

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响

李玥¹, 胡奇², 高大文^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 沈阳药科大学制药工程学院, 沈阳 110016)

摘要: 本研究采用一体式厌氧流化床膜生物反应器(integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor, IAFMBR)处理含苯并噻唑的高浓度合成废水, 考察了温度变化(35、25 和 15℃)对反应器运行效能, 膜污染情况和微生物群落结构的影响. 结果表明, 温度下降对反应器运行效能和膜污染情况产生不利影响. 当温度从 35℃ 下降到 15℃ 时, COD 去除率下降 7.4%, 苯并噻唑去除率下降 49.2%, 挥发酸总量上升 225.66 mg·L⁻¹, 甲烷产率(以 CH₄/COD_{removed} 计)下降 0.118 m³·kg⁻¹. 膜污染周期从 5.2 d 下降到 2.5 d. 对于滤饼层而言, 达到膜污染时, SMP (soluble microbial product) 的质量浓度从 42.47 mg·L⁻¹ 上升到 70.62 mg·L⁻¹, EPS(extracellular polymeric substance) 的含量(以 VSS 计)从 46.30 mg·g⁻¹ 上升到 82.22 mg·g⁻¹; 对于混合液而言, SMP 的质量浓度从 36.46 mg·L⁻¹ 上升到 69.35 mg·L⁻¹, EPS 的含量从 47.47 mg·g⁻¹ 上升到 81.63 mg·g⁻¹. 蛋白质是 EPS 和 SMP 的主要成分, 约占总成分的 80%. 微生物群落结构表明, Firmicutes(厚壁菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门)始终是最优势的菌门, 占全部菌门相对丰度的 42.6% ~ 61.0%. 随着温度的下降, 优势菌属分别是 *Clostridium* (13.7%), *Levilinea* (15.2%) 和 *Lactococcus* (17.9%). 产甲烷古菌的优势菌属始终是 *Methanosaeta*.

关键词: 一体式厌氧流化床膜生物反应器; 温度; 苯并噻唑; 膜污染; 微生物群落结构

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1731-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201707261

Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater

LI Yue¹, HU Qi², GAO Da-wen^{1*}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Pharmaceutical Engineering, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 110016, China)

Abstract: An integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor (IAFMBR) was applied to treat synthetic high-strength benzothiazole wastewater. This study investigated the effect of temperature on the performance, membrane fouling and microbial community structure of IAFMBR. The results showed that decreasing temperature had an adverse effect on the performance and the cycle of membrane fouling. When temperature declined from 35℃ to 15℃, the COD efficiency dropped 7.4%, benzothiazole removal efficiency dropped 49.2%, the accumulation of total VFAs increased 225.66 mg·L⁻¹, and methane yield (in CH₄/COD_{removed}) dropped 0.118 m³·kg⁻¹. The membrane fouling cycle shortened from 5.2 d to 2.5 d. For cake layer, the concentration of soluble microbial product (SMP) increased from 42.47 mg·L⁻¹ to 70.62 mg·L⁻¹, and the extracellular polymeric substance (EPS) content (in VSS) increased from 46.30 mg·g⁻¹ to 82.22 mg·g⁻¹ when the TMP was 15 kPa. For mixed liquor, the concentration of SMP increased from 36.46 mg·L⁻¹ to 69.35 mg·L⁻¹ and the EPS content increased from 47.47 mg·g⁻¹ to 81.63 mg·g⁻¹. Protein was the main component of EPS and SMP, and occurred in proportion of 80%. The microbial community structure showed that the dominant phyla were Firmicutes and Chloroflexi, which accounted for 42.6%-61.0% of the total relative abundance. The genera *Clostridium* (13.7%), *Levilinea* (15.2%), and *Lactococcus* (17.9%) dominated with decreasing temperatures. The dominant methanogen was *Methanosaeta*.

Key words: integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor; temperature; benzothiazole; membrane fouling; microbial community structure

随着抗生素的广泛应用, 产生大量的含有抗生素的废水, 而污水厂的处理工艺尚难实现抗生素的完全降解^[1,2]. 目前, 在地表水、地下水和土壤等环境中均已检测到抗生素的存在^[3,4]. 抗生素作为抑菌剂, 对生物反应器的运行产生不利影响^[5]. 另外, 当微生物长期暴露在含有抗生素环境中时, 还

会导致抗性微生物和抗性基因的传播与转化^[6].

收稿日期: 2017-07-31; 修订日期: 2017-09-26

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(ZD201412)

作者简介: 李玥(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为厌氧膜生物反应器在污水处理中的应用, E-mail: liyuehit2016@163.com

* 通信作者, E-mail: gaodw@hit.edu.cn

如何高效地处理抗生素废水已经成为研究热点之一. 与好氧生物处理工艺相比, 厌氧法具有低能耗, 低污泥产量, 产生能源型气体等优点. 尽管通常采用厌氧生物技术处理高浓度废水及难降解废水, 但为了满足严格的出水要求, 通过厌氧生物反应器和膜生物反应器联合使用来提高出水水质^[7, 8].

