Fig. 3 Effect of PES and 2,4-DCP on the content of protein and polysaccharide in EPS

(0.23 ± 0.001) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 可见 PES 或 2,4-DCP 均会减少 LB-EPS 中蛋白含量; 40 d 时对照组 A 及实验组 B、C 和 D 蛋白质含量分别为 (0.24 ± 0.024)、(0.21 ± 0.008)、(0.04 ± 0.007) 和 (0.07 ± 0.006) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 表明随着实验的进行 2,4-DCP 会较为强烈地抑制 LB-EPS 中蛋白的生成. 同时由图 3 可知, 对照组与实验组中的多糖含量也随着实验的进行不断减少. 20 d 时 A、B、C 和 D 组中多糖含量分别是 (0.70 ± 0.017)、(0.43 ± 0.004)、(0.68 ± 0.030) 和 (0.67 ± 0.026) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 实验结束时 A、B、C 和 D 组中多糖含量分别为 (0.49 ± 0.001)、(0.25 ± 0.002)、(0.49 ± 0.020) 和 (0.35 ± 0.027) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 对于 TB-EPS 而言, 随着实验进行投加了 2,4-DCP 的实验组蛋白含量大幅减少, 与 LB-EPS 中蛋白含量变化一致. 投加 PES 的实验组 B 减少了 16.67%, 而投加了 2,4-DCP 的实验组 C 则减少了 52.17%. PES 微塑料会减缓 TB-EPS 中蛋白的消耗, 而有毒的 2,4-DCP 会使得蛋白的含量下降更明显. 与蛋白含量减少相反, TB-EPS 中多糖的含量随着实验进行不断增加. 对照组 A 的多糖含量增加了 68.9%, 实验组 B、C 和 D 的多糖含量分别增加了 65.5%、61.2% 和 33.5%, 可以发现投加了 PES + 2,4-DCP 的实验组 D 多糖含量增加最少. 增加的多糖被认为是条件变化的一种调节机制, 以维持厌氧颗粒污泥的稳定性^[26]. 同时由于 LB-EPS 包裹着 TB-EPS, 使得 LB-EPS 与外加污染物结合能力强于 TB-EPS, 因此 LB-EPS 中的蛋白和多糖随着实验进行被不断分解^[27, 28].

为了更为全面地探讨 EPS 中组分的变化情况, 利用 EEM 光谱对 LB-EPS 与 TB-EPS 进行了分析, 结果如图 4 与图 5 所示.

图 4 和图 5 分别显示了第 40 d 时污泥 LB-EPS

和 TB-EPS 的 EEM 结果, 图谱中可确定 3 个荧光峰: 峰 1 为色氨酸蛋白物质 ($E_x/E_m = 270 \sim 280/320 \sim 350 \text{ nm}$); 峰 2 类为芳香蛋白物质 ($E_x/E_m = 225 \sim 240/320 \sim 350 \text{ nm}$); 峰 3 为辅酶 F_{420} 物质 ($E_x/E_m = 410 \sim 430/460 \sim 470 \text{ nm}$)^[29]. LB-EPS 在第 40 d 实验结束时, 对照组 A 和实验组 B、C 和 D 表现出两个相同的荧光峰, 即峰 1 和峰 2. 表明无论是否投加 PES 微塑料或 2,4-DCP, 类芳香蛋白物质和色氨酸蛋白物质均是 EPS 的主要成分, 表明这两类蛋白类物质有利于厌氧颗粒污泥的形成和结构稳定性, 这与 Zhu 等^[30]的研究结果一致. 在第 40 d 时峰 1 在对照组 A 和实验组 B、C 和 D 的荧光峰强度分别是 63.2、108.5、19.9 和 35.8 a. u.; 峰 2 的强度分别是 47.4、67.81、9.95 和 13.43 a. u.. 对比发现只含有 PES 微塑料的实验组 B 色氨酸蛋白与类芳香蛋白物质的荧光峰强度是增强的, 实验组 D 中也含有 PES 微塑料但由于 2,4-DCP 的影响其荧光峰强度有所减弱. 这说明 PES 微塑料在实验过程中影响了污泥的结构, 使厌氧颗粒污泥更加稳定, 这在 COD 去除率中也可以得到验证. 同时由污泥 TB-EPS 的 EEM 图谱可知, 在第 40 d 时, 对照组和实验组均出现了色氨酸蛋白物质的荧光峰. 实验组 D 还出现了类芳香蛋白物质荧光峰, 但对照组 A 及实验组 B、C 的类芳香蛋白物质荧光峰消失, 显现辅酶 F_{420} 荧光峰, Qu 等^[31]的研究发现荧光峰的变化与某些细菌的生长以及死亡细胞和大分子有机物的分解有关.

2.3 PES 及 2,4-DCP 对关键酶活性的影响

40 d 实验周期结束后污泥中乙酸激酶 (AK) 和辅酶 F_{420} 的关键酶相对活性如图 6 所示.

