

 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



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性

王杨¹, 朱斌², 童俊³, 白晓慧^{1*}

(1. 上海交通大学生命科学技术学院, 微生物代谢国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海城投(水务)集团有限公司, 上海 200002; 3. 上海市供水调度监测中心, 上海 200080)

摘要: 管网生物膜由各种活性微生物、微生物残体及有机无机杂质组成, 管网生物膜的生长会导致机会致病菌寄居、管道腐蚀以及水质恶化等系列饮用水卫生问题. 为研究供水管壁生物膜形成过程和附着生长活性微生物的分布特征, 采用异养菌平板计数(HPC)、流式细胞术(FCM)和16S rRNA高通量测序对3种典型室内供水管材: 聚氯乙烯(PVC)、无规共聚聚丙烯(PPR)、不锈钢(STS)内壁活性微生物的生长特性和群落多样性进行了分析. 结果表明, PVC管壁生物量在第73 d最先达到峰值, 3种管材内壁单位面积最大生物量、生物膜成熟时期生物量均呈现PVC > PPR > STS的规律. 3种管材表面活性细菌群落结构组成上, PVC管表面主要以硝化螺旋菌门为主, PPR和STS管以疣微菌门为主, 其中STS管壁上生物膜物种丰富度最低、多样性最小, 群落结构最简单. PVC和PPR管内壁表面相较STS管存在更多的蓝藻细菌和放线菌, 在饮用水输配过程中更易引发饮用水嗅味问题. 管材介质对管壁生物膜上微生物群落结构存在一定影响.

关键词: 供水管网; 生物膜; 管材; 活性微生物; 群落结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0853-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806154

Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms

WANG Yang¹, ZHU Bin², TONG Jun³, BAI Xiao-hui^{1*}

(1. State Key Laboratory of Microbial Metabolism, School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Chentou Water Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 3. Shanghai Municipal Water Supply Control & Monitoring Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: Biofilm in the water distribution system is composed of various active microorganisms, microbial residues, and organic and inorganic impurities. The growth of pipeline biofilms causes several drinking water hygiene problems, such as the colonization of opportunistic pathogens, corrosion of pipelines, and deterioration of water quality. To investigate the biofilm formation process and the distribution characteristics of live microorganisms attached to drinking water pipe walls, heterotrophic plate count (HPC), flow cytometry (FCM), and high-throughput 16S rRNA sequencing were analyzed to examine the growth characteristics and diversity of active microorganisms on the wall of three typical building water supply pipeline materials: polyvinyl chloride (PVC), polypropylene random (PPR), and stainless steel (STS). The results showed that after 73 d, the biomass on the PVC pipe wall was firstly up to peak. The relationships between the maximum biomass and mature biofilm biomass per unit area among the three pipelines were both PVC > PPR > STS. Regarding the composition and structure of the biofilm active bacterial community on the three different pipelines, the predominant phylum on PVC was Nitrospirae, while Verrucomicrobia was predominant on PPR and STS. The species richness and diversity of biofilm on STS were smallest, and thus the community structure was the simplest. Compared to STS, there were more Cyanobacteria and Actinomycetes on PVC and PPR—hence, odor is more likely to be an issue. The results demonstrated that pipe material can affect the community structure of the attached biofilm.

Key words: water distribution system; biofilm; pipeline material; active microorganisms; community structure

生物膜是饮用水输配管网中常见的微生物存在形式, 是悬浮水中微生物通过自凝聚附着在管壁上的膜状微生物聚集体^[1]. 一方面, 生物膜上活性微生物通过自身新陈代谢活动和自发周期性脱落, 造成饮用水水质恶化^[2] (浊度、色度和嗅味等) 和微生物诱导的化学腐蚀^[3] 等问题; 另一方面, 微生物以生物膜方式存在, 不仅大大增强了饮用水中细菌对高氯和寡营养等胁迫性环境的适应性^[4], 而且为饮用水中残留受损微生物的恢复性再生长^[5], 尤其是强吸附性致病菌的寄居生长创造了良好条件^[6]. 管壁生物膜中的活性微生物可以通过细菌再生后

的脱落或代谢产物的扩散作用, 给居民饮水带来卫生学和感官上影响.

