

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 李振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响

孙洪伟¹, 陈翠忠¹, 吴长峰², 赵华南¹, 于雪¹, 方晓航^{3*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州威立雅水务(集团)有限责任公司, 兰州 730060; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 本实验以人工模拟废水为研究对象, 采用 3 组 SBR 反应器 ($R_{15^\circ\text{C}}$ 、 $R_{25^\circ\text{C}}$ 、 $R_{35^\circ\text{C}}$), 重点考察了温度对生物脱氮效能、胞外聚合物 (EPS) 含量及其组分 [蛋白质 (PN)、多糖 (PS) 和核酸 (DNA)] 的影响。结果表明, 高温条件有利于促进亚硝酸型生物脱氮体系的建立, 显著提高氨氮去除性能。温度对 EPS 及其组分具有显著影响。随着温度的升高, EPS 和 TB-EPS 含量逐渐降低, 而 LB-EPS 含量逐渐升高, EPS 以 TB-EPS 为主 (占 69.0% ~ 79.5%), 但 TB-EPS/LB-EPS 比值随着温度升高逐渐降低 [3.8 (15℃) → 3.6 (25℃) → 2.2 (35℃)]。在 EPS, LB-EPS 和 TB-EPS 中 PN 和 DNA 含量随着温度升高而降低, LB-EPS 和 EPS 中 PS 含量随温度升高而增加。而 TB-EPS 中 PS 含量随温度升高而降低, 且 25℃ 是各组分浓度变化重要折点。在 15℃ 和 25℃ 时, PN 为 TB-EPS 和 LB-EPS 的主要成分, PS 次之, DNA 最少, 35℃ 时, PS 成为主要成分, PN 次之, DNA 最少。此外, 本研究也发现, 在 15℃ 和 25℃ 时, EPS 含量在硝化过程中逐渐增大, 反硝化过程中逐渐降低。

关键词: 生物脱氮; 温度; 亚硝酸盐积累率; 胞外聚合物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4648-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704270

Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)

SUN Hong-wei¹, CHEN Cui-zhong¹, WU Chang-feng², ZHAO Hua-nan¹, YU Xue¹, FANG Xiao-hang^{3*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Veolia Water(group) Co., Ltd., Lanzhou 730060, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: In this paper, the long-term effects of temperature on the nitrogen removal performance and the extracellular polymeric substance (EPS) in a sequencing batch reactor (SBR) treating synthetic wastewater was investigated under three temperature conditions (15℃, 25℃, 35℃). The results showed that high temperatures (35℃) could promote the establishment of short-cut nitrification processes and improve nitrogen removal performance greatly. Temperature had a significant impact on the EPS and its composition. With an increased temperature, the EPS and tightly bound EPS (TB-EPS) content decreased, while, loosely bound EPS (LB-EPS) increased slowly. TB-EPS became dominant in the EPS (the percentage of TB-EPS/EPS was 69.0% - 79.5%), however, the ratio of TB-EPS/LB-EPS decreased from 3.8 (15℃) to 3.6 (25℃), and then to 2.2 (35℃) with a gradual increase in temperature. Moreover, protein (PN) and DNA in the EPS, TB-EPS, and LB-EPS decreased with an increasing temperature. Carbohydrates (PS) in the EPS and LB-EPS increased as temperature increased, nevertheless, PS in TB-EPS decreased. Furthermore, 25℃ was identified as the breaking-point temperature in the variation of PN, DNA and PS concentrations. At 15℃ and 25℃, PN was the main component in TB-EPS and LB-EPS. PS has the second highest concentration and DNA the least. However, PS were the dominant component at 35℃, with PN having the second highest concentration, and DNA having a subtle concentration. Moreover, at 15℃ and 25℃, the EPS content increased in the nitrification process and reduced in the denitrification process.

Key words: biological denitrification; temperature; nitrite accumulation rate; extracellular polymeric substance

序批式活性污泥法 (SBR) 工艺由于具有生化反应推动力大, 脱氮除磷效果好, 耐冲击负荷强, 工艺简单, 运行方式灵活和防止污泥膨胀等优点, 已成为污水生物脱氮的主流工艺之一。胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 是在一定环境条件下由微生物 (主要是细菌), 分泌于体外的一些高分子聚合物。主要成分与微生物的胞内成分相似, 是一些高分子物质, 如蛋白质 (PN)、多糖 (PS) 和核酸 (DNA) 等聚合物^[1]。EPS 普遍存在于活性污泥絮体内部及表面, 具有重要的生理功能, 可将环境