温度是反应器运行的重要参数之一, 对反应器运行效能和运行的稳定性方面起着至关重要的作用. 温度可以影响微生物活性、传质过程、混合液黏度等, 进而影响到反应器的运行效率. 温度对微生物活性的影响主要有两种途径, 第一是影响酶促反应的速率^[9], 第二是影响基质扩散的速率. 有研究表明, 温度每升高 10 ~ 15℃, 酶促反应提高 1 ~ 2 倍^[10]. 东北地区四季分明, 昼夜温差较大, 因此更需要应对不同温度带来的挑战.

本研究采用一体式厌氧流化床膜生物反应器 (integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor, IAFMBR) 作为主要装置, 在水力停留时间 24 h 条件下, 考察不同温度 (35、25 和 15℃) 对 IAFMBR 处理高浓度苯并噻唑废水运行效能, 膜污染情况和微生物群落结构的影响.

1 材料与方 法

1.1 实验装置

实验室自主开发设计 IAFMBR 反应器, 并以该反应器作为本研究的主要装置. IAFMBR 反应器采用 10 mm 厚有机玻璃制作而成, 总容积为 8.9 L, 有效容积为 6.1 L, 反应器构型如图 1 所示.

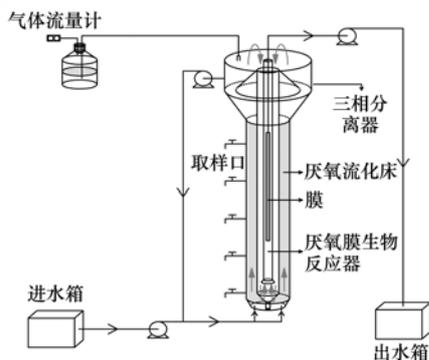


图 1 一体式厌氧流化床膜生物反应器构型示意
Fig. 1 Schematic diagram of an integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor

IAFMBR 反应器主要由外筒、中筒、内筒、三相分离器和膜组件构成. 废水从反应器底部进水口进入反应器, 依次经过外筒、中筒、最后通过蠕动泵将废水从内筒中的膜组件抽出反应器. 外筒内装

有厌氧颗粒污泥, 是主要的微生物反应区, 经过外筒处理的出水为厌氧流化床反应器 (anaerobic fluidized-bed bioreactor, AFBR) 出水; 中筒起到导流作用, 使废水从内筒底部流入; 内筒中装有膜组件, 使废水经过膜的分离作用排出系统, 既经过外筒处理, 又经过内筒膜处理的出水为 IAFMBR 出水. 膜材料采用三菱公司生产的聚乙烯中空纤维膜, 孔径是 0.4 μm , 总膜面积是 0.21 m^2 .

1.2 反应器运行条件

IAFMBR 已稳定运行 297 d. 在本实验中, 反应器的运行条件分为 3 个温度梯度, 分别是 35℃ (298 ~ 353 d)、25℃ (354 ~ 404 d) 和 15℃ (405 ~ 455 d). 其他运行条件是: HRT 为 24 h, 苯并噻唑的质量浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 膜出水方式为连续出水. 在一个膜污染周期内, 没有反冲洗和膜清洗.

1.3 接种污泥及配水

接种的厌氧颗粒污泥取自大庆市某乙醇废水处理厂的厌氧反应器, 污泥颜色为黑色, 呈颗粒状. 污泥接种量为 1.2 L, 污泥终浓度 (以 VSS 计) 为 4 850 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

本实验采用人工模拟配水方式, 模拟某制药厂制药废水. 主要碳源是葡萄糖和乙酸钠, 使进水 COD 维持在 3 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 苯并噻唑的浓度在 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 其他配水成分详见文献^[11].

1.4 测定项目与方法

COD 测量采用 COD 快速测定法, 挥发性悬浮固体浓度 (volatile suspended solids, VSS) 采用重量法, 气体产量采用湿式气体流量计, 气体和挥发酸成分的测定采用高效气相色谱 (Agilent GC-7980A), 苯并噻唑质量浓度测量采用高效液相色谱 (Water e2695). 气相/液相色谱的具体参数设置详见文献^[12].

跨膜压差 (transmembrane pressure, TMP) 的动态变化由电脑自动检测. 胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 和溶解性微生物产物 (soluble microbial product, SMP) 的提取方法详见文献^[13]. 对提取出的 EPS 和 SMP 进行蛋白和多糖的测定, 其测定方法分别采用蛋白浓度测定试剂盒 (Modified BCA kit, 生工生物工程股份有限公司) 和苯酚-硫酸法^[14].

1.5 微生物群落结构分析方法

3 个微生物样品取自外筒反应区, 样品采集时间分别是第 353、404 和 455 d. 采用 FastDNA SPIN Kit for Soil 试剂盒提取微生物样品 DNA. PCR 扩增引物

及扩增条件详见文献[12]. PCR 扩增产物用于 Illumina MiSeq 高通量测序(生工生物工程股份有限公司). 测序原始数据需要去除引物接头、标签序列、嵌合体等部分序列, 得到合格的序列. 处理原始数据所使用的生物信息学分析软件详见文献[12].