由于表面粗糙度和自身理化性能的差异, 供水管网中不同管材上形成的生物膜差别很大. 管材特性成为影响生物膜形成的重要因素之一^[7]. 张向谊等^[8] 采用平板计数琼脂 (PCA) 和营养琼脂 (NA) 培养的手段在数量上研究了镀锌钢、铸铁、硬质聚氯

收稿日期: 2018-06-17; 修订日期: 2018-08-08

基金项目: 国家水体控制与治理科技重大专项 (2017ZX07207-004, 2017ZX07207-005); 国家自然科学基金项目 (51878406)

作者简介: 王杨 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水水质生物学, E-mail: wangyang2016@sjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xhbai@sjtu.edu.cn

乙烯 (UPVC)、不锈钢和聚乙烯 (PE) 管材对管壁微生物生长的影响; 王薇等^[9]结合 HPC、定量 PCR (qPCR) 和 16S rRNA 基因高通量测序等手段比较了灰口铸铁管、镀锌管和不锈钢复合管上生物量和种群多样性; Ren 等^[10]采用 HPC、qPCR 和 454 焦磷酸测序技术分别从数量和多样性上研究了球墨铸铁管 (DCIP)、灰铸铁管 (GCIP)、镀锌钢管 (GSP)、不锈钢复合管 (SSCP) 和聚氯乙烯管 (PVC) 对生物膜形成的影响. 这些研究多集中于城市供水干管, 对建筑区域内饮用水输配管材很少关注. 同时, 以往管壁生物膜的研究多采用可培养计数方法和基于 16S rDNA 的分子检测方法, 不能反映供水管壁不可培养细菌数量和活性微生物多样性信息.

在已应用于管网生物膜生物多样性相关研究方法中, 常规 16S rRNA 基因高通量测序技术 (high-throughput sequencing, HGS) 测序对象为基因组 DNA, 然而 DNA 会在细胞死亡后依旧持续存在于环境中^[11], 因此常规 16S rRNA 基因高通量测序技术无法客观反映供水管中活性微生物带来的风险. 16S rRNA 高通量测序是一种直接利用半衰期较短的 RNA 进行测序的手段^[12], 能够较为直接地反映出活性微生物的特征, 不仅能够进一步提高对饮用水中活性微生物群落多样性和细菌种群动态的理解, 还可以开发针对饮用水中活性细菌的分子谱学技术^[13]. 另外, qPCR 也是一种基于基因组 DNA 进行微生物定量的分子手段, 结果中包含了已经死亡的微生物以及胞外聚合物中的游离 DNA. 异养菌平板计数 (HPC) 可以反映饮用水中可培养细菌的数量, 但不能客观反映非培养细菌的信息. 荧光染色与流式细胞术 (FCM) 的结合可以对饮用水中的活性不可培养微生物进行快速定量分析^[14]. 本研究采用 HPC、流式细胞术 (FCM) 和 16S rRNA 高通量测序技术, 利用生物膜环形反应器 (BAR) 分析了 3 种常用室内管材 (PVC、PPR 和 STS) 表面活性生物膜生长特性和活性微生物种群多样性特征. 本文可对供水末端改善供水水质, 控制微生物风险提供有益参考.

1 材料与方法

1.1 生物膜培养装置与样品采集

采用生物膜环形反应器 (biological annular reactor, BAR, 图 1) 研究不同管材生物膜生长^[15]. 实验前用 NaClO 溶液对 BAR 反应器、挂片和进水管进行消毒灭菌, 用自来水冲洗干净. 本实验原水为末端龙头水. PVC、PPR 和 STS 挂片各 7 个, 面积分别约 7.07、6.60 和 4.71 cm². BAR 反应器

的进水流量为 285 mL·min⁻¹, 水力停留时间为 0.52 h, 有效容积为 7 650 mL, 剪切力约为 9.46 × 10⁻⁷ N·m⁻². 生长 10 个月后的生物膜为生物膜成熟期样本. 运行启动后定期采样. 取样方法为: 用无菌棉擦拭一定面积挂片表面, 用无菌剪刀将棉签头剪入无菌 2 mL 离心管中, 加入 1 mL 无菌 PBS, 冰浴超声 1 min, 间歇 1 min, 重复 3 次, 然后再漩涡振荡 30 s, 4℃ 保存.