如图 6 所示, 实验组 B 乙酸激酶的相对活性降低了 (21.42 ± 0.69)%, 而实验组 C 和 D 的乙酸激酶相对活性增加了 (125.16 ± 12.37)% 和 (334.64

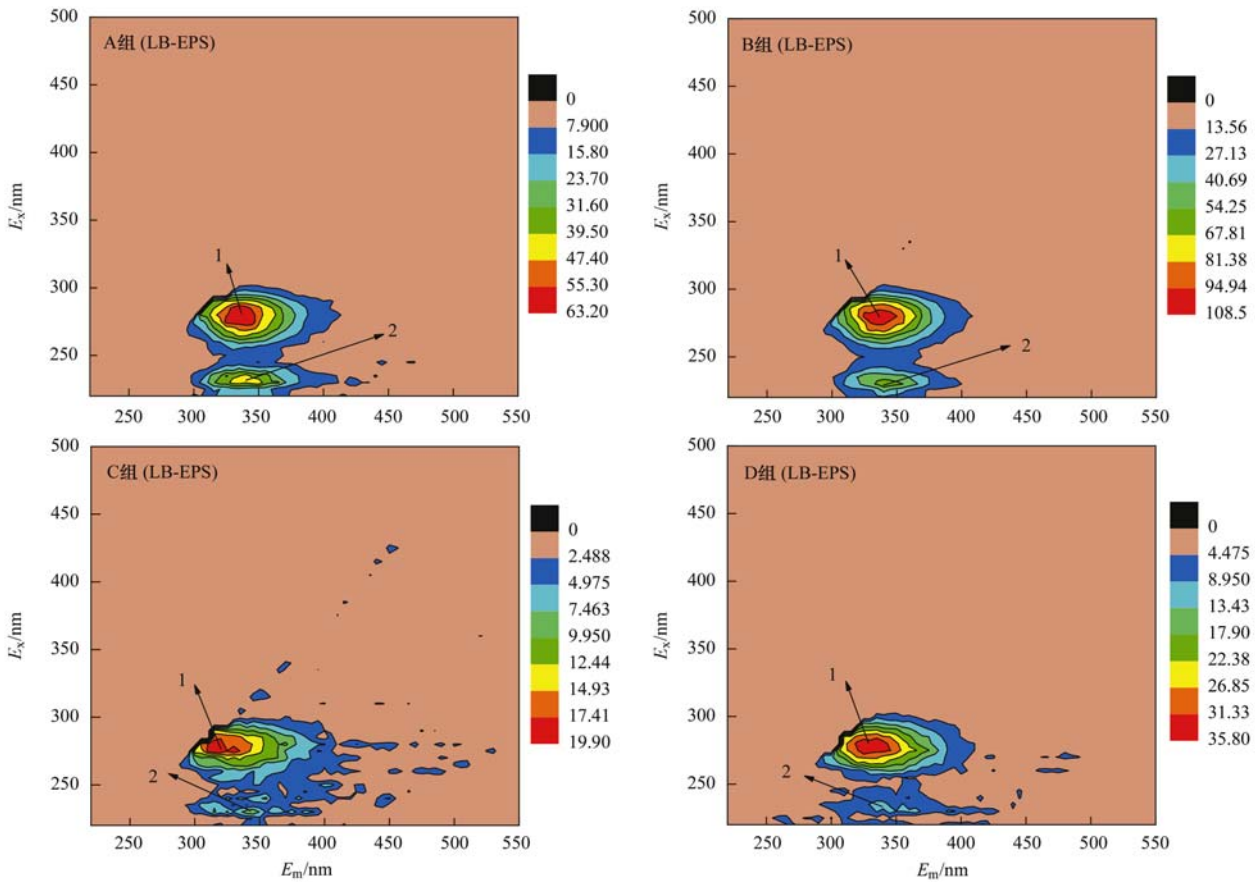


图4 LB-EPS在第40 d时的EEM谱图
Fig. 4 EEM spectra of the LB-EPS at day 40

± 12.54)%。含有2,4-DCP的实验组C和D中乙酸激酶相对活性皆有不同程度的提高,在乙酸生成过程中,乙酸激酶是关键酶,它控制着乙酸的最终生成,因此,在实验组C和D中乙酸大量产生,从而会影响反应器中微生物的发酵类型,会抑制某些产甲烷菌的生长^[16, 32]。对于辅酶F₄₂₀,实验组B、C和D的相对活性分别为 $(47.61 \pm 2.987)\%$ 、 $(80.42 \pm 4.529)\%$ 和 $(19.90 \pm 0.748)\%$ 。该结果表明,无论投加PES还是2,4-DCP实验组,辅酶F₄₂₀的活性均受到抑制,这可以反映厌氧颗粒污泥的产甲烷活性也受到一定程度的抑制。