2 结果与讨论

2.1 温度对 IAFMBR 运行效能的影响

2.1.1 温度对 COD 去除效果的影响

随着温度的降低, AFBR 的 COD 去除率逐渐降低(图 2). 35℃时, COD 去除率为(89.9 ± 1.1)%, 出水 COD 为(335 ± 40) mg·L⁻¹. 当温度下降到 25℃时, COD 去除率略微下降, 其数值为(88.6 ± 1.5)%, 出水 COD 为(374 ± 48) mg·L⁻¹. 当温度继续下降到 15℃时, 出水 COD 明显上升, 其值接近 1 000 mg·L⁻¹, COD 去除率下降到(69.3 ± 2.9) %.

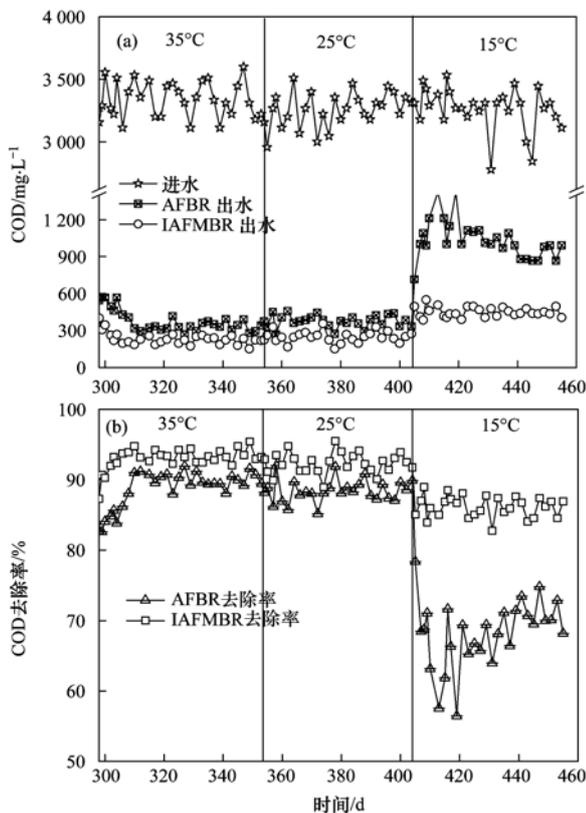


图 2 温度对 COD 去除效果的影响

Fig. 2 Effect of temperature on COD removal efficiency

不同温度下, IAFMBR 的 COD 去除率(%) 分别是(93.4 ± 0.9) (35℃)、(92.4 ± 1.5) (25℃) 和 (86 ± 1.5) (15℃). 从数据中可以看出, 温度下降导致 AFBR 出水 COD 去除率下降了 20.6%, 而 IAFMBR 出水 COD 去除率仅下降 7.4%, 其主要原因 在于膜过滤起到了缓冲作用.

2.1.2 温度对苯并噻唑去除效果的影响

随着温度的降低, AFBR 出水中苯并噻唑的质量浓度从(2.11 ± 0.28) mg·L⁻¹ 上升到(29.33 ± 1.82) mg·L⁻¹, 其去除率从(95.9 ± 0.6)% 下降到(42.5 ± 4.8)% (图 3). 对 IAFMBR 出水而言, 苯并噻唑的浓度从(1.23 ± 0.22) mg·L⁻¹ 上升到(26.35 ± 1.98) mg·L⁻¹, 去除率从(97.6 ± 0.5)% 下降到(48.4 ± 4.0)%.

从数据中可以看出, 当温度从 35℃ 下降到 15℃, 苯并噻唑的去除率明显下降. 苯并噻唑的主要降解途径是生物降解^[12], 而温度是影响生物活性的重要因素之一. 钱燕云等^[15] 研究了不同温度(低温, 中温和高温)对 8 种抗生素去除情况的影响. 其研究表明, 随着温度的升高, 抗生素的平均去除效率明显提升.

