

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

内源碳 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响

杨建鹏, 张健, 田晴*, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 本文研究碳源调控磷回收强化生物脱氮除磷 (biological bio-nutrient removal-carbon regulation and phosphorus recovery, BBNR-CPR) 反应器耐低温特性. 不断降低 BBNR-CPR 反应器运行温度, 发现 BBNR-CPR 反应器能够长期在低温 ($\leq 15^{\circ}\text{C}$)、低 C/N 比 (< 4.16) 条件下稳定运行, 维持总磷的平均去除率为 91.20%, 氨氮的平均去除率为 81.10%, 总氮的平均去除率为 58.62%. 随着运行时间的增加与温度的下降, BBNR-CPR 反应器生物内膜具有脱氮除磷以及 PHA 贮存功能的种属 *Candidatus_Competibacter*、*Candidatus_Accumulibacter*、*Run-SPI54*、*Thauera*、*Candidatus_Nitrotoga* 的相对丰度不断提高, 成为耐受低温条件的优势种属. 在相同碳源浓度、合成 PHA 的时间一致条件下, 生物膜内 PHA 的合成量受温度影响; 25、15 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 合成的 PHA 量分别占生物膜干重的 16.24%、11.49% 和 9.01%. 预贮存 PHA 的生物膜具有耐受低温的能力; 在高 PHA 水平, 8 $^{\circ}\text{C}$ 和 15 $^{\circ}\text{C}$ 的除磷效率分别为 97.46% 和 100%, 脱氮效率分别为 55.15% 和 82.55%; 而在低 PHA 水平, 8 $^{\circ}\text{C}$ 和 15 $^{\circ}\text{C}$ 的除磷效率分别为 11.39% 和 35.02%, 脱氮效率分别为 0% 和 12.10%.

关键词: 脱氮除磷; 聚羟基烷酸酯 (PHA); 低温; 低 C/N; 混合菌群

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1914-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809145

Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature

YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing*, ZHU Yan-bin, LI Fang, Wolfgang Sand

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: This study investigated the removal of nitrogen and phosphorus by a biological bio-nutrient removal-carbon regulation and phosphorus recovery (BBNR-CPR) reactor at low temperature. The operating temperature of the BBNR-CPR reactor was continuously reduced, and it was found that the BBNR-CPR reactor could operate steadily at low temperature ($< 15^{\circ}\text{C}$) and low C/N ratio (< 4.16). The average removal rates of total phosphorus, ammonia, and total nitrogen were 91.20%, 81.10%, and 58.62%, respectively. With increasing running time and decreasing temperature, the relative abundance of *Candidatus_Competibacter*, *Candidatus_Accumulibacter*, *Run-SPI54*, *Thauera*, and *Candidatus_Nitrotoga* increased. These bacteria had the functions of nitrogen and phosphorus removal and the storage of polyhydroxyalkanoate (PHA) in the biofilm of the BBNR-CPR reactor and became the dominant species to tolerate low temperature. It was found that low temperatures reduced the amount of PHA synthesized for a given equal carbon source concentration and reaction time. The amounts of PHA synthesized at 25 $^{\circ}\text{C}$, 15 $^{\circ}\text{C}$, and 8 $^{\circ}\text{C}$ accounted for 16.24%, 11.49%, and 9.01% of the dry weight of the biofilm, respectively. The pre-stored PHA biofilm has the capacity to resist low temperature. At high PHA levels, the phosphorus removal efficiencies at 8 $^{\circ}\text{C}$ and 15 $^{\circ}\text{C}$ were 97.46% and 100%, respectively, and the denitrification efficiencies were 55.15% and 82.55%. At low PHA levels, the phosphorus removal efficiencies at 8 $^{\circ}\text{C}$ and 15 $^{\circ}\text{C}$ were 11.39% and 35.02%, respectively, and the denitrification efficiencies were 0% and 12.10%, respectively.

Key words: nitrogen and phosphorus removal; polyhydroxyalkanoate (PHA); low temperature; low C/N; mixed growth microbial community

氮(N)和磷(P)元素属于营养元素, 水体营养元素含量过高会引起水体富营养化. 目前, 从废水中去除氮、磷营养物的最为经济的方法仍然是生物法(bio-nutrients removal, BNR). 而当前国内、外有关脱氮、除磷的研究更着力于对过程中高附值的副产品进行回收利用(nutrients removal and source recovery), 对污水中的营养物质回收为水资源以及农业产业等方向提供了可持续发展的可能性. 近年来在传统厌氧/好氧 BNR 工艺基础上形成生物除磷-磷回收工艺^[1], 能够在反应器厌氧阶段获得高浓度的磷回收液, 并通过鸟粪石法进行回收磷, 实现磷的资源化同时减少剩余污泥的产量. 这一过程, 充分利用了生物除磷的基本原理, 即利用聚磷

菌厌氧释磷好氧过量吸磷的特性, 厌氧/好氧交替生物的生物反应器内的聚磷菌将磷富集在体内, 在厌氧条件下通过投加高浓度有机碳源, 让聚磷菌吸收有机碳同时释放体内的磷, 得到含磷的高浓度回收液, 最后通过鸟粪石结晶法回收高浓度磷回收液中的磷. 在此过程, BNR 内的重要菌群, 如聚磷菌(phosphate accumulating organisms, PAO)或聚糖菌(glycogen accumulating organisms, GAO)及其它异养

收稿日期: 2018-09-18; 修订日期: 2018-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478099); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400501); 上海市自然科学基金项目(16ZR1402000)

作者简介: 杨建鹏(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷, E-mail: 2161383@mail.dhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: tq2004@dhu.edu.cn