2.4 PES及2,4-DCP对厌氧颗粒污泥微生物群落的影响

2.4.1 微生物群落的丰度和多样性

为考察PES微塑料和2,4-DCP对厌氧颗粒污

泥中微生物群落的影响,根据16S rRNA的高通量测序数据,首先评估了不同实验组微生物群落的丰度和多样性。将所有样本序列按照序列间的距离进行聚类,后根据序列之间的相似性将序列分成不同的操作分类单元(OTU)^[33],结果如表1所示。与对照组相比,厌氧颗粒污泥暴露于PES微塑料或2,4-DCP时,样品的OTU值出现减少。ACE指数和Chao1指数用于评估微生物丰富度,而Shannon指数则反映微生物多样性^[34]。与对照组A相比,实验组B、C和D的ACE指数和Chao1指数降低,表明暴露在PES微塑料或2,4-DCP会抑制微生物的丰富性。Shannon值越大,说明群落多样性越高;Coverage数值越高,则样本中序列未被测出的概率越低。与对照组相比,实验组的Shannon指数有所降低,尤其是投加了复合污染物的实验组D变化最

表1 厌氧颗粒污泥中微生物多样性的序列信息和多样性指数

Table 1 Sequence information and alpha index of microbial diversity in the anaerobic granular sludge					
样本	OTU 数目	ACE 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Coverage 指数
A 组	1 070	1 328.02	1 268.15	4.45	0.996 0
B 组	950	1 223.90	1 198.59	4.25	0.995 7
C 组	871	1 189.71	1 094.20	3.77	0.996 4
D 组	917	1 173.44	1 094.56	3.13	0.996 8