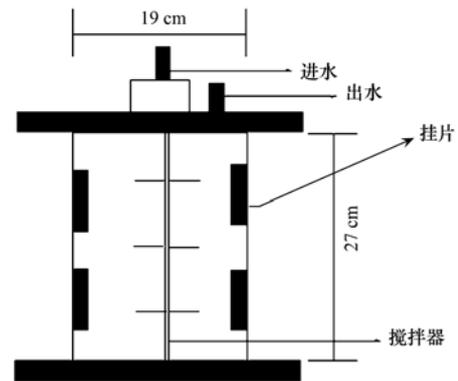


图 1 生物膜环形 (BAR) 反应器装置示意
Fig. 1 Biological annular reactor for biofilm growth

1.2 水质参数测定

本实验用水为末端龙头水, 总磷、氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐等常规指标按国家标准方法测定^[16], 采用 HACH PC II 型水质分析仪 (HACH, 美国) 检测余氯浓度; HACH 2100Q 便携式浊度仪 (HACH, 美国) 检测浊度; HACH DR2800 分光光度计 (HACH, 美国) 进行总铁测定; TOC 分析仪 (SHIMADZU, 日本) 进行 TOC 测定; 台式 pH 计 (Mettler Toledo, 美国) 进行 pH 值测定; 温度计进行水温检测; NA、R2A 平板培养分别进行总菌和 HPC 计数. 各项水质参数如表 1 所示.

1.3 异养菌平板计数 (heterotrophic plate count, HPC)

按标准方法配制 R2A 培养基, 将预处理后的样品逐级稀释至 10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵ 这 3 个浓度梯度, 取 100 μL 进行平板涂布, 每个梯度 3 个平行, 并使用无菌水做空白对照. 平板涂好后在 28℃ 下倒置暗培养 7 d 后进行计数.

1.4 死活细胞染色与流式细胞计数 (flow cytometry, FCM)

将 SYBR Green I 原液用 0.22 μm 滤膜过滤后的二甲亚砜 (DMSO) 稀释 100 倍配制成 SYBR Green I 标准液, 称取 10 mg 碘化吡啶 (PI) 溶解于 DMSO (0.22 μm 滤膜滤后), 按 1:50 与 Green I 标准液混合为 SYPI 标准液. 将样品使用中速定量滤纸过滤以去除大颗粒物质对检测结果的干扰, 稀释至合适

浓度 ($10^2 \sim 10^5 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$), 取 1 mL 于 37°C 金属浴 5 min 后, 加入 $10 \mu\text{L}$ $0.5 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA-2Na, 混

匀后加入 $10 \mu\text{L}$ SYBR Green I 标准液和 $10 \mu\text{L}$ SYPI 标准液, 37°C 避光孵育 10 min 后, 混匀上样。

表 1 实验用水水质(平均值 \pm 标准偏差)

Table 1 Water quality parameters(mean \pm standard deviation)

检测项目	检测值	检测项目	检测值
温度/ $^\circ\text{C}$	16.97 ± 0.21	pH	7.51 ± 0.01
总铁/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.07 ± 0.00	余氯/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.04 ± 0.01
浊度/NTU	0.10 ± 0.01	TOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.37 ± 0.01
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.005 ± 0.001	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$	0.374 ± 0.004
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.279 ± 0.005	$\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.034 ± 0.001
总菌/ $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	7 ~ 10	HPC/ $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	700 ~ 1200

流式细胞仪使用参照 BD FACS Calibur 使用说明^[11]. 选择 PI(630 nm)和 SYBR Green I (520 nm) 光学过滤器, 绿色荧光(520 nm)通道(FL1) 触发器, 在绿色荧光(520 nm)与红色荧光(630 nm)参数点上获得数据。