中的营养成分富集, 通过胞外酶降解成小分子后吸收到细胞内, 还可以抵御杀菌剂和有毒物质对细胞的危害^[2,3]。根据 EPS 空间位置不同, 分为紧密附着在细胞壁上的孢囊聚合物——紧密型 EPS (TB-EPS) 和以胶体和溶解状态松散于液相主体中的黏

收稿日期: 2017-04-26; 修订日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668031); 甘肃省自然科学基金项目 (1606RJZA009); 百名青年优秀人才培养计划项目 (152022)

作者简介: 孙洪伟 (1976 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高氨氮污水生物脱氮及过程控制, E-mail: 411813017@qq.com

* 通信作者, E-mail: fangxiaohang@scies.org

性聚合物——松散型 EPS (LB-EPS)^[4]。国内外学者研究表明,温度对生物脱氮效果和 EPS 产量均有重要影响,该方面研究总结为以下 3 个方面:①单一研究温度对生物脱氮效果的影响。汪志龙^[5]以合成废水为研究对象,以丙酸钠作为单一碳源,分别设置温度为 5、15、25、35℃的 4 组序批式反应器考察了温度对单级好氧工艺生物脱氮除磷性能的影响。Guo 等^[6]在 5~30℃条件下,研究了同时氮化和脱硝(SBR-SND)顺序间歇反应器的性能。Hendrickx 等^[7]采用 UASB,以实际生活污水为研究对象,探究了 10℃和 20℃条件下氮的去除。②单一考察了温度对 EPS 产量及组分的影响。张宝良等^[8]研究了 3 种温度(-20℃,室温,4℃)条件下,市政污水污泥、可乐废水好氧污泥和可乐废水厌氧污泥 3 种污泥的 EPS 产量。Song 等^[9]研究了常温(28℃)和低温(10℃)条件下 EPS 产量对活性污泥脱水性能的研究。Gao 等^[10]研究了在 30、20 和 10℃条件下, EPS 在膜污染中的作用。③同步研究了温度对生物脱氮效能及 EPS 的影响。张兰河等^[11]考察了 4 种温度(10±2)、(17±2)、(22±2)、(30±2)℃对 A²O 工艺脱氮速率及胞外聚合物的影响,随着温度的升高,总氮(TN)和 COD 去除速率逐渐上升,EPS 质量浓度先降低后升高。宋成康等^[12]研究了温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥 EPS 的影响,在温度 33℃→25℃→20℃→15℃范围内,EPS 总含量及各组分均与温度成负相关。在生物脱氮过程中,活性污泥是实现氮去除的功能主体,EPS 是活性污泥的重要组成部分^[13~15]。因此,同步考察温度对生物脱氮效能和 EPS 的影响,可深入解析基于微生物 EPS 变化角度揭示生物脱氮本质。此外,相关报道大多基于短期实验获得研究结果,因此较难反映温度对 EPS 变化长期影响规律,难以获得准确的 EPS 与生

物脱氮相关性。

基于上述研究背景,本文主要研究低温(15℃)、中温(25℃)和高温(35℃)这 3 种条件下,SBR 生物动态脱氮效果、硝化反应类型、活性污泥中 EPS 及各组分的特性变化规律,揭示温度对两者的长期同步影响,并建立生物脱氮过程与 EPS 变化的相关性。

1 材料与方法

1.1 实验装置、废水特性及接种污泥

实验装置主要包括 SBR 反应器(内、外径分别为 14 cm 和 15 cm,有效容积为 5 L)和自动控制系统(水温自动控制系统和过程控制系统)两部分组成。通过水温自动控系统以维持 SBR 反应器运行温度。借助于过程控制系统[以溶解氧(DO)、pH 和氧化还原电位(ORP)为控制参数]准确指示生化反应进程。

实验用水采用人工模拟废水,废水成分主要包括: NH₄Cl (115 mg·L⁻¹), CH₃COONa (385 mg·L⁻¹),KH₂PO₄ (26 mg·L⁻¹)和微量元素浓缩液。微量元素主要包括: MgSO₄·7H₂O (5.07 mg·L⁻¹), MnSO₄·4H₂O (0.31 mg·L⁻¹), FeSO₄·7H₂O (2.49 mg·L⁻¹), CuSO₄ (0.25 mg·L⁻¹), Na₂MoO₄·2H₂O (1.26 mg·L⁻¹), ZnSO₄·7H₂O (0.44 mg·L⁻¹), NaCl (0.25 mg·L⁻¹), CaSO₄·2H₂O (0.43 mg·L⁻¹), CoCl₂·6H₂O (0.41 mg·L⁻¹), EDTA (1.88 mg·L⁻¹)^[16],每升废水加入 1mL 微量元素,废水水质见表 1。接种污泥取自甘肃省兰州市七里河安宁区污水处理厂生物循环曝气池工艺好氧段活性污泥,该污水主要处理七里河区和安宁区的生活污水(60%~70%)和啤酒废水(30%~40%)。