型微生物^[2~4], 能够合成聚羟基烷酸酯 (polyhydroxyalkanoate, PHA), 为后续好氧/缺氧条件下脱氮、除磷提供碳源与能源. Tian 等^[5] 在其研究中讨论了碳源调控磷回收模式, 研究了同步硝化反硝化[以 polyhydroxybutyrate (PHB) 做电子供体的反硝化], 提出了新的脱氮除磷脱碳模式. 在好氧或者缺氧利用硝酸盐作为电子受体, 能够利用 PHB 和糖原物质进行反硝化和除磷的微生物叫反硝化聚磷菌和反硝化聚糖菌^[6~8]. Lei 等^[2] 和 Wang 等^[9] 研究内源碳驱动生物脱氮除磷, 在低 C/N 比的条件下内源碳同时硝化反硝化(部分反硝化)脱氮除磷. 有研究报道聚羟基丁酸酯 (polyhydroxybutyrate, PHB) 作为电子来实现反硝化或者部分反硝化^[10, 11]. 有研究认为 PHA 还可以作为一种能量贮存物质或者能量库, 能够更好地抵御外界的压力^[12, 13]. 课题组在研究脱氮除磷发现, 采用传统的生物脱氮除磷工艺很难达到理想的同时脱氮、除磷效果, 而如果通过传统的投加甲醇、乙酸钠等外加碳源方式来提高脱氮除磷的效果, 不仅会增加污水处理的成本, 也会造成污水中磷资源的浪费, 从而建立与开发以污水磷回收、同时脱氮除磷的新工艺——碳源调控/磷回收强化脱氮除磷工艺 (BBNR-CPR). 通过磷回收过程在 BBNR-CPR 系统 (生物膜) 内贮存聚羟基烷酸酯 (PHA), 为提高系统脱氮除磷提供补充性碳源.

温度是影响微生物活动的主要因素. 通常温度低于 15℃ 便是低温^[14, 15], 低温不利于微生物的代谢活动, 还会影响基质等传质的效率. 温度降低会造成和脱氮相关的硝化作用及反硝化作用显著下降^[16]. 然而有研究发现低温对聚磷菌并无影响, Helmer 等^[17] 利用中试规模的连续流活性污泥系统, 研究温度在 5~20℃ 变化时系统的除磷效果, 结果发现, 在水温为 5℃ 时, 虽然厌氧段释磷量减少, 但好氧段的吸磷量仍维持在较高的水平, 系统出水 TP 效果达标.

由于无论在缺氧或者好氧条件下, 脱氮除磷反应器中的混合菌群能够利用外源碳或者内源碳进行反硝化脱氮, 由于脱氮与 PHA 含量正相关, 因此可以推测生物体内大量贮存的 PHA 可能减缓温度的下降对脱氮效果的影响. 然而, 当前研究主要集中在微生物合成 PHA 的最佳条件^[18~20], 而未见有关贮存 PHA 的微生物在低温条件下脱氮除磷的报导. 本研究的目的是探究温度对 BBNR-CPR 反应器脱氮除磷的影响; 分析 BBNR-CPR 反应器中合成 PHA 的功能菌群; 用间歇实验研究反应器生物膜预贮存 PHA 的耐低温特性, 以期在低温条件下提

高 BNR 系统的运行效果提供理论与经验参考.

1 材料与方法

1.1 生物反应器及进水组成

本实验采用课题组自主研发的碳源调控磷回收强化生物脱氮除磷 (biological bio-nutrient removal-carbon regulation and phosphorus recovery, BBNR-CPR) 反应器. 反应器为石英砂 + 火山岩组合式填料的生物滤池, 内直径为 100 mm, 正常运行实际高度为 1.3 m. BBNR-CPR 反应器装置参照之前研究^[1, 5]. 反应器的进水为模拟生活污水, 模拟生活污水的组成及其浓度: TP (15.9~16.9 mg·L⁻¹)、NH₄⁺-N (48~60 mg·L⁻¹)、乙酸钠配制的 COD (180~200 mg·L⁻¹)、MgSO₄·7H₂O (70 mg·L⁻¹)、KCl (40 mg·L⁻¹)、NaHCO₃ (200 mg·L⁻¹)、CaCl₂ (20 mg·L⁻¹)、FeCl₃ (2 mg·L⁻¹).

1.2 反应器运行方式

反应器接种污泥取自松江污水厂二沉池. 生物滤池的厌氧/好氧周期为 8 h, 厌氧阶段时长 3 h 和好氧阶段时长 5 h. 在厌氧阶段, 进水箱中贮存的模拟生活污水经恒流泵打入生物滤池, 出水回流进入中间水箱; 在好氧阶段, 采用空压机曝气, 废水自中间水箱由隔膜泵提升进入生物滤池的下端, 起始 2 h 出水回流至中间水箱, 最后好氧 3 h 出水直接外排. 厌氧/好氧交替型生物滤池每运行 7 d 进行一次磷回收. 进行磷回收操作时, 在厌氧条件下, 向生物滤池泵入含有高浓度碳源的磷回收液 (由丙酸钠配制的 COD 2 000 mg·L⁻¹ 的溶液), 刺激生物膜体内释放出大量的磷酸盐, 并同时在生物膜内贮存高水平的 PHA^[21].

1.3 预贮存 PHA 的生物膜耐低温的实验

采用厌氧/好氧间歇实验研究预贮存 PHA 的生物膜耐低温的特性. 当反应器运行 140 d 时, 在 BBNR-CPR 反应器距底部进水端 0.7 m 处取出 (环境温度为 12℃ ± 2℃) 分别在不同温度 (8、15 和 25℃) 进行间歇实验. 间歇实验在恒温摇床 (ZHWY-211B, 上海) 进行, 每组间歇实验做 4 个平行样, 并确保样品的条件一致, 即, 每个血清瓶 (250 mL) 含有 0.3 g 生物膜, 投加 100 mL 已配好的反应溶液, 保证反应过程 MLSS 为 3 000 mg·L⁻¹.