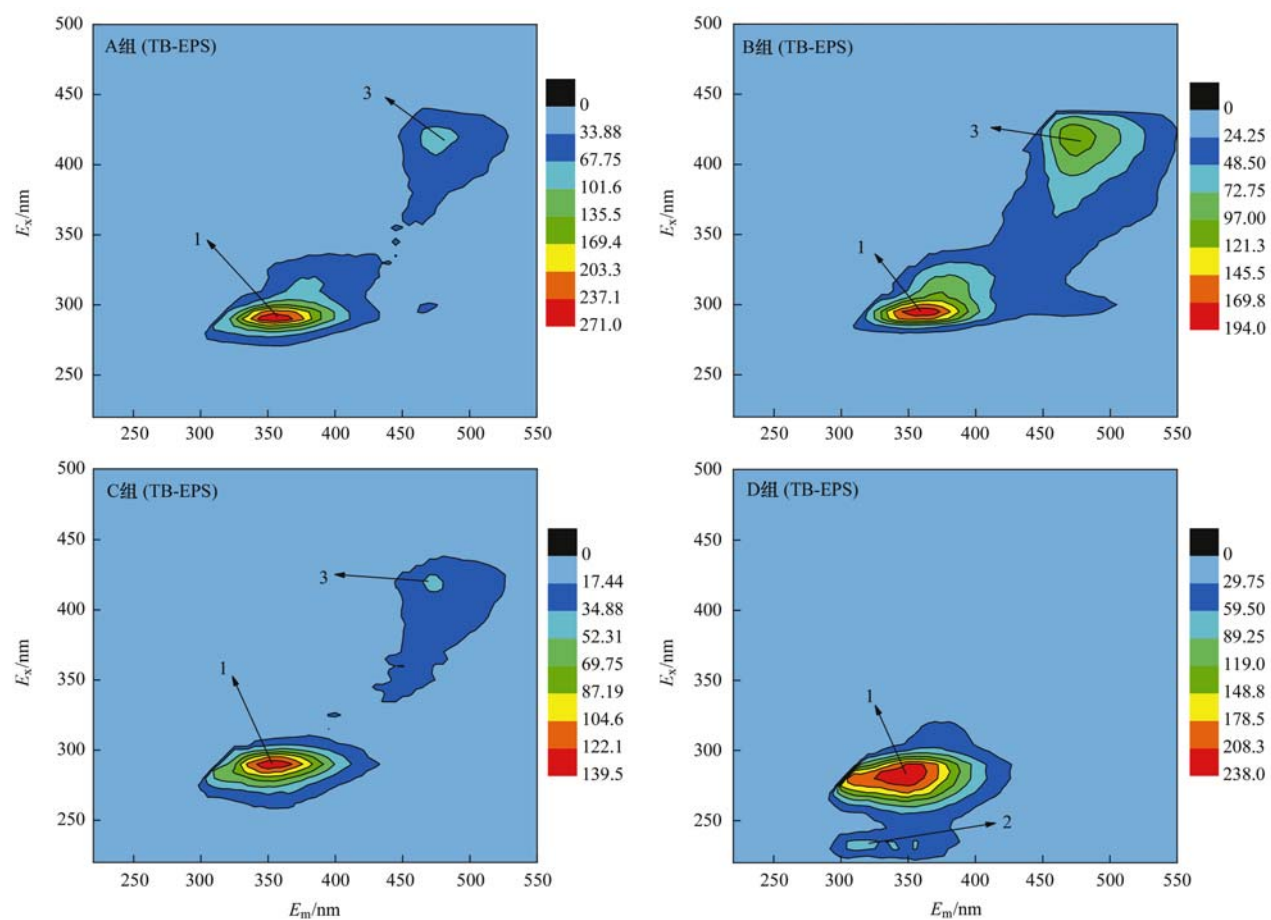


图 5 TB-EPS 在第 40 d 时的 EEM 谱图
Fig. 5 EEM spectra of the TB-EPS at day 40

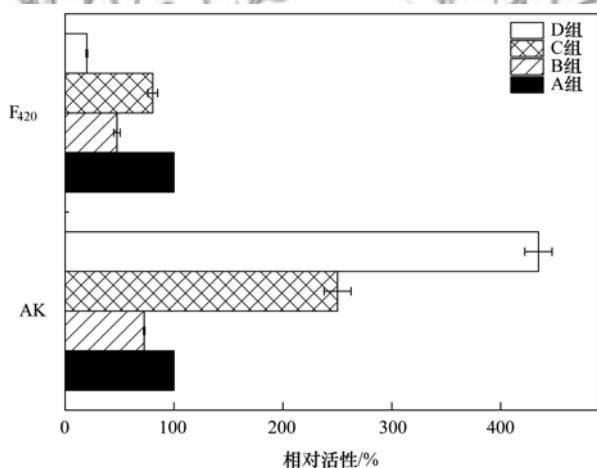


图 6 PES 和 2,4-DCP 对关键酶相对活性的影响
Fig. 6 Effects of PES and 2,4-DCP on the relative activities of key enzymes

大. 从表 1 中数据可以推断单一污染物 PES 微塑料对厌氧颗粒污泥中微生物多样性的影响小于单一污染物 2,4-DCP, 而污泥同时暴露在 PES 微塑料和 2,4-DCP 的情况下对微生物群落多样性的影响最大.

2.4.2 微生物群落结构变化

厌氧生物处理技术是由多种微生物共同作用下

的复杂生化过程,其中特定的微生物种群在物质转化中起重要作用. 由此在门、纲水平上分析了不同厌氧颗粒污泥样品的细菌群落结构(图 7 与图 8),旨在从微生物群落结构角度分析 PES 与 2,4-DCP 对厌氧颗粒污泥的影响机制.

图 7 为对照组和实验组门水平下的细菌群落结构. 在对照组 A 中, 3 个优势菌为 Proteobacteria (31.67%)、Bacteroidetes (12.98%) 和 Firmicutes (12.09%). 在实验组 B、C 和 D 中优势菌群变化明显, 其中实验组 B 的优势菌为 Proteobacteria (18.53%)、Candidatus Saccharibacteria (10.76%) 和 Actinobacteria (10.6%); C 的优势菌为 Firmicutes (21.67%)、Actinobacteria (16.90%) 和 Proteobacteria (13.45%); D 的优势菌为 Proteobacteria (44.47%)、Actinobacteria (18.11%) 和 Firmicutes (11.71%). Proteobacteria 是 4 个样品中的优势菌, 因为 Proteobacteria 对于厌氧污泥颗粒化非常重要, 其会分泌 EPS 并促进絮状污泥的附着^[35]. Firmicutes 在实验组 C 中为优势菌群, 其作用是可产生内生孢子以抵抗极端环境威胁^[36], 可见 2,4-DCP 对颗粒污泥的生长环境造成了影响, 因此

刺激了 Firmicutes 的大量生长. Actinobacteria 具有降解环境污染物的能力^[37],在实验组 B、C 和 D 中成为占比前三的优势菌,且在 PES 微塑料和 2,4-DCP 共同存在的情况下 Actinobacteria 的丰度更大;同时 Actinobacteria 在厌氧生物处理的水解过程中起着关键作用,这也可解释图 3 中实验组 EPS 中蛋白和多糖含量较低的原因^[37].通过图 7 还发现,对照组中 Bacteroidetes 丰度高于实验组, Bacteroidetes 可降解高分子化合物,并倾向于附着在污泥颗粒上,以增强有机底物的生物利用度,从而支持代谢细菌的生长^[38].这也体现在了实验组中的 COD 去除率低于对照组.