表 1 模拟废水水质

Table 1 Characteristics of the simulated wastewater used in this study

项目	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO _x ⁻ -N/mg·L ⁻¹	pH
范围	147.7~315.6	29.4~44.6	0.05~0.25	7.1~7.8
平均值	203.3	40.7	0.07	7.4

1.2 实验方案

本实验开始前,为强化接种污泥的脱氮性能,对该接种污泥进行 20 d 培养驯化,获得稳定脱氮效果后进行连续实验。污泥驯化结束后,均分入 3 个运行温度分别为 15、25 和 35℃的 SBR 反应器(分别表示为:R_{15℃}、R_{25℃}和 R_{35℃})。利用恒温循环水浴池

维持反应器内混合液温度。反应器每个运行周期包括瞬时进水、曝气、缺氧搅拌、沉淀排水和闲置 5 个阶段。具体运行参数见表 2。

1.3 检测项目与方法

氨氮(NH₄⁺-N),纳氏试剂比色法;硝态氮(NO₃⁻-N),麝香草酚法;亚硝态氮(NO₂⁻-N),N-

(1-萘基)-乙二胺分光光度法; COD, COD 快速测定仪法^[17]. 胞外聚合物(EPS): 分光光度法. 取 10 mL 泥水混合液, 采用改良型热提取法提取 EPS, 其中蛋白质(PN)采用考马斯亮蓝法, 以牛血清白蛋白作为标准物质; 多糖(PS)采用苯酚-硫酸

法, 以葡萄糖作为标准物质; 核酸(DNA)采用紫外吸收法^[18]. 污泥浓度: 混合液悬浮固体(MLSS)和混合液挥发性悬浮固体(MLVSS), 滤纸重量法^[17]. 此外, pH 值、DO 和温度(*T*)采用 WTW-Multi 3420 测定仪监测.

表 2 3 个 SBR 反应器运行条件

反应器	运行周期及各阶段反应时间/min					进水水质及活性污泥浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			运行条件		
	周期时间	进水	曝气	缺氧	沉淀排水	COD	NH_4^+-N	MLSS	<i>T</i> /℃	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
R ₁₅ ℃	340	5	180	120	35	300	30	3 812	15 ± 1.0	0.1 ~ 2.5	7.5 ± 0.2
R ₂₅ ℃	250	5	150	60	35	300	30	3 728	25 ± 1.0	0.1 ~ 2.5	7.5 ± 0.2
R ₃₅ ℃	160	5	90	30	35	300	30	3 765	35 ± 1.0	0.1 ~ 2.5	7.5 ± 0.2

2 结果与讨论

2.1 温度对 SBR 生物脱氮效能的影响

温度是生物脱氮过程重要的影响因素之一, 本质在于温度直接影响微生物的活性, 进而间接体现在生化反应速率、氮去除速率和硝化反应类型等方面的变化. 图 1 表明 3 种温度条件下, 氨氮去除率, 硝化反应速率和亚硝积累率的变化规律. 从图 1 (a) 可以看出, 整个实验过程中, 进水 NH_4^+-N 浓度维持 25.6 ~ 37.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间 (平均值为 29.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ± 2.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). R₁₅℃、R₂₅℃ 和 R₃₅℃ 出水 NH_4^+-N 浓

度分别为 0 ~ 9.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值为 0.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ± 1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 0 ~ 8.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值为 0.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ± 1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 0 ~ 10.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值为 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ± 2.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 相应的去除率平均值分别为 96.9%、98.3% 和 96.6%. 实验 3 种温度条件下, SBR 反应器均实现了较高的 NH_4^+-N 去除率, 获得了较充分的 NH_4^+-N 去除效果, 汪志龙^[5] 的研究中, 15、25 和 35℃ 条件下 SBR 反应器 NH_4^+-N 平均去除率分别为 98.9%、99.9% 和 99.5%, NH_4^+-N 去除效果与本实验结果几乎一致. 郭宁等^[19] 研究结果显示 15℃ 条件下, SBR 反应器运行初期 NH_4^+-N