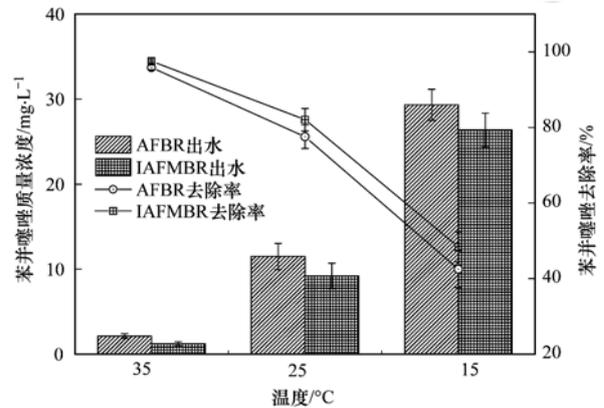


图 3 温度对苯并噻唑去除效果的影响

Fig. 3 Effect of temperature on benzothiazole removal efficiency

2.1.3 温度对挥发酸积累的影响

随着温度的逐渐降低, 挥发酸的积累量不断增多(图 4). 35℃时, AFBR 出水挥发酸总量为

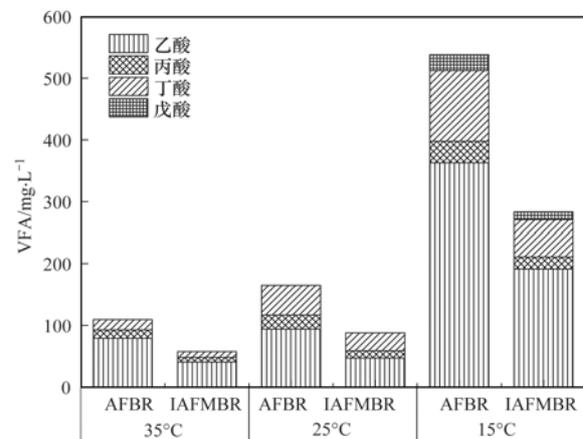


图 4 温度对挥发酸积累情况的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the accumulation of VFAs removal efficiency

(109.36 ± 8.14) mg·L⁻¹, 其中乙酸(79.02 ± 6.66) mg·L⁻¹, 丙酸(13.47 ± 1.86) mg·L⁻¹, 丁酸(16.88 ± 2.14) mg·L⁻¹. 25℃时, 挥发酸总量为(164.43 ± 8.60) mg·L⁻¹, 其中乙酸(93.39 ± 8.68) mg·L⁻¹, 丙酸(23.07 ± 2.30) mg·L⁻¹, 丁酸(47.97 ± 4.33) mg·L⁻¹. 15℃时, 挥发酸总量为(538.12 ± 41.58) mg·L⁻¹, 其中乙酸(362.72 ± 40.74) mg·L⁻¹, 丙酸(35.15 ± 2.77) mg·L⁻¹, 丁酸(114.58 ± 12.51) mg·L⁻¹, 戊酸(25.67 ± 4.80) mg·L⁻¹.

随着温度的不断降低, 乙酸的积累量从35℃时的(79.02 ± 6.66) mg·L⁻¹增加到15℃时的(362.72 ± 40.74) mg·L⁻¹, 并且乙酸在总挥发酸中所占的比例始终高于50%, 是挥发酸的主要成分. 乙酸是乙酸型产甲烷菌的底物, 它们可以利用乙酸产生甲烷和二氧化碳^[16]. 另外, 乙酸也是同型乙酸菌的底物, 这种微生物可以将乙酸转化成氢气和二氧化碳^[17]. 有一点需要指出, 在乙酸降解方面, 同型乙酸菌的作用并不突出^[18].

另一个积累量明显增加的是丁酸, 表明了丁酸氧化过程可能受到抑制. 除了温度的下降导致丁酸氧化菌的活性降低外, 苯并噻唑的残余量对丁酸氧化过程可能有一定的抑制作用. Aydin 等^[17]以丁酸为底物, 研究了3种抗生素(磺胺甲噁唑、四环素和红

霉素)的4种不同质量浓度的组合(磺胺甲噁唑-四环素、红霉素-磺胺甲噁唑、红霉素-四环素以及磺胺甲噁唑-四环素-红霉素)对丁酸氧化过程的影响. 其研究表明, 高浓度的抗生素会对丁酸氧化产生抑制作用. 在本实验中, 随着温度的不断下降, AFBR出水中苯并噻唑的残余量上升到(29.33 ± 1.82) mg·L⁻¹(图3), 这可能对丁酸氧化有一定抑制作用.

IAFMBR出水挥发酸总量低于AFBR出水, 其质量浓度分别是(57.57 ± 11.11) mg·L⁻¹(35℃)、(87.76 ± 11.32) mg·L⁻¹(25℃)和(283.23 ± 27.96) mg·L⁻¹(15℃).

2.1.4 温度对气体产量的影响

35℃时, 气体产量, 甲烷产量, 甲烷百分比和甲烷产率都达到最大值(表1). 25℃时, 气体各项指标均有所下降. 当温度下降到15℃时, 各气体指标均明显下降, 其中甲烷产量从(8.13 ± 0.64) L·d⁻¹下降到(3.68 ± 0.44) L·d⁻¹, 甲烷所占体积分数从(72.4 ± 1.7)%下降到(48.2 ± 4.1)%, 甲烷产率(以CH₄/COD_{removed}计)从(0.302 ± 0.026) m³·kg⁻¹下降到(0.184 ± 0.024) m³·kg⁻¹. 这些相关指标的下降, 表明低温条件下, 产甲烷菌的活性受到抑制. 有研究表明, 当温度在10~30℃之间时, 产甲烷菌的产气能力随温度的下降而降低^[19].