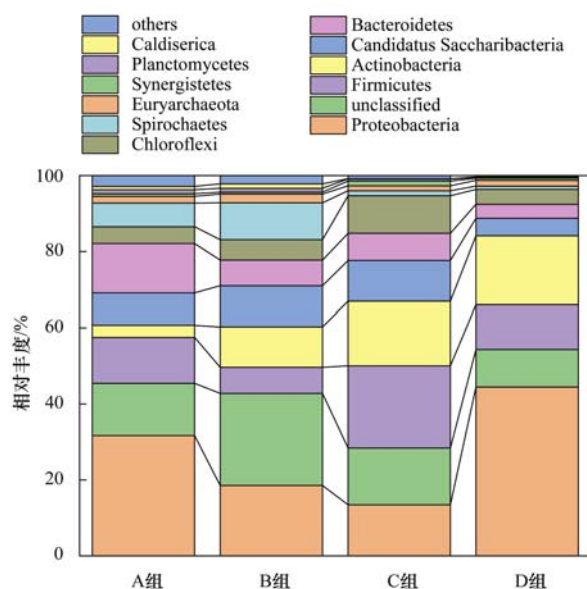


图 7 门水平的微生物群落丰度

Fig. 7 Abundances of the microbial community at the phylum level

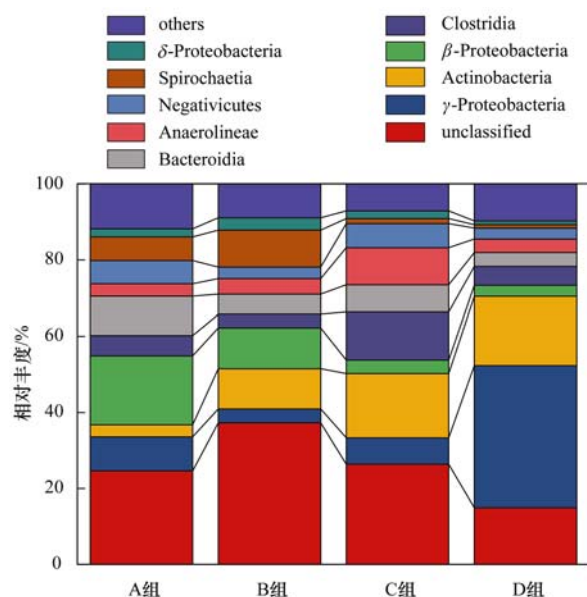


图 8 纲水平的微生物群落丰度

Fig. 8 Abundances of the microbial community at the class level

如图 8 所示,对照组和实验组的细菌群落分布在纲水平下也有明显差异,占比前 5 的细菌分别是 γ -Proteobacteria (3.65% ~ 37.42%)、Actinobacteria (3.16% ~ 18.11%)、 β -Proteobacteria (2.87% ~ 18.15%)、Clostridia (3.53% ~ 12.54%) 和 Bacteroidia (3.65% ~ 10.27%)。投加了 PES 微塑料或 2,4-DCP 的实验组 B、C 和 D 中 Actinobacteria 含量相比于对照组分别增加了 7.44%、13.74% 和 14.95%,这表明不利环境的条件下会促进 Actinobacteria 的生长,而有学者研究表明 Actinobacteria 在物质再循环中起着重要作用,其能够代谢复杂的有机物,所以在投加了 PES + 2,4-DCP 的实验组 D 中 Actinobacteria 增加更为明显^[39].与对照组 A 相比,实验组 B、C 和 D 的 β -Proteobacteria 含量分别减少了 7.47%、14.60% 和 15.28%,可见 PES 微塑料和 2,4-DCP 均会抑制 β -Proteobacteria 的生长,且 2,4-DCP 对 β -Proteobacteria 的抑制更为明显. β -Proteobacteria 和 γ -Proteobacteria 属于 Proteobacteria 的两个主要类别,是有机物降解的主要参与者^[40].

2.4.3 PICRUST 分析细菌群落的基因功能

图 9 显示了基于 PICRUST 的预测功能.细菌结构域中注释的序列主要分为 4 个功能组,分别为代谢 (57.92% ~ 59.62%)、遗传信息处理 (19.79% ~ 20.93%)、环境信息处理 (15.35% ~ 17.44%) 和细胞过程 (4.44% ~ 4.95%).代谢功能组中对照组的丰度为 59.62%,实验组 B、C 和 D 的丰度分别为 58.21%、57.98% 和 57.91%.在代谢组中最为丰富的功能类型是氨基酸代谢 (A: 12.23%; B: 12.06%; C: 11.72%; D: 12.39%)、碳水化合物代谢 (A: 12.03%; B: 12.52%; C: 12.51%; D: 11.96%) 和能量代谢 (A: 7.08%; B: 7.33%; C: 7.80%; D: 7.47%).丰富的氨基酸转运和代谢,碳水化合物转运和代谢以及能量产生和转化与细菌的生长和繁殖相关^[36].由于 Proteobacteria 和 Bacteroidetes 具有养分利用和能量产生的能力,因此其在门水平下的丰度较高^[41].通常在代谢组中,单个功能类别占比数量彼此接近时,这意味着有机污染物分解过程中微生物群落功能的相对稳定性.遗传信息处理组中最为丰富的功能类型是复制与修复 (A: 8.59%; B: 8.54%; C: 8.98%; D: 8.80%).环境信息处理组中最为丰富的功能类型是膜运输 (A: 14.26%; B: 14.89%; C: 13.73%; D: 12.78%),膜运输功能基因的丰度在实验组 C、D 中明显减少.