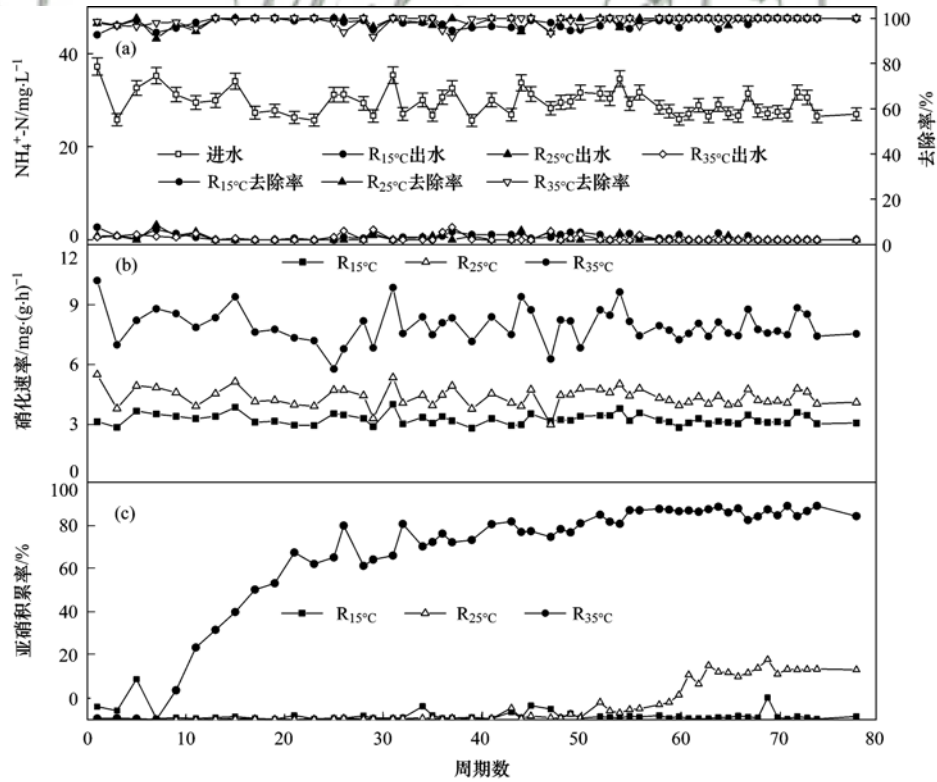


图 1 SBR 反应器内氨氮去除效果、硝化速率和硝化反应类型的变化

Fig. 1 Variations of NH_4^+-N , nitrification rate and the reaction type during the experimental period for R₁₅℃, R₂₅℃, and R₃₅℃

浓度为 $260.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 当反应进行至 240 min, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度降至 $176.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率仅为 32%。笔者认为原因在于反应过程中每种温度条件下 SBR 系统提供了充足的反应时间, 因此, 本实验控制条件下, 在反应时间足够的前提下, 温度不会影响 SBR 系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率。

硝化反应速率是衡量 SBR 系统脱氮效率的重要方面, 本实验研究过程中, $R_{15^\circ\text{C}}$ 、 $R_{25^\circ\text{C}}$ 和 $R_{35^\circ\text{C}}$ 系统的硝化反应速率分别为 (3.2 ± 0.26) 、 (4.3 ± 0.47) 和 $(7.9 \pm 0.86) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 可见随着温度升高, 硝化反应速率显著增高[图 1(b)], 与高景峰等^[20] 研究结果是一致的。图 1(c) 描述了 SBR 系统内亚硝态氮积累率(NiAR)的变化, 以此反映硝化过程中氮形态($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$)的转化规律。对于 $R_{15^\circ\text{C}}$ 反应器, 硝化结束时, NiAR 值为 $2.0\% \pm 2.98\%$, 表明该温度条件下, 硝化结束时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是主要硝化产物, 也就是说, 98% 以上的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被氧化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 因此, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过全程生物脱氮途径去除。对于 $R_{25^\circ\text{C}}$ 系统, 在第 1~55 周期内, 硝化结束时 NiAR 的平均值为 $1.3\% \pm 1.77\%$, 表明此阶段 SBR 系统为全程硝化。从第 55 周期开始, NiAR 逐渐增加, 在第 78 周期时, NiAR 达到了 23.1%, 表明 $R_{25^\circ\text{C}}$ 系统处于全程硝化向短程硝化逐步转化的过程。因此, 对于 $R_{25^\circ\text{C}}$ 系统, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除基于全程生物脱氮和短程生物脱氮两种途径完成的。对于 $R_{35^\circ\text{C}}$ 系统, 从第 9 周期以后, NiAR 开始逐渐增加, 到第 55 周期时, NiAR 达到了 97.0%, 此后始终稳定在 96.4% 左右, 表明系统已经实现了稳定的短程硝化。所以, 对于 $R_{35^\circ\text{C}}$ 系统, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过短程生物脱氮途径实现去除。