表1 温度对气体产量的影响

Table 1 Effect of temperature on biogas production

温度 /℃	气体产量 /L·d ⁻¹	甲烷产量 /L·d ⁻¹	甲烷所占体积分数 /%	甲烷产率 /m ³ ·kg ⁻¹
35	11.24 ± 0.83	8.13 ± 0.64	72.4 ± 1.7	0.302 ± 0.026
25	9.62 ± 0.80	6.58 ± 0.63	68.4 ± 2.3	0.252 ± 0.026
15	7.64 ± 0.76	3.68 ± 0.44	48.2 ± 4.1	0.184 ± 0.024

2.2 温度对膜污染的影响

2.2.1 温度对TMP的影响

本实验中, 当IAFMBR处于该温度条件的稳定阶段时, 监测膜污染情况, 当TMP达到15 kPa时, 视为膜污染. 不同的温度条件下, 膜污染周期分别是5.2 d(35℃)、4.2 d(25℃)和2.5 d(15℃)(图5). 随着温度的下降, 膜污染周期逐渐缩短, 这个结果与先前的研究相似^[20]. 分析膜污染周期下降的主要原因在于, 随着温度的下降, 进入内筒中的废水COD值上升(图2), 导致膜污染周期缩短.

从整体来看, 无论在什么温度条件下, 膜污染周期都相对较短. 本课题组以IAFMBR为实验装置, 以实际生活污水为底物, 分析了不同温度条件

下膜污染的情况^[21]. 其实验结果表明, 不同温度条件下, 膜污染周期分别是25 d(35℃)、24 d(25℃)和18 d(15℃). 相对于上述研究, 本实验的膜污染周期明显较短. 分析其原因如下:①进水水质不同: 先前实验采用的是低浓度的生活污水, COD为247~499 mg·L⁻¹. 而本实验采用的是高浓度抗生素废水, 进水COD高达3000 mg·L⁻¹以上;②颗粒活性炭的添加. 先前实验过程中添加40 g的颗粒活性炭来降低膜污染. 虽然悬浮状态的颗粒活性炭可以降低膜污染^[22], 但是维持颗粒活性炭的悬浮状态需要消耗大量的能量, 不利于能源的节约. 尽管较短的膜污染周期导致膜应用的成本较高, 但是膜的应用对于抗生素废水的处理具有重要的意义. Munir

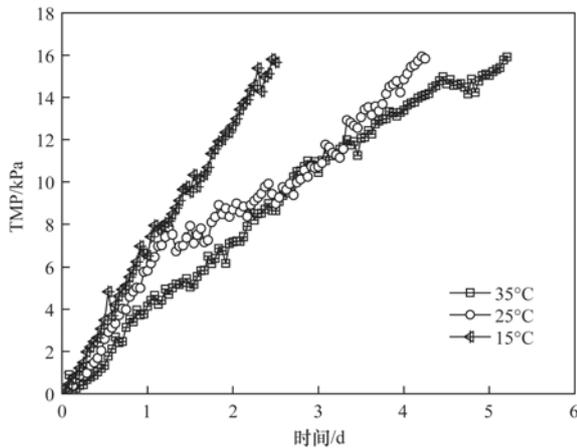


图5 温度对 TMP 的影响

Fig. 5 Effect of temperature on TMP

等^[23]的研究发现, 相对于其他的水处理方式, 膜生物反应器可以降低出水中的抗性微生物和抗性基因, 从而降低水环境的潜在威胁。

2.2.2 温度对 EPS 和 SMP 的影响

混合液和滤饼层中 EPS 与 SMP 的变化如图 6 所示. 对于混合液而言, 在特定的温度条件下, SMP 和 EPS 的浓度相对稳定, 没有随着 TMP 的升高而变化[图 6(a)和 6(c)]. 分析其原因如下,

当反应器处于稳定运行状态时, 混合液的状态是稳定的, 不会随着膜污染的情况而有所改变. 对于滤饼层而言, 在特定的温度条件下, EPS 和 SMP 的浓度随着 TMP 的上升而增加[图 6(b)和 6(d)]. 随着时间的累积, 污泥层在膜表面的不断积累形成是导致膜污染的主要原因^[24]. 有研究表明, 相对于混合液, 膜表面的污泥层具有更高的特殊过滤阻力^[25].

随着温度的下降, 达到膜污染时(15 kPa), 混合液和滤饼层中的 EPS 和 SMP 的浓度都逐渐增多, 这点与先前的研究相似^[21]. 分析其可能的原因如下:①随着温度的下降, 液体黏度增加, 导致膜污染严重;②水体中残余的抗生素导致 EPS 和 SMP 的浓度增加. 有研究表明, 当存在环境压力, 如有毒化合物存在时, 水体中的 SMP 会增加^[26]. EPS 普遍存在于活性污泥内部及表面, 可以抵御杀菌剂和有毒物质对细胞的危害.

无论在混合液还是在滤饼层、是在 EPS 还是 SMP 中, 蛋白质都是主要组成部分. Meng 等^[27]的研究表明, 相对于多糖而言, 蛋白质更加疏水, 更加易于黏附在膜表面, 从而引发膜污染.