1.5 RNA 提取、反转录和高通量测序

取适量的预处理生物膜样本用 Omega Soil RNA Kits 提取细菌基因组总 RNA, 于 -80°C 保存. 将提取的 RNA 用 Revert Aid First Strand cDNA Synthesis Kit 反转录为 cDNA, 于 -20°C 保存. 以生物膜上提取活菌的基因组(cDNA)作为模板进行 16S rRNA 基因扩增和二代测序, 以 515F 和 806R 为引物, 采用 Illumina S5 平台进行目的条带为 291bp 的扩增. 本次测序由上海烈冰生物医药科技有限公司完成。

1.6 HGS 数据预处理和分析

使用 Fast-QC 软件对所有的 16S rRNA 基因序列的 reads 进行处理分析. 采用 QiiME 去除嵌合体序列后, 得到可以用于后续分析的 Clean Data, 进而采用 QiiME 算法包中的 Uclust 聚类策略对所有序列进行聚类. OTU 中序列相似性设为 97%, 并选取其中的代表性 OTU 序列. 基于 Silva 数据库 (<https://www.arb-silva.de/>) 对测序结果进行比对分析, 得到 OTU 的科属注释。

2 结果与讨论

2.1 不同管材表面生物膜的生长特性

以末端龙头水为原水, 考察 PVC、PPR 和 STS 这 3 种管材上生物膜的生长规律. 如图 2 所示, PVC 管上的生物量在约 73 d 后首先达到峰值, PPR 和 STS 约 90 d 后达到. 经过一个生命周期, 生物膜最终发展至成熟期, 微生物数量相对稳定. 在此期间, 生长曲线峰值处显示的最大生物量规律为 PVC > PPR > STS, 其中 PVC 最高, 达 $6.7 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$; 其次是 PPR, 为 6.3×10^5

$\text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$; STS 最少, 为 $3.6 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$, 最终成熟时期的生物量规律与最大生物量一致, 即 PVC 最多, 达 $6.7 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$; PPR 次之, 为 $4.2 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$; STS 最少, 为 $2.2 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$. 显然, STS 表面最不易生物膜生长. 相对于 PVC 而言, 由于 STS 内壁存在由 Cr_2O_3 形成的致密的钝化膜, 不易造成微生物诱导的管壁腐蚀; 同时 STS 管壁粗糙度较低, 细菌附着生长的条件相对较差, 大分子营养物质也较难在管壁沉积, 因此细菌数量明显较低^[9]. 而 PVC 和 PPR 是疏水性材料, 与悬浮微生物表面疏水基团的相互作用会极大地促进生物膜形成时的初始吸附^[17]; 同时, PVC 表面的孔洞和缝隙较多, 水中的余氯不易渗透, 水流不易冲刷, 因而形成了细菌生长的良好场所^[18]; 另外, 由于微生物能够少量代谢塑料管材的特定成分^[19], 因此塑料管材自身也可以一定程度上为微生物生长提供营养。