本实验分为: ①厌氧条件在生物膜内预先贮存 PHA、②在好氧条件下利用贮存 PHA 的生物膜, 进行无外加碳源的好氧除磷、反硝化实验. 实验①中, 配制 COD 浓度约 1000 mg·L⁻¹ 的乙酸钠反应溶液, 不加入氮磷等营养元素, 其它矿物元素与反应器进水含量相同, 然后向血清瓶中加入反应液和

生物膜并向瓶内持续鼓入氮气 15 min, 加盖密封, 反应 12 h. 每间隔一定时间采用针管取水样测定 COD, 总磷 (TP). 厌氧反应结束后测定生物膜内 PHA 含量. 实验②中, 仅利用实验①中预先贮存 PHA 的生物膜进行脱氮除磷, 反应溶液内含有 $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮, $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸盐氮, $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总磷, 其它矿物元素与实验①相同. 实验②的反应连续进行 3 轮 (每轮 24 h), 每一轮反应结束后, 取出生物膜清洗离心后向血清瓶内加入相同的好氧反应溶液, 继续下一轮的好氧反应. 每一轮的 PHA 都被消耗掉, 形成了生物膜贮存 PHA 高、中、低 3 个反应水平. 每一轮好氧反应末需要测定生物膜内残留 PHA 含量.

1.4 主要水质参数分析方法

测量的指标有 TP、COD、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、PHA, 所取样品测量前需经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤. TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵显色紫外分光光度法, 测定 COD 采用微波消解滴定法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解分光光度法测定 (HJ 636-2012), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法 (HJ 636-2009), $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法测量^[22]. PHA 的测定方法参考文献[23], 生物膜内 PHA 组分的测定, 则采用 10% 浓硫酸的酸化甲醇作为酯化液, 用苯甲酸钠作内标建立标准曲线; 采用日本 Shimadzu 公司的 QP-2010 Ultra 气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 和 DD-5 型色谱柱测定, 测得数据通过与美国国家标准局数据库 (NIST11) 质谱比对获得 PHA 含量与组分.

1.5 16S rRNA 微生物物种组成分析

使用 AxyPrepDNA 提取盒 (Axygen Biosciences, Union City, CA, U. S) 提取生物膜样品 DNA, 并用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测. 采用细菌通用引物为 515F-907R 对细菌 16S 核糖体 RNA 的 V4-V5 区域进行 PCR 扩增. PCR 扩增采用 95°C 高温变性 3 min, 25 次循环 (95°C 30 s; 55°C 退火 30 s; 72°C 45 s), 最后 72°C 延伸 10 min. 对 PCR 扩增结果进行产物确认扩增条带大小与浓度后, 上机建库测序. 经过 DNA 提取和 PCR 扩增, 采集样品的扩增子由上海美吉生物医药科技有限公司 (中国, 上海) 在 MiSeq PE300 平台 (Illumina Inc., CA, US) 进行高通量测序. 并将序列数据在 NCBI SRA 数据库获得序列编号.

对所有序列进行 OTU (operational taxonomic units) 划分, 在 97% 的相似水平下对 OTU 进行生信分析 [Usearch (version 7.0, <http://drive5.com/uparse/>)], 分别在各个分类水平: domain (域)、

kingdom (界)、phylum (门)、class (纲)、order (目)、family (科)、genus (属)、species (种) 统计样本的群落组成. 采用 I-Sanger 云平台 (上海美吉生物医药科技有限公司) 进行数据分析.

2 结果与讨论

2.1 反应器长期运行效果

图 1 分别表示反应器运行阶段运行 150 d 实验室环境温度变化、反应器的进出水总磷、氨氮、总氮浓度. 反应器中的生物膜驯化培养 10 d 左右, 反应器出水总磷、氨氮、总氮浓度趋于稳定. 驯化阶段, 氨氮进水浓度 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, TP 进水浓度 $15.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 COD 浓度 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 待反应器趋于稳定, TP 和 COD 进水浓度不变, 进水氨氮浓度由 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以便富集反应器内硝化与反硝化菌群.

图 1(b) 为反应器除磷效果, 在反应器稳定运行阶段, 反应器除磷基本不受温度影响, 反应器进水总磷平均浓度为 $(16.40 \pm 0.90) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水总磷平均浓度为 $(1.45 \pm 1.00) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷平均去除率为 $91.20\% \pm 6.02\%$. 图 1(c) 和图 1(d) 表明, 随着温度的降低, 氨氮与总氮的去除率也逐渐下降; 反应器进水氨氮平均浓度为 $(53.47 \pm 5.11) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在常温条件下 ($22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$), 氨氮出水平均浓度为 $(2.23 \pm 3.17) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率达到了 $96.06\% \pm 5.38\%$, 总氮平均去除率 $65.28\% \pm 11.03\%$; 而在低温条件 ($12^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$), 反应器氨氮出水平均浓度为 $(10.16 \pm 6.69) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮平均去除率为 $81.10\% \pm 11.89\%$, 总氮的平均去除率为 $58.62\% \pm 11.04\%$. 常温 ($22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 条件下, 氨氮的去除率在 $84.31\% \sim 100\%$ 变化, 总氮的去除率在 $58.71\% \sim 92.78\%$ 变化; 低温条件 ($12^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$), 氨氮去除率在 $75.17\% \sim 99.96\%$ 之间变化; 总氮去除率在 $40.11\% \sim 82.43\%$ 之间变化. 对比常温时运行效果可以看出, 在低温条件下, 总磷的去除效率基本不变, 但是氨氮的平均去除率下降了 14.96% , 总氮的平均去除率下降了 7% , 氨氮去除率在上述运行结果表明, 低温对硝化过程影响较大, 而对反硝化效果影响较小. 但总体来讲, BBNR-CPR 反应器在低温阶段, 低 C/N 比条件下能够稳定运行.