通过 $R_{15^\circ\text{C}}$ 、 $R_{25^\circ\text{C}}$ 和 $R_{35^\circ\text{C}}$ 系统硝化类型的转变可以发现, 温度对硝化类型具有明显影响。通常认为 20°C 是实现短程硝化的临界温度。然而, 也有一些学者在低温($<20^\circ\text{C}$)条件下实现了短程生物脱氮。针对短程硝化, 虽然目前尚未形成统一规范的温度界限, 但普遍的共识是, 高温是实现和维持短程硝化强有力因素。原理在于: 高温条件下($>20^\circ\text{C}$), 氨氧化细菌(AOB)增殖速率高于亚硝酸盐氧化细菌(NO)增殖速率, AOB 成为系统内优势硝化菌属, 导致亚硝酸盐积累^[21]。

2.2 温度对 EPS, LB-EPS 和 TB-EPS 含量影响

EPS 是微生物在生长过程中分泌的黏性物质, 是微生物的新陈代谢产物。因此, 对于活性污泥生物脱氮系统, 温度是影响微生物生长过程的重要环

境条件, 显著影响微生物的新陈代谢过程, 因而温度会对微生物 EPS 产量及其组分产生影响。本部分实验主要考察了温度对活性污泥中 EPS 含量影响。图 2 为 $R_{15^\circ\text{C}}$ 、 $R_{25^\circ\text{C}}$ 和 $R_{35^\circ\text{C}}$ 系统硝化过程 EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 的变化规律(其中 EPS 为 LB-EPS 和 TB-EPS 加和)。从图 2(a)~2(c)可以看出, 每种温度条件下, EPS, LB-EPS 和 TB-EPS 含量均呈现出一定的波动性。在 15°C 、 25°C 和 35°C 条件下, TB-EPS 分别占 EPS 总量的 $79.0\% \pm 6.7\%$ 、 $77.9\% \pm 5.9\%$ 、 $70.7\% \pm 8.9\%$, LB-EPS 占 EPS 总量的 $20.9\% \pm 6.7\%$ 、 $22.1\% \pm 5.9\%$ 、 $29.3\% \pm 8.9\%$, 且 TB-EPS 为 LB-EPS 的 4.4 ± 2.4 、 4.0 ± 2.2 、 2.8 ± 1.8 倍, 因此, TB-EPS 是 EPS 重要的组成部分。图 2(d) 反映了 3 种温度条件下, EPS, LB-EPS 和 TB-EPS 含量的对比。当温度由 15°C 上升至 35°C 时, 随着温度的升高, EPS 和 TB-EPS 含量均呈现下降趋势, 而 LB-EPS 含量逐渐升高。由于 EPS 主要来源于微生物细胞新陈代谢过程中产生或污水中携带的 PS 和 PN, 以及微生物细胞自溶产生的 DNA^[13]。结合了相关研究^[11,12,22] 及实验数据两方面, 推断得到本实验 15°C 低温条件下(低于微生物正常生长的 20°C), 微生物增殖速率较低, 大量细胞出现自溶, 释放出大量的 EPS, 导致 EPS 含量增加。另一方面, 本实验长期低温条件, 使得微生物产生持久应激反应, 在生长过程中分泌大量代谢产物^[23], 引起 EPS 含量增加。对于较高温度(25°C 和 35°C)条件下, EPS 含量降低的原因主要在于: ①温度升高使得微生物获得了适宜的生长环境条件, 生长速率加快, 新陈代谢活动增强, 细胞分泌的高分子聚合物增多, 导致 EPS 含量增加; ②温度升高也使得细胞自溶数量减少, 由细胞自溶释放出的 EPS 减少; 基于实验数据和文献资料, 笔者推测, 此过程中细胞自溶产生的 EPS 含量占主导地位, 总体表现为 EPS 含量减少。