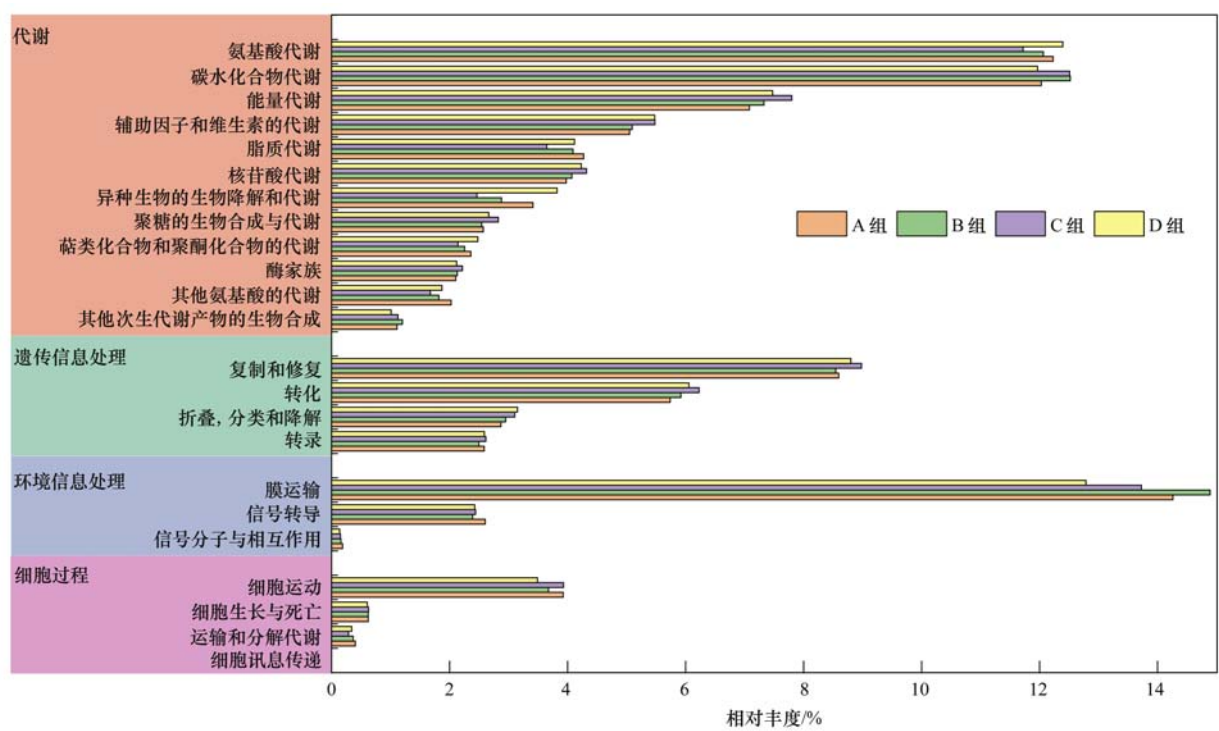


图 9 PICRUST 预测细菌群落中功能基团的相对丰度

Fig. 9 Relative abundance of the functional groups in the bacterial community predicted by PICRUST

3 结论

(1)2,4-DCP 对厌氧颗粒污泥去除 COD 造成较大影响,而 PES 微塑料对厌氧颗粒污泥去除 COD 未造成明显抑制;投加 PES + 2,4-DCP 后,厌氧颗粒污泥 LB-EPS 中蛋白及多糖含量同对照组相比出现了降低;2,4-DCP 对污泥中乙酸激酶活性影响较大,PES 微塑料与 2,4-DCP 均会抑制污泥中辅酶 F₄₂₀ 的活性。

(2)投加 PES 微塑料和 2,4-DCP 的实验组,厌氧颗粒污泥中微生物群落多样性与丰度均出现了降低.投加了 PES 微塑料或 2,4-DCP 的实验组 Actinobacteria 所占比例增加,同时 Firmicutes 在 2,4-DCP 实验组中为优势菌群.在基因结构功能分析中,代谢组中最为丰富的功能类型为氨基酸代谢、碳水化合物代谢与能量代谢,其与细菌的生长和繁殖相关。

(3)总体而言,在本研究中 PES 微塑料对厌氧颗粒污泥特性未造成明显影响;而 2,4-DCP 作为代表性的酚类化合物,对厌氧颗粒污泥特性与微生物群落造成了较大影响,因此后续可对厌氧生物系统进行强化,减缓 2,4-DCP 的不利影响,提高含难生物降解废水的处理效能。

参考文献:

[1] Zhang Z W, Xi H B, Yu Y, *et al.* Performance and prediction model of a HA + A/O process in the lab-scale under the load shock of 2, 4-dichlorophenol [J]. Process Safety and

Environmental Protection, 2019, **130**: 31-38.

[2] Zhao J G, Li Y H, Chen X R, *et al.* Effects of carbon sources on sludge performance and microbial community for 4-chlorophenol wastewater treatment in sequencing batch reactors [J]. Bioresource Technology, 2018, **255**: 22-28.

[3] Ge T T, Han J Y, Qi Y M, *et al.* The toxic effects of chlorophenols and associated mechanisms in fish [J]. Aquatic Toxicology, 2017, **184**: 78-93.

[4] Wang F, Wong C S, Chen D, *et al.* Interaction of toxic chemicals with microplastics: a critical review [J]. Water Research, 2018, **139**: 208-219.

[5] 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 等. 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 [J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4105-4112.