2.2 不同温度条件下生物膜功能菌群组成分析

如图 2 所示, Innoc. 是松江污水处理厂菌群物种组成, A、B、C、D 和 E 分别是在反应器运行 30、60、90、110 和 140 d 的菌群物种组成, 获得不同温度条件下生物膜菌群物种的相对丰度数据的热图

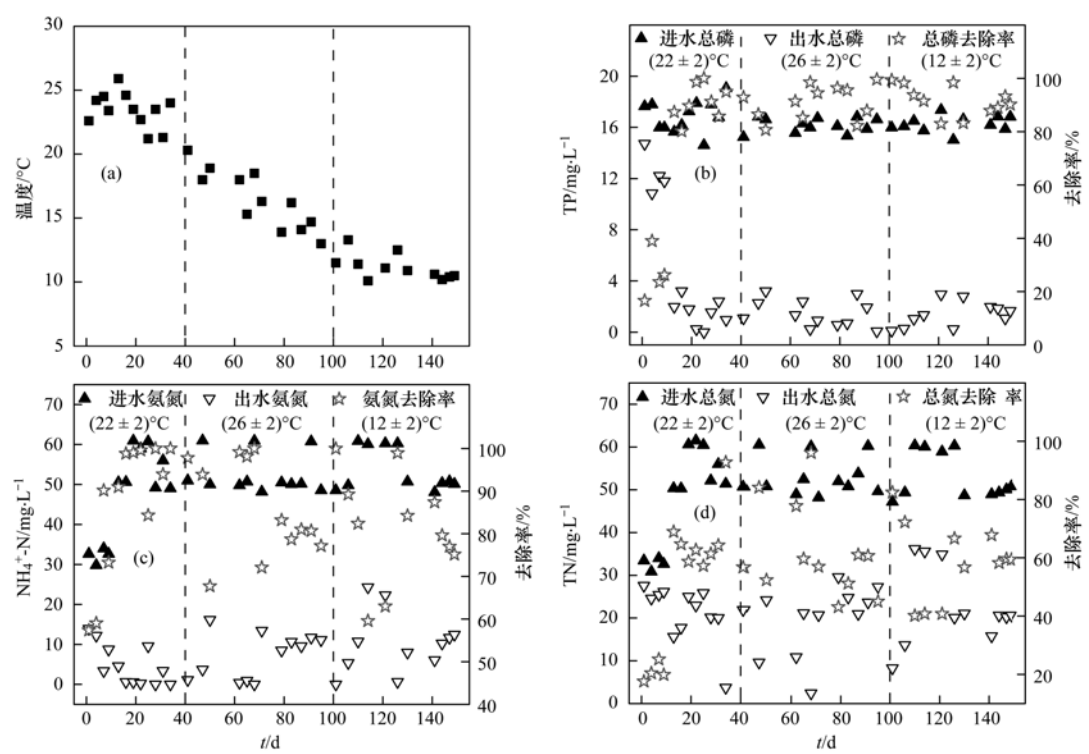


图 1 BBNR-CPR 反应器长期运行效果
Fig. 1 Effect of long-term operation of the BBNR-CPR reactor

(图 2).

从图 2 可知，在研究阶段，生物膜内的优势种群的类别及其丰度发生较大程度的转变。接种污泥内的优势菌群（为活性污泥内常见菌群构成），如 *Anaerolineaceae_norank*、*Dokdonella*、*Dechloromonas*、

Nitrosomonas、*Nitrospira*、*Zoogloea* 的丰度随着温度的降低而不断下降，而生物膜内种属 *Candidatus_Competibacter*、*Candidatus_Accumulibacter*、*Run-SP154*、*Thauera*、*Candidatus_Nitrotoga* 的相对丰度随着温度的降低而不断升高，成为优势物种。其

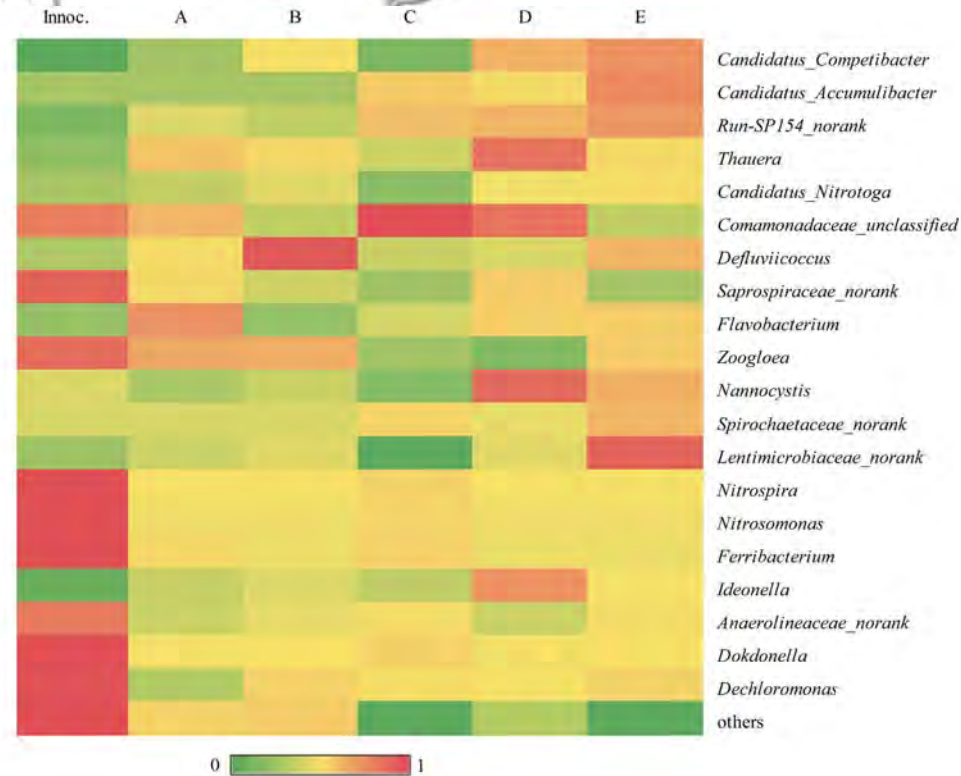


图 2 不同温度条件下生物膜菌群优势物种的相对丰度
Fig. 2 Relative abundance of the dominant species of the biofilm under different temperature conditions