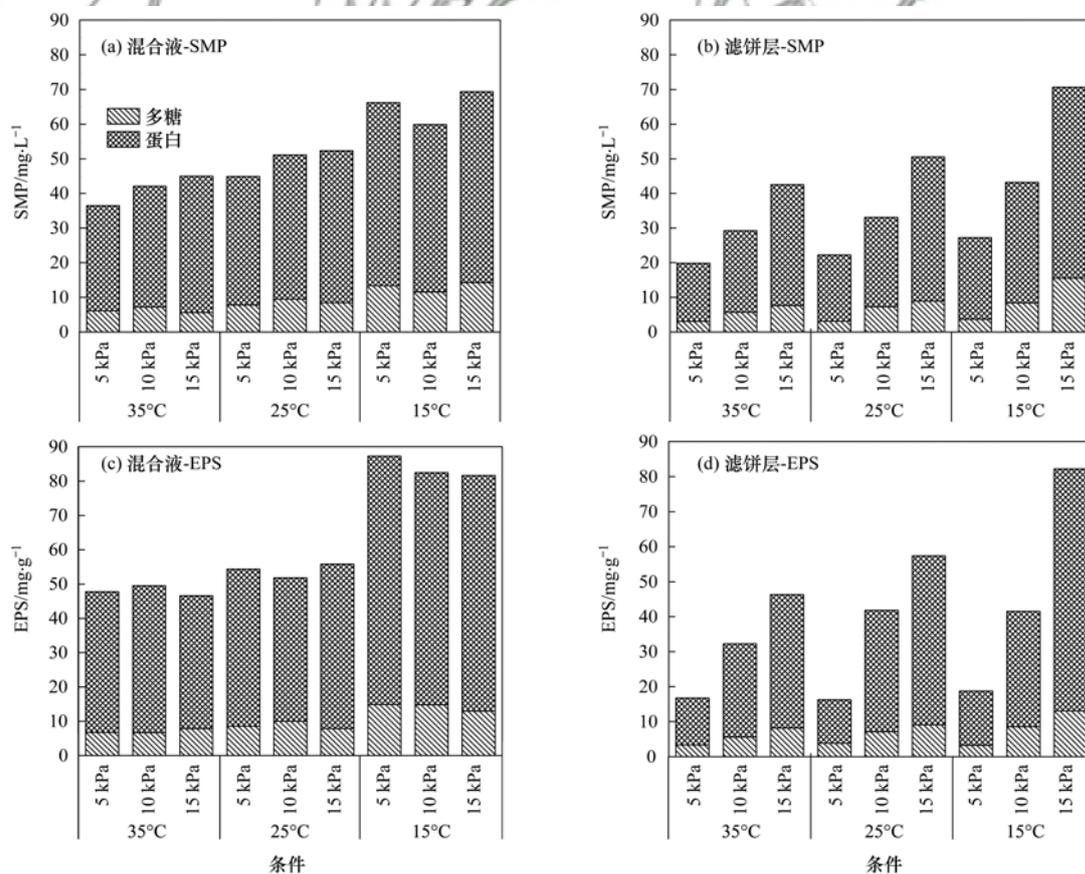


图6 温度对 EPS 和 SMP 的影响

Fig. 6 Effect of temperature on EPS and SMP

2.3 温度对微生物群落结构的影响

2.3.1 温度对细菌结构的影响

不同的温度条件下, 优势菌门是相似的(图7). 其中, Firmicutes(厚壁菌门)、Chloroflexi(绿弯菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Proteobacteria(变形菌门)是最占优势的4个菌门, 占全部菌门相对丰度的75%以上. 35℃和15℃时, Firmicutes(厚壁菌门)是优势菌门, 其相对丰度分别是33.4%和49.5%. 25℃时, 优势菌门是Chloroflexi(绿弯菌门), 其的相对丰度是26.6%.

Firmicutes(厚壁菌门)属于低GC含量的革兰氏阴性细菌^[28], 是厌氧反应器中常见的优势菌群^[29]. Chloroflexi(绿弯菌门)广泛存在于各种自然环境中, 具有多种代谢功能^[30]. Proteobacteria(变形菌门)是细菌菌门中重要的一门, 在化学循环中起到重要的作用, 在好氧和厌氧的环境中均可以存活.

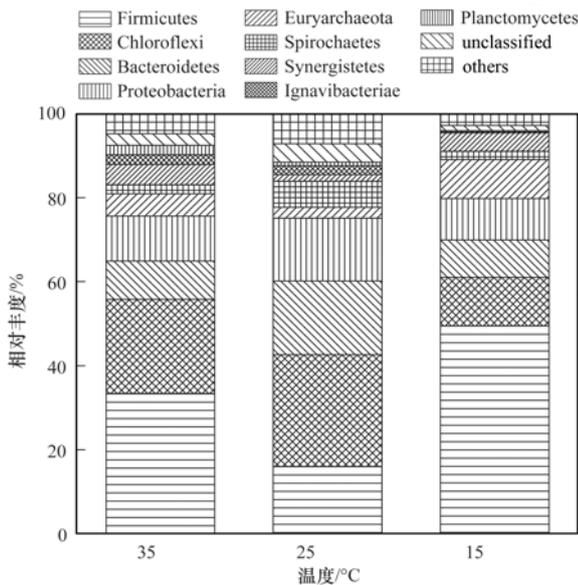


图7 温度对细菌菌门的影响

Fig. 7 Effect of temperature on the microbial community structure at the phylum level

在属的层次上, 不同的温度条件下, 优势菌属各不相同(图8). 35℃时, 优势菌属是Clostridium, 然后是Levilinea、Trichococcus, 其相对丰度分别是13.7%、10.4%和8.0%. 25℃时, 优势菌属是Levilinea(15.2%)和Treponema(5.3%). 15℃时, 优势菌属是Lactococcus(17.9%)和Anaeroarcus(17.7%).