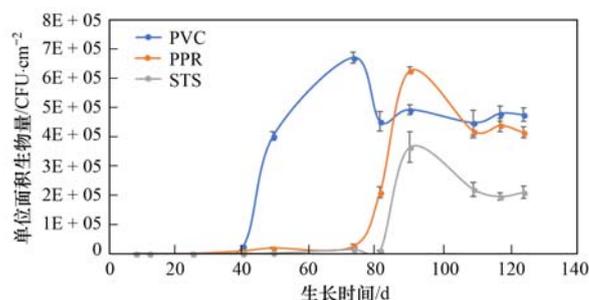


图 2 不同管材表面生物膜的生长曲线

Fig. 2 Biofilm growth on different pipeline surfaces

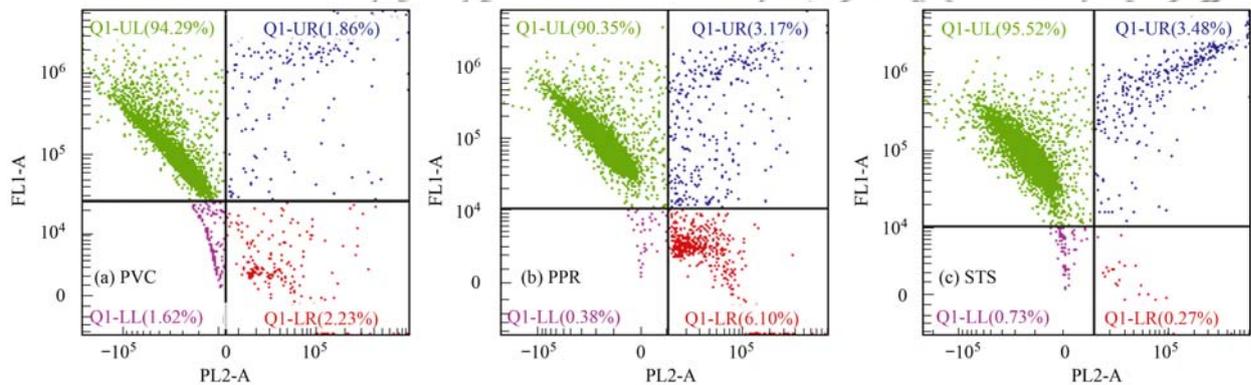
为进一步验证不同管材表面生物膜生长特征, 本研究采用 SYBR green I 和碘化丙啶(PI) 双染方法对管壁生物膜上细胞死、活状态进行了检测^[14]. 其中, 染料 SYBR 能够穿透活细胞完整的细胞膜与核酸物质结合产生 520 nm(绿色) 荧光(FL1 通道); 染料 PI 只能穿透结构受损的细胞膜与其核酸物质结合, 产生 617 nm(红色) 荧光(FL2 通道). 采用 FCM 测定生物膜上的总细菌数发现,

PVC > PPR > STS(表 2). 3 种管材生物膜上的微生物大部分以有活性的状态存在(90.35% ~ 95.52%), 仅有少数以受损状态(1.86% ~ 3.48%)或死亡的状态(0.27% ~ 6.10%)存在(图 3). 说明作为一个复杂的有机群体, 生物膜上的微生物虽然面临着寡养和余氯等外界环境胁迫和微生物群体间激烈的种间竞争. 但是, 由于生物膜上物种间独特的合作与交流机制, 以及胞外聚合物对生物膜群落的保护作用, 使得生物膜上的大部分微生物能够存活并行使正常的生命活动. 其中, STS 管材上的活细胞占比最高, 达 95.52%; 其次为 PVC, 活细胞占比为 94.29%;

表 2 不同管材表面生物膜的总菌数、活菌数及活菌比例(成熟时期)

Table 2 Total bacteria, living bacteria, and the rate of living bacteria on different pipe surface(mature stage)

项目	FCM			HPC/CFU·cm ⁻²	HPC 占活菌百分比/%
	总菌数/cell·cm ⁻²	活菌比例/%	活菌数/cell·cm ⁻²		
PVC	4.58 × 10 ⁸	94.29	4.32 × 10 ⁸	4.71 × 10 ⁵	0.11
PPR	4.25 × 10 ⁸	90.35	3.84 × 10 ⁸	4.20 × 10 ⁵	0.11
STS	1.75 × 10 ⁸	95.59	1.67 × 10 ⁸	2.15 × 10 ⁵	0.13



FL1-A: 染料 SYBR Green I 的荧光强度相对表达量, 用于表征活性细胞; FL2-A: 染料 PI 的荧光强度相对表达量, 用于表征死亡细胞

图 3 不同管材生物膜中微生物的存在状态

Fig. 3 Survival status of microorganisms from biofilms of different pipelines

2.2 不同管材表面活性微生物的物种多样性与群落组成

各样本数据经抽平^[20]后细菌的丰富度及多样性如表 3. Shannon 指数显示, STS 管上的活细菌物种多样性最小、群落结构最简单. PVC 和 PPR 是疏水材料, 而饮用水中的微生物为了抵御消毒剂等毒害物质的渗入, 在外膜上大多会存在一些疏水结构(如纤毛等), 或者微生物自身会分泌一些具有疏水性的物质(如胞外蛋白等)包裹在细胞外层以实现