Jia Q L, Chen H, Zhao X, *et al.* Removal of microplastics by different treatment processes in Shanghai large municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4105-4112.

[6] Wang G Q, Li J W, Sun W C, *et al.* Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model [J]. Water Research, 2019, **157**: 238-246.

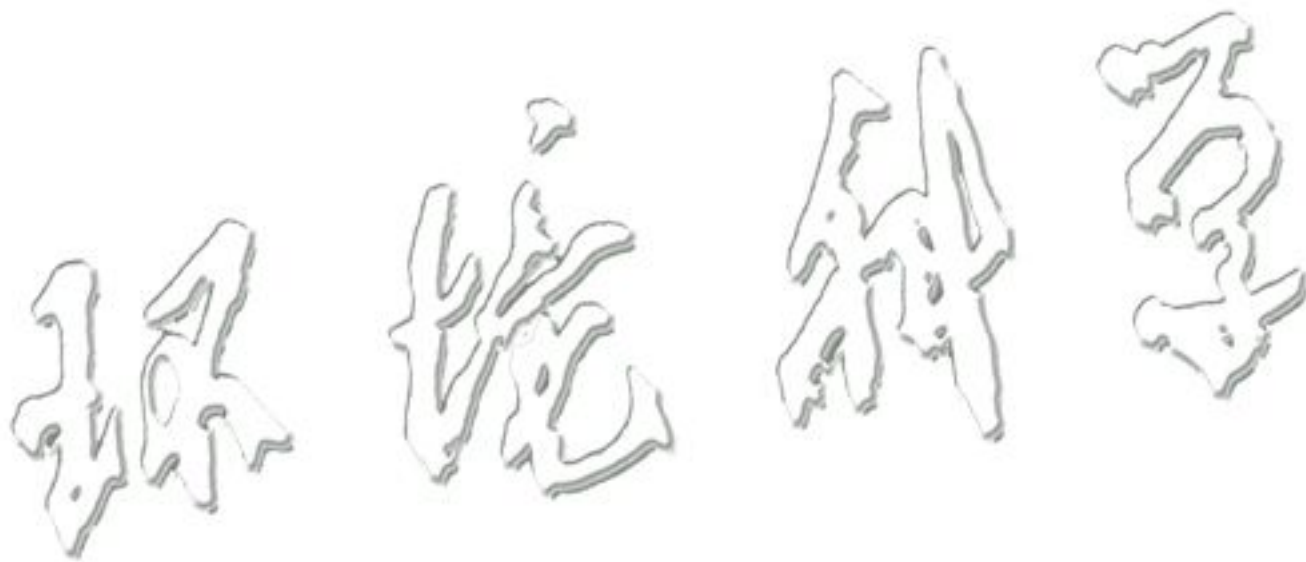
[7] Qu H, Ma R X, Wang B, *et al.* Enantiospecific toxicity, distribution and bioaccumulation of chiral antidepressant venlafaxine and its metabolite in loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) co-exposed to microplastic and the drugs [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **370**: 203-211.

[8] Zhang H B, Zhou Q, Xie Z Y, *et al.* Occurrences of organophosphorus esters and phthalates in the microplastics from the coastal beaches in North China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 1505-1512.

[9] Kanhai L D K, Johansson C, Frias J P G L, *et al.* Deep sea sediments of the Arctic Central Basin: a potential sink for microplastics [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2019, **145**: 137-142.