随着温度的下降, 一些菌属的相对丰度降低, 如Clostridium的相对丰度从13.7%下降到3.8%; Longilinea的相对丰度从5.9%下降到1.3%. 相对

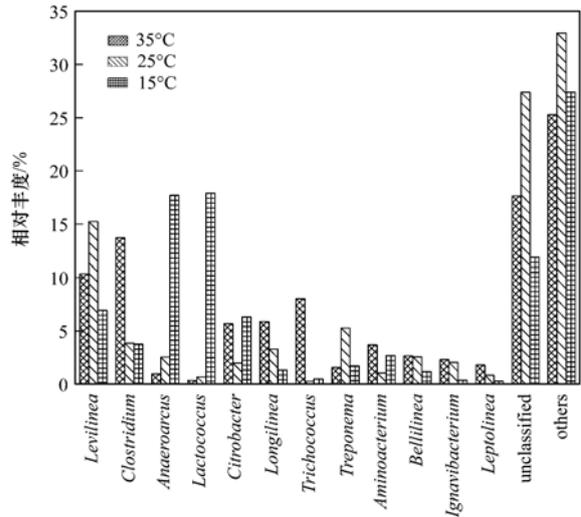


图8 温度对细菌菌属的影响

Fig. 8 Effect of temperature on the microbial community structure at the genus level

丰度的下降表明这些菌属受低温的影响较大, 分析其可能的原因如下: ①Clostridium和Longilinea对温度本身敏感, 不易在低温条件下存活; ②Clostridium和Longilinea对温度降低所引起的环境变化较为敏感, 如温度降低导致水体中残余的抗生素增多. 相反, 某些菌属的相对丰度随着温度的下降而上升(如Lactococcus的相对丰度从0.4%上升到17.9%, Anaeroarcus的相对丰度从1.0%上升到17.7%), 表明这些菌易于在低温(15℃)条件下存活和扩增.

2.3.2 温度对古菌的影响

不同温度条件下, Methanosaeta都是优势菌群, 其相对丰度分别是94.2%(35℃)、83.1%(25℃)和98.3%(15℃)(图9). Methanosaeta是乙酸型产

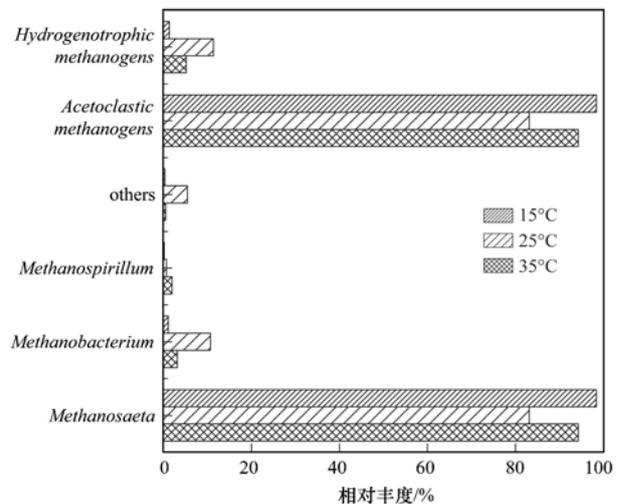


图9 温度对产甲烷菌的影响

Fig. 9 Effect of temperature on the methanogens

甲烷菌, 能够将乙酸转化为甲烷和二氧化碳. Gujer 等^[16]的研究表明, 乙酸型产甲烷菌所产生的甲烷占甲烷整体产量的 70%. *Methanobacterium* 和 *Methanospirillum* 属于氢营养型产甲烷菌, 利用氢气和二氧化碳产生甲烷. 虽然, 氢营养型产甲烷菌在古菌中所占的比例不高, 但是对于降低氢分压起到重要的作用.

3 结论

(1) 温度对 IAFMBR 处理高浓度苯并噻唑废水的运行效能有较大影响. 35℃ 时, 反应器运行效能最高, 具有较好的 COD 去除效率和甲烷产率和苯并噻唑的去除率.

(2) 温度对膜污染有重要的影响. 随着温度的下降, 膜污染周期逐渐缩短. 在特定的温度条件下, 相对于混合液而言, 滤饼层的 EPS 和 SMP 对 TMP 的变化更为敏感. 混合液和滤饼层中的 EPS 和 SMP 以蛋白质为主. 无论是滤饼层还是混合液, EPS 的含量始终高于 SMP.

(3) 不同温度条件下, Firmicutes(厚壁菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门)始终是最占优势的两个菌门, 占全部菌门的 42.6% ~ 61.0%. 随着温度的下降, 优势菌属分别是 *Clostridium*、*Levilinea* 和 *Lacotococcus*. 产甲烷古菌的优势菌属是 *Methanosatea*.