自我保护^[21], 因此水中悬浮微生物可以与上述两种管材通过彼此间疏水基团的相互作用在管材内壁更好地形成相对复杂的微生物群落结构. 而 STS 管作为一种亲水材料, 不易与大多数具有疏水结构的微生物相互作用形成生物膜, 因此 STS 管上所形成的生物膜群落结构更加单一. 不同管材上 OTUs 和丰富度的变化规律与多样性一致.

将所有样本进行抽平后, 对 OTU 进行注释得到不同管材生物膜上活性微生物的群落组成(图

表 3 不同管材生物膜微生物群落的丰富度与多样性指数

Table 3 Community richness and diversity index for microbial communities in the biofilms of different pipelines

项目	OTUs ¹⁾	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数
PVC	4 852	6 421.01	6 903.66	9.89
PPR	4 771	6 035.17	6 601.19	9.83
STS	4 598	6 112.00	6 579.04	9.44

1) 序列数归一化至 19173

4). 3 种管材上活性微生物的整体组成大致相似, 优势菌群均为疣微菌门 (Verrucomicrobia)、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 和变形菌门 (Proteobacteria), 同时伴随少许差异: PVC 管上的最优势活菌为疣微菌门 (Verrucomicrobia), 占比为 36%; PPR 和 STS 管上活菌最优势菌门相同, 均为硝化螺旋菌门 (Nitrospirae), 占比分别为 29% 和 37%; PVC 管壁生物膜中含有较多的活蓝藻细菌 (Cyanobacteria), 占总活菌的 12.40%, 而在 PPR 和 STS 中分别仅占 8.87% 和 7.69%; PPR 管壁生物膜中含有较多的活性放线菌 (Actinobacteria), 占总活菌的 0.83%, 在 PVC 和 STS 分别仅占 0.48% 和 0.47%.

由于蓝藻是硫醇、甲酯类等臭味硫化物和土霉味臭味物质的来源, 会引起饮用水鱼腥味和土霉味^[22]; 放线菌会产生具有土霉味的代谢产物, 如 Geosmin 和 2-MIB^[23], 因此 PVC 和 PPR 管相较 STS 管材, 在饮用水输配过程中更易引发饮用水的臭味问题.

在 PVC 和 STS 样本中, 存在较高丰度的有柄细菌属类, 如大多存在于铁丰富的自然环境中的生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*), 通过对铁和锰的氧化获取能量来源. 供水管网中的有柄微生物也一般被包裹在不溶性的铁盐沉积物中^[24]. 因此, 在 3 个样本中, 生丝微菌属更加倾向于在含有铁成分的不锈钢管壁上成膜. 同时, 由于微生物自身结构特征, 生丝微菌属极易在粗糙度较高的管壁如 PVC 上形成生物膜. 而在 PPR 样本中, 丰度最高的是 *Paludibaculum*, 这个属别的某些微生物能够将 3 价铁作为电子受体, 从而进行 3 价铁的微生物还原^[25]. 因此, PPR 上的 *Paludibaculum* 通过将溶解在饮用水中的 3 价铁离子还原成不可溶的铁单质颗粒附着在 PPR 管上, 在增加管壁颗粒度以促进微生物黏附形成生物膜的同时, 还为已经形成的生物膜组分中某些铁氧化细菌提供能量来源. 3 个样本中均含有高丰度的硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*), 这将会使饮用水中的亚硝酸盐氮充分转变为硝酸盐氮, 造成饮用水中硝酸盐积累.