中, 菌属 *Candidatus_Accumulibacter* 是污水处理系统中常见的聚磷菌 (phosphorus accumulating organisms, PAO)^[24], 而菌属 *Run-SP154*、*Zoogloea* 以及菌属 *Candidatus_Competibacter* 的部分物种也具有吸磷功能. 用图 2 中 E 阶段的生物膜做间歇实验, 此时, BBNR-CPR 反应器生物膜内 *Candidatus_Competibacter* 属的丰度最高. *Candidatus_Competibacter* 属中属于 γ 变形菌纲的 *Candidatus_Competibacter phosphatis* 已被证实也具有合成和水解聚磷酸盐的能力^[25]. 作为聚磷菌, 这些种属都具有合成 PHA 的功能. 典型的反硝化菌陶厄氏菌属 (*Thauera*), 动胶菌属 (*Zoogloea*) 均可以利用外碳源进行反硝化, 且均可以合成 PHA^[26]. 此外, 随着温度的降低, 接种污泥中原本丰度较高的氨氧化菌 (如 *Nitrosomonas*) 以及亚硝酸盐氧化菌 (如 *Nitrospira*) 的丰度不断下降, 与此同时具有硝化功能的 *Candidatus_Nitrotoga* 的丰度却不断升高. *Candidatus_Nitrotoga* 是一种耐低温的亚硝酸盐氧化菌 (NOB), 属于 β 变形菌纲^[27, 28]. 运行时间和温度是引起微生物种群变化的主要因素, 反应器的运行时间变长, 使得具有脱氮除磷功能细菌不断富集; 因为温度的降低, 才会使得反应器中的功能细菌随着温度下降而适应这种温度的变化, 至低温阶段, 反应器里富集了具有耐低温的硝化细菌和反硝化细菌. 当然, 微生物逐渐适应环境, 是会改变种群; 如 BBNR-CPR 反应器逐渐适应低温, 适应较高的氨氮浓度, 适应低 C/N 比; 这些因素都会促进反应器微生物的功能种群的变化, 但这些变化都是有利的, 有利于反应器系统中的菌群结构更加稳定. 比如, 随着氨氮浓度的提高, 硝化细菌的丰度也会提高, 具有硝化功能的细菌的种类及其丰度也会增加. 由于 BBNR-CPR 反应器在低温条件下仍然具有较好的氨氧化以及脱氮能力, 因此推测, 反应器生物膜内存在部分能够氨氧化的物种来保障低温硝化效果, 需要采用宏基因组等其他方法辨别这些耐低温型 AOB 物种. 通过碳源调控磷回收的方式, 使得反应器中具有合成 PHA 的功能菌群的物种相对丰度不断提高, 使得反应器内生物膜具有贮存 PHA 能力.

2.3 混合菌群厌氧预贮存 PHA

图 3 是在厌氧条件下, 生物膜吸收 COD 的量以及厌氧末生物膜内贮存的 PHA 的量. 进水 COD 浓度控制在 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

如图 3 所示, 3 个温度 (25、15 和 8°C) 条件下, 在厌氧吸收碳源 (乙酸钠) 12 h 后, 生物膜对乙酸钠吸收率分别为 54.91%、49.37% 和 45.68%, 与 25°C 条件相比, 在 8°C 条件, 生物膜对 COD 吸收率

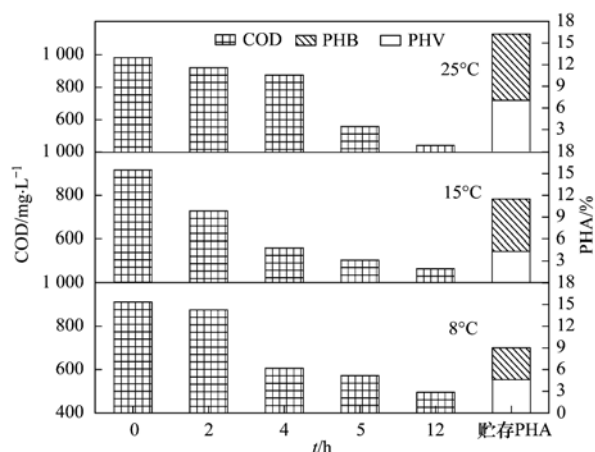


图 3 不同温度混合菌群贮存内源碳

Fig. 3 Storage of endogenous carbon by mixed growth microbial community at different temperatures

下降了约 10%, 说明低温首先会影响微生物对 VFA 的吸收^[20], 推测生物膜内菌群在低温条件下吸收碳源速率下降, 需要较长的时间来适应这种低温的反应条件^[29]; 此外, 低温下, 微生物需要耗费更多能量来源维持基本生命活动. 3 个温度条件下合成的 PHA 含量分别占生物膜干重的 16.24%、11.49% 和 9.01%. 与 Jiang 等^[18] 和 Johnson 等^[20] 研究 SBR 反应器内混合菌群 PHA 的累积量与温度的关系相比, 实验结果较为一致, 即 PHA 的含量随着温度的升高而增加. 而 Pittmann 等^[30] 研究了仅在 20°C 菌群产生 PHA 的累积量最高, 并且 PHB 高于 PHV, 而提高与降低反应温度都会降低 PHA 的累积量. 通过厌氧间歇实验发现, 在控制进水碳源浓度 (COD 浓度 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、合成 PHA 时间一致的条件, PHA 的合成受低温的影响.

2.4 温度和 PHA 含量对混合菌群好氧同步脱氮除磷的影响

图 4 表示间歇实验, 在不同温度和 PHA 含量条件下, 生物膜在持续好氧过程对反应溶液中的氮、磷去除情况.

图 4(a) 表明不同温度条件下 (8°C 、 15°C 和 25°C) 反应溶液内总磷浓度变化. 3 个温度的总磷下降趋势大致相同. 在高 PHA 水平, 反应过程中的总磷的去除率分别达到了 97.46%、100% 和 100%. 反应至中 PHA 水平, 混合菌群仍然表现出较强的吸磷作用, 总磷的去除率分别达到了 74.74%、87.29% 和 81.71%. 而在低 PHA 水平总磷的去除率分别为 11.39%、35.02% 和 38.08%, 主要原因是生物膜内 PHA 含量低. 整个反应过程的吸磷基本不受温度影响.