关于温度对 EPS 含量的影响, 研究者获得的结论也不尽相同, 主要包括以下几方面: ①随着温度的升高, EPS 含量先降低, 后升高。张兰河等^[11] 采用 A^2O 工艺处理模拟生活污水, 当温度从 $10^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$ 上升至 $22^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$ 时, EPS 及其组分的含量逐渐降低。当温度从 $22^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$ 继续增加到 $30^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$ 时, EPS 及其组分的含量逐渐升高。周健等^[22] 的研究发现, 当温度由 10°C 升至 15°C 时, EPS, DNA 及 PN 含量均降低, 当温度由 15°C 继续升高到 30°C 时, EPS 和 PS 含量明显增加, 但 DNA 和 PN 的增加量不显著。②温度与 EPS 的产量无显著的相关

性. Tseng 等^[24]的研究认为温度与 EPS 的产量无显著的相关性. ③EPS 含量与温度呈负相关. Wilén 等^[25]发现实际活性污泥处理工艺,在冬季,活性污泥 EPS 含量高于夏季,并且 EPS、PS、PN 和腐殖酸

的产量均与温度呈负相关. 宋成康等^[7]研究了厌氧氨氧化污泥 EPS 与温度的关系,在 33 ~ 15℃ 温度范围内,随着温度的降低,EPS 及其组分的含量均升高,表现出与温度呈负相关的趋势.

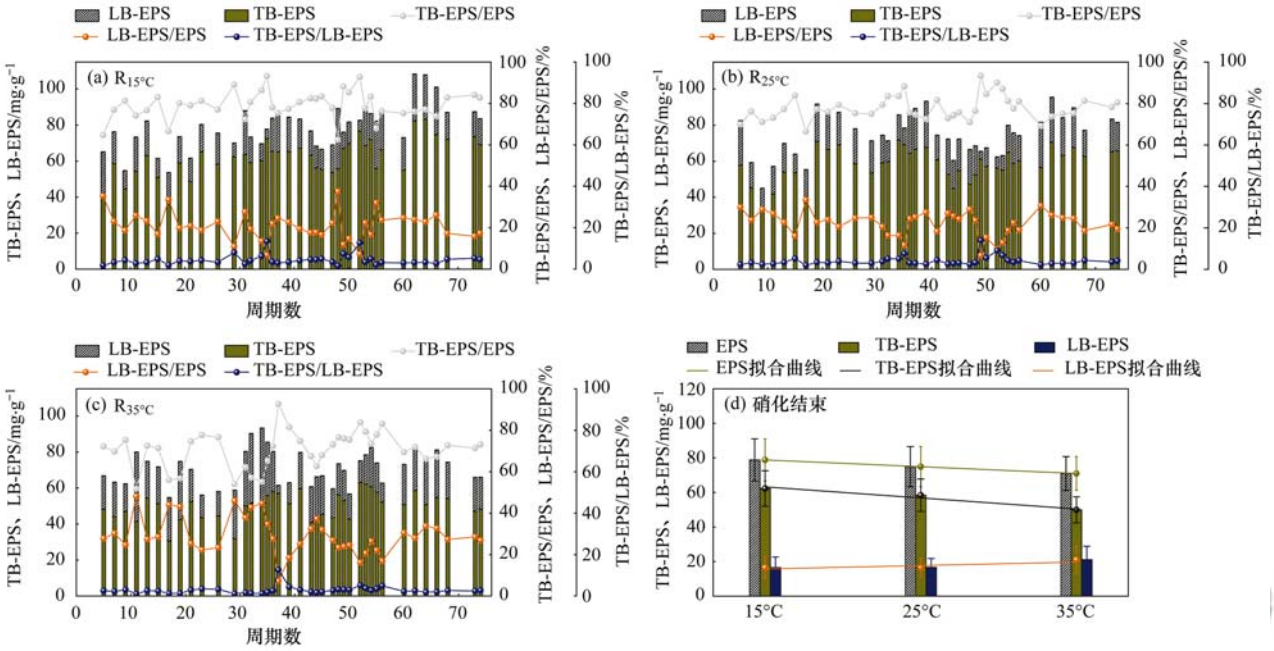


图 2 不同温度条件下,EPS,LB-EPS 和 TB-EPS 含量的变化规律
Fig. 2 Variations of EPS, LB-EPS and TB-EPS under different temperature conditions

这里需要指出的是:本实验过程中,随着温度升高,EPS 和 TB-EPS 与温度呈负相关,与宋成康等^[7]和 Wilén 等^[25]的研究结果是一致的,且拟合方程为: $y = -1.31x + 80.19$ 和 $y = -2.05x + 65.12$,而 LB-EPS 与温度呈正相关,与文献^[7,25]的研究结果是相反的,且拟合方程为: $y = 0.75x + 15.07$ [图 2 (d)和表 3].