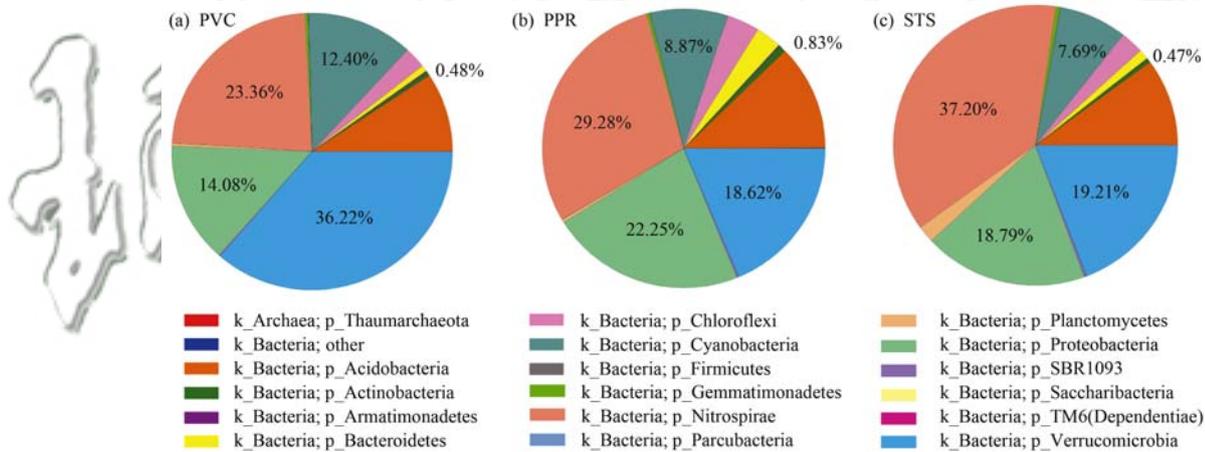


图 4 不同管材生物膜上活性微生物相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of live bacteria in the biofilms of different pipelines

3 结论

(1) 3 种研究管材中, PVC 管壁上活性微生物量最先达到峰值, PPR 和 STS 随后. 3 种管材上单位面积最大生物量, 成熟时期生物膜生物量均为 PVC > PPR > STS. 相对于 PVC 和 PPR, STS 表面最不易生长微生物, 但生物量最少的 STS 管壁上活细胞比例最高.

(2) 相比 PVC 和 PPR, STS 管壁上的活性微生物种类最少、多样性最低、群落结构最简单. PVC 和 PPR 管壁上致嗅微生物: 活性蓝藻细菌和放线菌占比都较高, 在输配过程中更易产生臭味问题.

参考文献:

[1] Niederdorfer R, Peter H, Battin T J. Attached biofilms and

suspended aggregates are distinct microbial lifestyles emanating from differing hydraulics [J]. *Nature Microbiology*, 2016, **1** (12): 16178.

[2] Martiny A C, Albrechtsen H, Arvin E, *et al.* Identification of bacteria in biofilm and bulk water samples from a nonchlorinated model drinking water distribution system: detection of a large nitrite-oxidizing population associated with *Nitrospira* spp. [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71** (12): 8611-8617.

[3] 尹朗, 赵丹, 张素佳, 等. 饮用水管网生物膜细菌群落特征及其对腐蚀的影响 [J]. *环境工程学报*, 2016, **10** (10): 5453-5458.

Yin L, Zhao D, Zhang S J, *et al.* Characteristics of biofilm bacterial communities in drinking water pipelines and their effects on corrosion [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10** (10): 5453-5458.

[4] Harrison J J, Turner R J, Ceri H. Persister cells, the biofilm matrix and tolerance to metal cations in biofilm and planktonic