图 4(b) 表示间歇实验中好氧过程中总氮含量的变化, 在无外加碳源的情况下, 混合菌群可以利

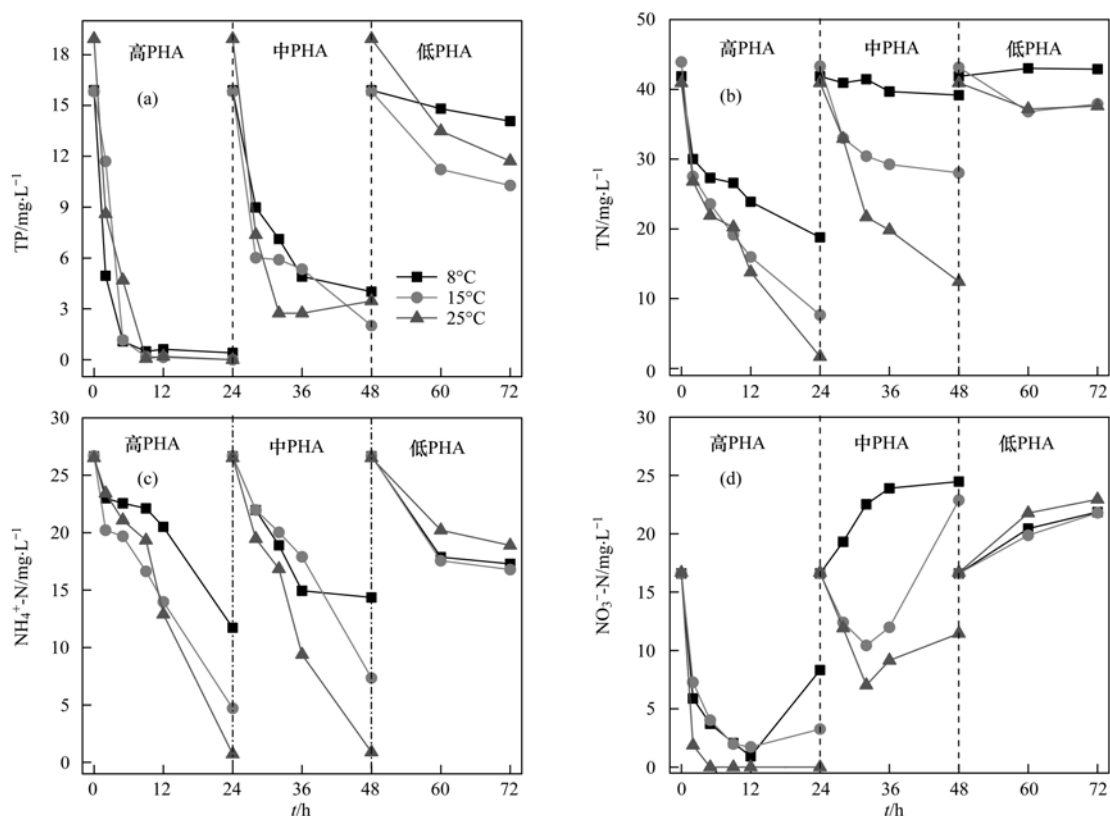


图4 不同温度和不同 PHA 含量对脱氮除磷的影响

Fig. 4 Effect of different temperatures and PHA contents on the nitrogen and phosphorus removal

用 PHA 作为反硝化碳源和能量进行反硝化. 且在高 PHA 水平, 温度为 8、15 和 25℃ 时, 总氮去除率分别达到了 55.15%、82.55% 和 95.89%; 8℃ 反应过程总氮去除率不高的原因是菌群贮存的 PHA 含量较低, 没有充足的 PHA 作为反硝化碳源, 因而消耗的 PHA 量也较低; 中 PHA 水平, 3 个温度下的总氮含量表现出较大差异, 主要原因是 PHA 含量不同所带来的差异; 低 PHA 水平, 3 个温度条件下的总氮的下降趋势大致相同, 基本无反硝化现象. 分析图 4(b) 和 4(d) 中高 PHA 水平, BBNR-CPR 反应器的反硝化细菌(反硝化聚磷菌, 反硝化聚糖菌等)可以利用硝酸盐作为电子受体以及 PHB 作为电子供体进行反硝化脱氮, 与之前的研究结果相似^[5]. 低温条件($\leq 15^\circ\text{C}$)下, 反应过程中有较明显的脱氮除磷效果. 与 Liu 等^[14]在研究低温(15℃)下发现反硝化聚磷菌(DNPAOs)具有很好的耐低温特性, 能够维持 SBR 系统的同时脱氮除磷效率的结论一致. 说明微生物在低温条件进行厌氧反应并贮存 PHA, 在好氧过程中能够同时除磷、反硝化.

图 4(c) 是反应过程氨氮浓度的变化, 在 PHA 贮存量较高(高、中 2 个水平条件下), 氨氮的去除和除磷、反硝化的趋势相同; 但低温(8℃ 和 15℃)氨氮的去除比高温(25℃)差, 主要原因是低温条件下合成的 PHA 含量较低; 还可能是硝化细菌的活

性受温度影响较大. 有研究报道氨氧化细菌对温度变化非常敏感^[29, 31, 32], 低温会抑制硝化细菌的活性和降低硝化作用率. 从高 PHA 水平实验结果来看, 即使在低温条件(15℃)生物膜仍然具较强的硝化能力, 可以表明贮存的 PHA 可以减缓低温的抑制; 还可能是生物膜中存在低温硝化功能菌群和低温反硝化菌群; 由本文 2.2 节中分析结果表明, 生物膜中存在具有硝化功能的 *Nitrotoga* 或者反硝化功能菌群 *Thauera*, 这两类细菌都具有抵抗低温环境的特性; 此外, 由于反硝化细菌能够及时通过反硝化作用去除亚硝态氮, 减缓亚硝酸盐的抑制, 有利于硝化反应的正常进行.