表 3 温度对 EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 含量影响拟合曲线
Table 3 Fitting curves for EPS, TB-EPS and LB-EPS at different temperatures

项目	R^2	拟合方程
EPS	0.99	$y = -1.31x + 80.19$
TB-EPS	0.92	$y = -2.05x + 65.12$
LB-EPS	0.51	$y = 0.75x + 15.07$

2.3 温度对 EPS, TB-EPS 和 LB-EPS 中各组分含量影响

图 3 和表 4 为 3 种温度条件下,EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 中的 PN,PS 和 DNA 含量. 可以清楚地反映出两方面实验现象:①3 种温度条件下,EPS[图 3 (a)],TB-EPS[图 3 (b)]和 LB-EPS[图 3 (c)]中的 PN、DNA 含量变化趋势几乎相同,即 15℃ 和 25℃ 条件下,PN 和 DNA 在 EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 含量

几乎保持不变,但当温度升高至 35℃ 时,PN 和 DNA 含量显著降低. ②对于 PS,其在 EPS 和 LB-EPS 含量变化趋势相似,即 15℃ 和 25℃ 条件下,PS 含量略微降低,在 35℃ 时,PS 含量明显增加. PS 在 TB-EPS 的含量随着温度的升高逐渐降低,即 $27.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (15℃) $\rightarrow 25.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (25℃) $\rightarrow 24.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (35℃). 基于上述 2 方面实验结果,笔者发现 35℃ 是 EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 中各组分含量的重要折点,主要原因可能在于:在 15℃ 和 25℃ 温度条件下,SBR 系统处于全程生物脱氮过程[图 1 (c)],异养菌、氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌共存于活性污泥体系. 在 35℃ 条件下的 SBR 系统,为短程生物脱氮过程[图 1 (c)],异养菌和氨氧化菌是活性污泥中的主导微生物. 因此,不同温度条件引起微生物菌群差异,进而导致活性污泥中的 PN,PS 和 DNA 含量有所不同. 图 3 (d)和表 4 反映了 3 种温度条件下,EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 中各组分比例大小. 可以看出,在 15℃ 和 25℃ 时,PN 是 EPS,TB-EPS 和 LB-EPS 中的主要成分,其次为 PS, DNA 最少,尤其在 LB-EPS 中,PN 占 LB-EPS 总量的 80% 左右. 而在 35℃ 时,PS 是 EPS 和 TB-EPS 中的主要成分(占 51% 和 48%),其次为 PN(占 43% 和 44%),DNA 最

少(占 6% 和 8%),在 LB-EPS 中,PS 和 PN 作为主要成分,比例均为 49%,DNA 仅仅占 2%。实验过程中发现,随着温度的改变,PN 和 PS 在反应过程中变化较大,DNA 含量始终维持在 2% ~ 10% 相对稳定

的范围内。在 EPS 组分中,较容易被微生物利用的 PN 和 PS 在反应过程中被微生物降解利用,同时细胞代谢不断产生,两种组分共占 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 总量的 90% ~ 98%,是 EPS 的重要成分。