- Pseudomonas aeruginosa* [J]. Environmental Microbiology, 2005, **7**(7): 981-994.
- [5] Douterelo I, Husband S, Loza V, et al. Dynamics of biofilm regrowth in drinking water distribution systems[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, **82**(14): 4155-4168.
- [6] September S M, Els F A, Venter S N, et al. Prevalence of bacterial pathogens in biofilms of drinking water distribution systems[J]. Journal of Water and Health, 2007, **5**(2): 219-227.
- [7] Wang H, Masters S, Hong Y J, et al. Effect of disinfectant, water age, and pipe material on occurrence and persistence of *Legionella*, *Mycobacteria*, *Pseudomonas aeruginosa*, and two amoebas[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(21): 11566-11574.
- [8] 张向谊, 刘文君, 高圣华, 等. 模拟配水管网中管材和余氯对生物膜形成的影响[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 303-306.
- Zhang X Y, Liu W J, Gao S H, et al. The influence of pipe materials and residual chlorine in the stimulant water distribution pipe net on the biofilm formation [J]. China Environmental Science, 2006, **26**(3): 303-306.
- [9] 王薇, 任红星, 胡震超, 等. 管材对供水管网生物膜微生物种群多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 699-704.
- Wang W, Ren H X, Hu Z C, et al. Impact of pipe materials on bacterial population diversity in drinking water biofilm[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(3): 699-704.
- [10] Ren H X, Wang W, Liu Y, et al. Pyrosequencing analysis of bacterial communities in biofilms from different pipe materials in a city drinking water distribution system of East China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(24): 10713-10724.
- [11] Berney M, Vital M, Hülshoff I, et al. Rapid, cultivation-independent assessment of microbial viability in drinking water [J]. Water Research, 2008, **42**(14): 4010-4018.
- [12] Moeseneder M M, Arrieta J M, Herndl G J. A comparison of DNA- and RNA-based clone libraries from the same marine bacterioplankton community [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, **51**(3): 341-352.
- [13] Revetta R P, Pemberton A, Lamendella R, et al. Identification of bacterial populations in drinking water using 16S rRNA-based sequence analyses [J]. Water Research, 2010, **44**(5): 1353-1360.
- [14] 刘晓露. 利用流式细胞仪对饮用水中细菌的快速检测[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [15] 郑丹, 刘文君, 徐洪福. 模拟配水管网中悬浮颗粒物对生物膜形成的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1236-1240.
- Zheng D, Liu W J, Xu H F. Effect of suspended particles on biofilms formation in simulated potable distribution [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1236-1240.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Takahashi H, Suda T, Tanaka Y, et al. Cellular hydrophobicity of *Listeria monocytogenes* involves initial attachment and biofilm formation on the surface of polyvinyl chloride [J]. Letters in Applied Microbiology, 2010, **50**(6): 618-625.
- [18] Pons L, Délia M L, Bergel A. Effect of surface roughness, biofilm coverage and biofilm structure on the electrochemical efficiency of microbial cathodes [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2678-2683.
- [19] Kilb B, Lange B, Schaule G, et al. Contamination of drinking water by coliforms from biofilms grown on rubber-coated valves [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2003, **206**(6): 563-573.
- [20] Horner-Devine M C, Lage M, Hughes J B, et al. A taxa-area relationship for bacteria [J]. Nature, 2004, **432**(7018): 750-753.
- [21] Saitou K, Furuhashi K, Kawakami Y, et al. Biofilm formation abilities and disinfectant-resistance of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from cockroaches captured in hospitals [J]. Biocontrol Science, 2009, **14**(2): 65-68.
- [22] Watson S B, Monis P, Baker P, et al. Biochemistry and genetics of taste- and odor-producing cyanobacteria [J]. Harmful Algae, 2016, **54**: 112-127.
- [23] Silvey J K G, Roach A W, Jenkins D I. The taste and odor producing aquatic actinomycetes [J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1975, **5**(2): 233-273.
- [24] Cerrato J M, Falkinham III J O, Dietrich A M, et al. Manganese-oxidizing and -reducing microorganisms isolated from biofilms in chlorinated drinking water systems [J]. Water Research, 2010, **44**(13): 3935-3945.
- [25] Kulichevskaya I S, Suzina N E, Rijpstra W I C, et al. *Paludibaculum fermentans* gen. nov., sp. nov., a facultative anaerobe capable of dissimilatory iron reduction from subdivision 3 of the Acidobacteria [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2014, **64**(8): 2857-2864.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)