- [10] Peng L C, Fu D D, Qi H Y, *et al.* Micro-and nano-plastics in marine environment: source, distribution and threats-a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **698**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134254.
- [11] Wei W, Zhang Y T, Huang Q S, *et al.* Polyethylene terephthalate microplastics affect hydrogen production from alkaline anaerobic fermentation of waste activated sludge through altering viability and activity of anaerobic microorganisms [J]. *Water Research*, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114881.
- [12] Feng Q, Tai X R, Sun Y Q, *et al.* Influence of turbulent mixing on the composition of extracellular polymeric substances (EPS) and aggregate size of aerated activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **378**, doi: 10.1016/j.cej.2019.122123.
- [13] Shao Y X, Zhang H X, Buchanan I, *et al.* Comparison of extracellular polymeric substance (EPS) in nitrification and nitrification bioreactors [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, **143**, doi: 10.1016/j.ibiod.2019.06.001.
- [14] More T T, Yadav J S S, Yan S, *et al.* Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **144**: 1-25.
- [15] Feng L Y, Chen Y G, Zheng X. Enhancement of waste activated sludge protein conversion and volatile fatty acids accumulation during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition: the effect of pH [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (12): 4373-4380.
- [16] Yang W W, Huang J, Pan F K. Polychlorinated biphenyls affects anaerobic methane production from waste activated sludge through suppressing hydrolysis-acidification and methanation processes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **251**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109616.
- [17] Zhao J W, Zhang C, Wang D B, *et al.* Revealing the underlying mechanisms of how sodium chloride affects short-chain fatty acid production from the cofermentation of waste activated sludge and food waste [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, **4** (9): 4675-4684.
- [18] Fu S F, Ding J N, Zhang Y, *et al.* Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 64-70.
- [19] 潘煜, 孙力平, 陈星宇, 等. CMC 改性纳米 Fe/Cu 双金属模拟 PRB 去除地下水中 2,4-二氯苯酚 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (9): 3789-3796.
- Pan Y, Sun L P, Chen X Y, *et al.* Removal of 2, 4-dichlorophenol from groundwater by PRB simulated by CMC modified nanoscale Fe/Cu bimetal [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (9): 3789-3796.
- [20] Collado N, Buttiglieri G, Marti E, *et al.* Effects on activated sludge bacterial community exposed to sulfamethoxazole [J]. *Chemosphere*, 2013, **93** (1): 99-106.
- [21] 程诚, 朱琳, 郭凯成, 等. 不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (4): 1808-1815.
- Cheng C, Zhu L, Guo K C, *et al.* Characteristics of organics transformation and sludge morphology in an ABR for sewage treatment with different HRTs [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (4): 1808-1815.
- [22] Liang Z W, Li W H, Yang S Y, *et al.* Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2010, **81** (5): 626-632.
- [23] 杨明明, 刘子涵, 周杨, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 及其对污泥表面特性的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (5): 2341-2348.
- Yang M M, Liu Z H, Zhou Y, *et al.* Extracellular polymeric substances of ANAMMOX granular sludge and its effects on sludge surface characteristics [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2341-2348.
- [24] Chen H B, Zeng X N, Zhou Y Y, *et al.* Influence of roxithromycin as antibiotic residue on volatile fatty acids recovery in anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **394**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122570.
- [25] 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 等. 羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (7): 3365-3372.
- Xing C Y, Fan Y C, Chen X, *et al.* Effect of hydroxylamine on community of ANAMMOX sludge [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (7): 3365-3372.
- [26] Yin Y J, Sun J, Liu F Y, *et al.* Effect of nitrogen deficiency on the stability of aerobic granular sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **275**: 307-313.
- [27] Wang B B, Shi X, Liu X T, *et al.* Insight into the Fenton-induced degradation process of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2019, **234**: 318-327.
- [28] Yan Z R, Meng H S, Yang X Y, *et al.* Insights into the interactions between triclosan (TCS) and extracellular polymeric substance (EPS) of activated sludge [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **232**: 219-225.
- [29] Li D Z, Zhou Y, Tan Y M, *et al.* Alkali-solubilized organic matter from sludge and its degradability in the anaerobic process [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 579-586.
- [30] Zhu L, Zhou J H, Lv M L, *et al.* Specific component comparison of extracellular polymeric substances (EPS) in flocs and granular sludge using EEM and SDS-PAGE [J]. *Chemosphere*, 2015, **121**: 26-32.
- [31] Qu F S, Liang H, He J G, *et al.* Characterization of dissolved extracellular organic matter (dEOM) and bound extracellular organic matter (bEOM) of *Microcystis aeruginosa* and their impacts on UF membrane fouling [J]. *Water Research*, 2012, **46** (9): 2881-2890.
- [32] Xu Q X, Li X M, Ding R R, *et al.* Understanding and mitigating the toxicity of cadmium to the anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2017, **124**: 269-279.
- [33] Zeng T T, Zhang S Q, Gao X, *et al.* Assessment of bacterial community composition of anaerobic granular sludge in response to short-term uranium exposure [J]. *Microbial Ecology*, 2018, **76** (3): 648-659.
- [34] Yan X, Luo X G, Zhao M. Metagenomic analysis of microbial community in uranium-contaminated soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100** (1): 299-310.
- [35] Liu J, Li J, Wang X D, *et al.* Rapid aerobic granulation in an SBR treating piggy wastewater by seeding sludge from a municipal WWTP [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **51**: 332-341.
- [36] Liu Y R, Wei D, Xu W Y, *et al.* Nitrogen removal in a combined aerobic granular sludge and solid-phase biological denitrification system: System evaluation and community structure

- [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **288**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121504.
- [37] Kim Y H, Cha C J, Engesser K H, *et al.* Degradation of various alkyl ethers by alkyl ether-degrading *Actinobacteria* isolated from activated sludge of a mixed wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(9): 1442-1447.
- [38] Biswal B K, Wang W, Tang C J, *et al.* Elucidating the effect of mixing technologies on dynamics of microbial communities and their correlations with granular sludge properties in a high-rate sulfidogenic anaerobic bioreactor for saline wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **297**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122397.
- [39] Alvarez A, Saez J M, Dávila Costa J S, *et al.* Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2017, **166**: 41-62.
- [40] Miao Y, Liao R H, Zhang X X, *et al.* Metagenomic insights into Cr(VI) effect on microbial communities and functional genes of an expanded granular sludge bed reactor treating high-nitrate wastewater[J]. *Water Research*, 2015, **76**: 43-52.
- [41] Zhou L J, Gao Y, Yu K, *et al.* Microbial community in *in-situ* waste sludge anaerobic digestion with alkalization for enhancement of nutrient recovery and energy generation [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **295**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122277.



CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)