结合图 4 中各实验结果表明, 混合菌群在贮存了 PHA 的前提下, 能够很好地利用内源碳进行除磷、反硝化, 营养元素的去除在 3 组温度条件下的变化趋势相同. 对比高、低 PHA 水平, 结合 3 组温度下的反硝化除磷结果, PHA 含量是影响脱氮除磷的主要因素; 在高 PHA 水平, 即使在低温条件, 混合菌群也保持着良好的除磷和反硝化能力, 说明贮存了 PHA 的混合菌群具有耐受低温的特性.

2.5 混合菌群在不同温度条件下 PHA 含量变化

图 5(a) 表示 3 个好氧周期后的生物膜中的残余 PHA 含量, 图 5(b) 表示每一轮好氧反应消耗 PHA 的量.

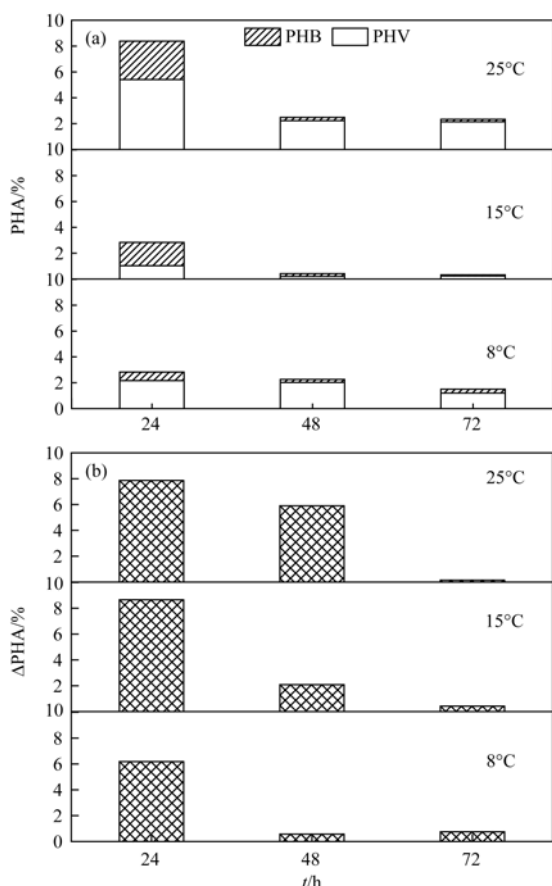


图5 PHA含量的变化

Fig. 5 Changes in the content of PHA

分析图5(b), 第一轮好氧反应阶段的 PHA 变化, 可以发现 3 个温度的条件下消耗的 PHA 含量大致相同, 8、15 和 25℃ 这 3 个温度条件在高 PHA 水平消耗 PHA 量分别占生物膜干重的 6.19%、8.65% 和 7.86%; 分析 0~24 h 好氧过程 (高 PHA 水平), 温度为 8、15 和 25℃ 时总磷的去除率分别达到了 97.46%、100% 和 100%, 总氮去除率分别达到了 55.15%、82.55% 和 95.89%, 磷和氮都有明显的去除趋势 (除总氮在 8℃ 条件外, 主要原因是 8℃ 合成的 PHA 低, 消耗的 PHA 也低); 可以发现混合菌群除磷和反硝化能力与 PHA 含量密切相关. 此外, 15℃ 和 25℃ 反应条件, PHA 充足, 混合菌群率先利用 PHB, 然后消耗 PHV, 说明分子量小的 PHB 比 PHV 更容易被微生物吸收利用. 此外, 混合菌群经 0~24 h 的好氧脱氮除磷后, 仍然能够利用体内贮存的残留 PHA 维持新一轮 (24~48 h) 的脱氮除磷反应. 然而, 微生物在 15℃ 和 25℃ 条件的脱氮除磷效率仍可以维持较高的水平, 但在 8℃ 条件下, 尽管微生物体内贮存一定量的 PHA, 但此时 PHA 的消耗量也很少, 这些能源物质很有可能优先被用于维持微生物新陈代谢所需的基本能量, 而不足以提供满足反硝化所需的碳源与能量.

BBNR-CPR 反应器碳源调控磷回收的运行方式, 能够合成富集大量的具有贮存 PHA 能力的功能菌群, 并通过厌氧磷回收合成大量的 PHA 抵御低温的影响. 反应器贮存足够的 PHA 是反应器能够在耐受低温冲击的重要原因.

3 结论

(1) 通过实施反应器碳源调控-磷回收的运行方式, BBNR-CPR 反应器在低温 ($\leq 15^\circ\text{C}$)、低 C/N 比条件也能够维持较好的除磷、脱氮效率.

(2) 随着温度的降低、反应器运行时间的增加, BBNR-CPR 反应器内具有脱氮除磷功能种属 (*Candidatus Competibacter*、*Candidatus Accumulibacter*、*Run-SP154*、*Thauera*、*Candidatus Nitrotoxa*) 的相对丰度不断升高, 成为低温条件下的优势种属; 这些种属都具有贮存 PHA 的功能.

(3) 采用低温运行时反应器的生物膜进行间歇实验, 发现在进水碳源浓度、反应时间一致的条件下, 低温会降低 PHA 的合成量.

(4) 研究 BBNR-CPR 反应器的混合菌群在不同 PHA 水平的耐低温能力, 发现生物膜的 PHA 预贮存量较高时, 具有较好的脱氮除磷效率, 能够降低低温对脱氮除磷的影响.