参考文献:

- [1] Castiglioni S, Bagnati R, Fanelli R, *et al.* Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(1): 357-363.
- [2] Lin A Y C, Yu T H, Lateef S K. Removal of pharmaceuticals in secondary wastewater treatment processes in Taiwan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **167**(1-3): 1163-1169.
- [3] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, *et al.* Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment-a review [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(2): 357-394.
- [4] Kümmerer K. *Pharmaceuticals in the environment: sources, fate, effects and risks* [M]. New York: Springer, 2008.
- [5] Chelliapan S, Wilby T, Sallis P J. Performance of an up-flow anaerobic stage reactor (UASR) in the treatment of pharmaceutical wastewater containing macrolide antibiotics [J]. *Water Research*, 2006, **40**(3): 507-516.
- [6] Martínez J L. Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments [J]. *Science*, 2008, **321**(5887): 365-367.
- [7] 李岗, 陈小光, 戴若彬. 螺旋对称流厌氧膜生物反应器的运行及优化 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(6): 2130-2136.
Li G, Chen X G, Dai R B. Operation and optimization of spiral symmetry stream-anaerobic membrane bioreactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2130-2136.
- [8] 魏源送, 郁达伟, 曹磊. 农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1613-1622.
Wei Y S, Yu D W, Cao L. Anaerobic membrane bioreactors for treating agricultural and food processing wastewater at high strength [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1613-1622.
- [9] 任南琪. *污染控制微生物学* [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002. 83-84.
- [10] 马溪平. *厌氧微生物学与污水处理* [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2016. 56.
- [11] Gao D W, Hu Q, Yao C, *et al.* Integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **240**: 362-368.
- [12] Li Y, Hu Q, Chen C H, *et al.* Performance and microbial community structure in an integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor treating synthetic benzothiazole contaminated wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **236**: 1-10.
- [13] Malamis S, Andreadakis A. Fractionation of proteins and carbohydrates of extracellular polymeric substances in a membrane bioreactor system [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(13): 3350-3357.
- [14] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [15] 钱燕云, 郑吉, 徐莉柯, 等. 温度对厌氧环境下污泥中抗生素抗性基因行为特征的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(5): 56-65.
Qian Y Y, Zheng J, Xu L K, *et al.* Effect of temperature on antibiotic resistance genes behavior during anaerobic treatment of sludge [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(5): 56-65.
- [16] Gujer W, Zehnder A J B. Conversion processes in anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 1983, **15**(8-9): 127-167.
- [17] Aydin S, Cetecioglu Z, Arıkan O, *et al.* Inhibitory effects of antibiotic combinations on syntrophic bacteria, homoacetogens and methanogens [J]. *Chemosphere*, 2015, **120**: 515-520.
- [18] Amin M M, Zilles J L, Greiner J, *et al.* Influence of the antibiotic erythromycin on anaerobic treatment of a pharmaceutical wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(12): 3971-3977.
- [19] 杨光. 低温对沼气菌群产气能力的影响以及产甲烷菌的分离 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. 23-27.
- [20] van den Brink P, Satpradit O A, van Bentem A, *et al.* Effect of temperature shocks on membrane fouling in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4491-4500.
- [21] Gao D W, Hu Q, Yao C, *et al.* Treatment of domestic wastewater by an integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor under moderate to low temperature conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **159**: 193-198.
- [22] Kim J, Kim K, Ye H, *et al.* Anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for wastewater Treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 576-581.
- [23] Munir M, Wong K, Xagorarakı I. Release of antibiotic resistant bacteria and genes in the effluent and biosolids of five wastewater

- utilities in Michigan[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 681-693.
- [24] Lin H J, Xie K, Mahendran B, *et al.* Sludge properties and their effects on membrane fouling in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs)[J]. *Water Research*, 2009, **43**(15): 3827-3837.
- [25] Lin H J, Liao B Q, Chen J R, *et al.* New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2373-2379.
- [26] Kuo W C, Parkin G F. Characterization of soluble microbial products from anaerobic treatment by molecular weight distribution and nickel-chelating properties[J]. *Water Research*, 1996, **30**(4): 915-922.
- [27] Meng F G, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, **272**(1-2): 161-168.
- [28] Qiu G L, Song Y H, Zeng P, *et al.* Characterization of bacterial communities in hybrid upflow anaerobic sludge blanket (UASB)-membrane bioreactor (MBR) process for berberine antibiotic wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 52-62.
- [29] 王昊昱, 陶彧, 任南琪. 底物类型对产甲烷效能及微生物群落结构的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, **48**(2): 9-14.
- Wang H Y, Tao Y, Ren N Q. Impact of organic matter type on the efficiency and microbial community structure of an anaerobic digestion process[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, **48**(2): 9-14.
- [30] Fullerton H, Moyer C L. Comparative single-cell genomics of *chloroflexi* from the Okinawa trough deep-subsurface biosphere [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2016, **82**(10): 3000-3008.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)