参考文献:

- [1] 张顺, 田晴, 汤曼琳, 等. 磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 979-986.
- [2] Zhang S, Tian Q, Tang M L, et al. Effect of Phosphorus recovery on phosphorus bioaccumulation/harvesting in an alternating anaerobic/aerobic biofilter system[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 979-986.
- [3] Lei M, Wang S Y, Li B K, et al. Effect of carbon source type on intracellular stored polymers during endogenous denitrification (ED) treating landfill leachate[J]. Water Research, 2016, **100**: 405-412.
- [4] Huang L, Chen Z Q, Wen Q X, et al. Insights into feast-famine polyhydroxyalkanoate (PHA)-producer selection: Microbial community succession, relationships with system function and underlying driving forces[J]. Water Research, 2018, **131**: 167-176.
- [5] 姚樱, 陈银广, 马民, 等. 不同丙酸/乙酸对聚糖菌/短期代谢的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 1970-1974.
- [6] Tao Y, Chen Y G, Ma M, et al. Long-term and short-term effects of propionic/acetic acid ratios on metabolism of glycogen-accumulating organisms[J]. Environmental Science, 2007, **28**(9): 1970-1974.
- [7] Tian Q, Zhuang L J, Ong S K, et al. Phosphorus (P) recovery coupled with increasing influent ammonium facilitated intracellular carbon source storage and simultaneous aerobic phosphorus & nitrogen removal[J]. Water Research, 2017, **119**: 267-275.
- [8] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, et al. Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-

- endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage [J]. *Water Research*, 2015, **77**: 191-200.
- [7] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **84**(2): 170-178.
- [8] Saad S A, Welles L, Abbas B, *et al.* Denitrification of nitrate and nitrite by '*Candidatus Accumulibacter phosphatis*' clade IC [J]. *Water Research*, 2016, **105**: 97-109.
- [9] Wang X X, Wang S Y, Zhao J, *et al.* Combining simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal with post-denitrification for low carbon/nitrogen wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **220**: 17-25.
- [10] Miao L, Wang S Y, Li B K, *et al.* Advanced nitrogen removal via nitrite using stored polymers in a modified sequencing batch reactor treating landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 354-360.
- [11] Ji J T, Peng Y Z, Bo W, *et al.* Achievement of high nitrite accumulation via endogenous partial denitrification (EPD) [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **224**: 140-146.
- [12] Pradhan S, Borah A J, Poddar M K, *et al.* Microbial production, ultrasound-assisted extraction and characterization of biopolymer polyhydroxybutyrate (PHB) from terrestrial (*P. hystrophorus*) and aquatic (*E. crassipes*) invasive weeds [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **242**: 304-310.
- [13] Inoue D, Suzuki Y, Sawada K, *et al.* Polyhydroxyalkanoate accumulation ability and associated microbial community in activated sludge-derived acetate-fed microbial cultures enriched under different temperature and pH conditions [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, **125**(3): 329-345.
- [14] Liu S L, Li J Z. Accumulation and isolation of simultaneous denitrifying polyphosphate-accumulating organisms in an improved sequencing batch reactor system at low temperature [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2015, **100**: 140-148.
- [15] Laurenzi M, Falås P, Robin O, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures [J]. *Water Research*, 2016, **101**: 628-639.
- [16] 金羽. 温度对 A²/O 系统的影响特征及脱氮除磷强化技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 15-20.
Jin Y. Effect of temperature on the performance of an A²/O process and enhancement of nitrogen and phosphorus removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 15-20.
- [17] Helmer C, Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in ebpr plants [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 531-539.
- [18] Jiang Y, Marang L, Kleerebezem R, *et al.* Effect of temperature and cycle length on microbial competition in PHB-producing sequencing batch reactor [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(5): 896-907.
- [19] Inoue D, Suzuki Y, Uchida T, *et al.* Polyhydroxyalkanoate production potential of heterotrophic bacteria in activated sludge [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2015, **121**(1): 47-51.
- [20] Johnson K, Van Geest J, Kleerebezem R, *et al.* Short-and long-term temperature effects on aerobic polyhydroxybutyrate producing mixed cultures [J]. *Water Research*, 2010, **44**(6): 1689-1700.
- [21] Tian Q, Ong S K, Xie X H, *et al.* Enhanced phosphorus recovery and biofilm microbial community changes in an alternating anaerobic/aerobic biofilter [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1797-1806.
- [22] 魏复盛. 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. 266-268.
- [23] Tan G Y A, Chen C L, Ge L Y, *et al.* Enhanced gas chromatography-mass spectrometry method for bacterial polyhydroxyalkanoates analysis [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2014, **117**(3): 379-382.
- [24] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2010, **27**(1): 99-127.
- [25] McIlroy S J, Albertsen M, Andresen E K, *et al.* '*Candidatus Competibacter*'-lineage genomes retrieved from metagenomes reveal functional metabolic diversity [J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(3): 613-624.
- [26] Marang L, Van Loosdrecht M C M, Kleerebezem R. Enrichment of PHA-producing bacteria under continuous substrate supply [J]. *New Biotechnology*, 2017, **41**: 55-61.
- [27] Alawi M, Lipski A, Sanders T, *et al.* Cultivation of a novel cold-adapted nitrite oxidizing betaproteobacterium from the Siberian Arctic [J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(3): 256-264.
- [28] Lückner S, Schwarz J, Gruber-Dorninger C, *et al.* *Nitrotoga*-like bacteria are previously unrecognized key nitrite oxidizers in full-scale wastewater treatment plants [J]. *The ISME Journal*, 2015, **9**(3): 708-720.
- [29] Zhou H X, Li X, Xu G R, *et al.* Overview of strategies for enhanced treatment of municipal/domestic wastewater at low temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 225-237.
- [30] Pittmann T, Steinmetz H. Polyhydroxyalkanoate production as a side stream process on a municipal waste water treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **167**: 297-302.
- [31] Zhao X Y, Yang J X, Bai S W, *et al.* Microbial population dynamics in response to bioaugmentation in a constructed wetland system under 10°C [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **205**: 166-173.
- [32] Kouba V, Vejmelková D, Proksova E, *et al.* High-rate partial nitrification of municipal wastewater after psychrophilic anaerobic pretreatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(19): 11029-11038.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)