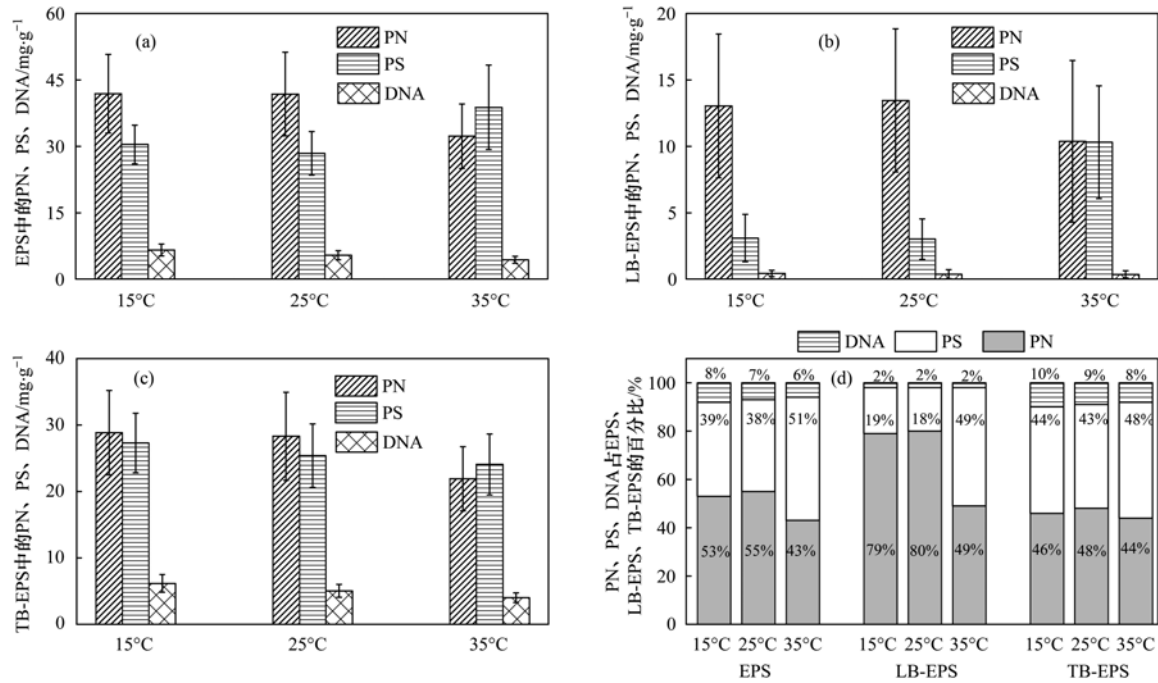


图 3 EPS 组分含量变化规律
Fig. 3 Variations of PN, PS and DNA in EPS, TB-EPS and LB-EPS

表 4 EPS 组分的含量及所占比例 (mg·g⁻¹)
Table 4 Components of EPS and its proportions in EPS

温度/℃	EPS/mg·g ⁻¹			LB-EPS/mg·g ⁻¹			TB-EPS/mg·g ⁻¹			EPS 中组分比例/%			LB-EPS 中组分比例/%			TB-EPS 中组分比例/%		
	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA
15	41.8	30.4	6.5	13.0	3.08	0.42	28.8	27.3	6.1	53	39	8	79	19	2	46	44	10
25	41.7	28.4	5.4	13.4	3.01	0.36	28.3	25.40	5.0	55	38	7	80	18	2	48	43	9
35	32.2	38.7	4.3	10.3	10.3	0.35	21.9	24.0	4.0	43	51	6	49	49	2	44	48	8

2.4 有机物、氮、EPS 及其组分在 SBR 典型周期内的变化规律

图 4 表明了 3 种温度条件下,SBR 系统典型周期内有机物、氮、EPS 及其各组分的变化规律。硝化反应过程,随着反应进行,COD 和NH₄⁺-N 浓度逐渐降低,NO_x⁻-N 浓度逐渐升高。反硝化反应过程,COD 作为电子供体被利用,NO_x⁻-N 被还原成氮气,两者浓度均逐渐降低。从 EPS 及其各组分浓度变化曲线可以看出,15℃ 时硝化反应过程 EPS、TB-EPS、PN、PS 和 DNA 均随着反应进行不断升高,反硝化反应过程各指标逐渐降低,反硝化结束后,系统进入厌氧阶段,EPS 及其各组分由于细胞自溶导致浓度升高。25℃ 时硝化反应过程 EPS 及其各组分均表现出显著降低,后明显升高的趋势。反硝

化反应过程 EPS、LB-EPS、PN、PS 和 DNA 逐渐降低,TB-EPS 逐渐增加,进入厌氧阶段后,EPS 及其各组分浓度升高。35℃ 时硝化反应过程 EPS 及其各组分略微降低,而后增加。而 TB-EPS 浓度先降低,后增加,再降低的变化趋势。反硝化反应过程,EPS、TB-EPS 及其各组分均呈现轻微增加的趋势。3 种温度条件下,反应过程中 EPS 及其组分的变化规律具有一定的差异,分析原因可能在于不同温度导致微生物活性、种类、新陈代谢过程、细胞分泌物和细胞自溶程度的差异引起的。需要指出的是,PN 和 PS 在反应过程中浓度不断变化,被微生物降解或细胞代谢产生。表明 PN 和 PS 更容易被微生物利用,而 DNA 浓度始终维持相对稳定,较难被微生物利用。

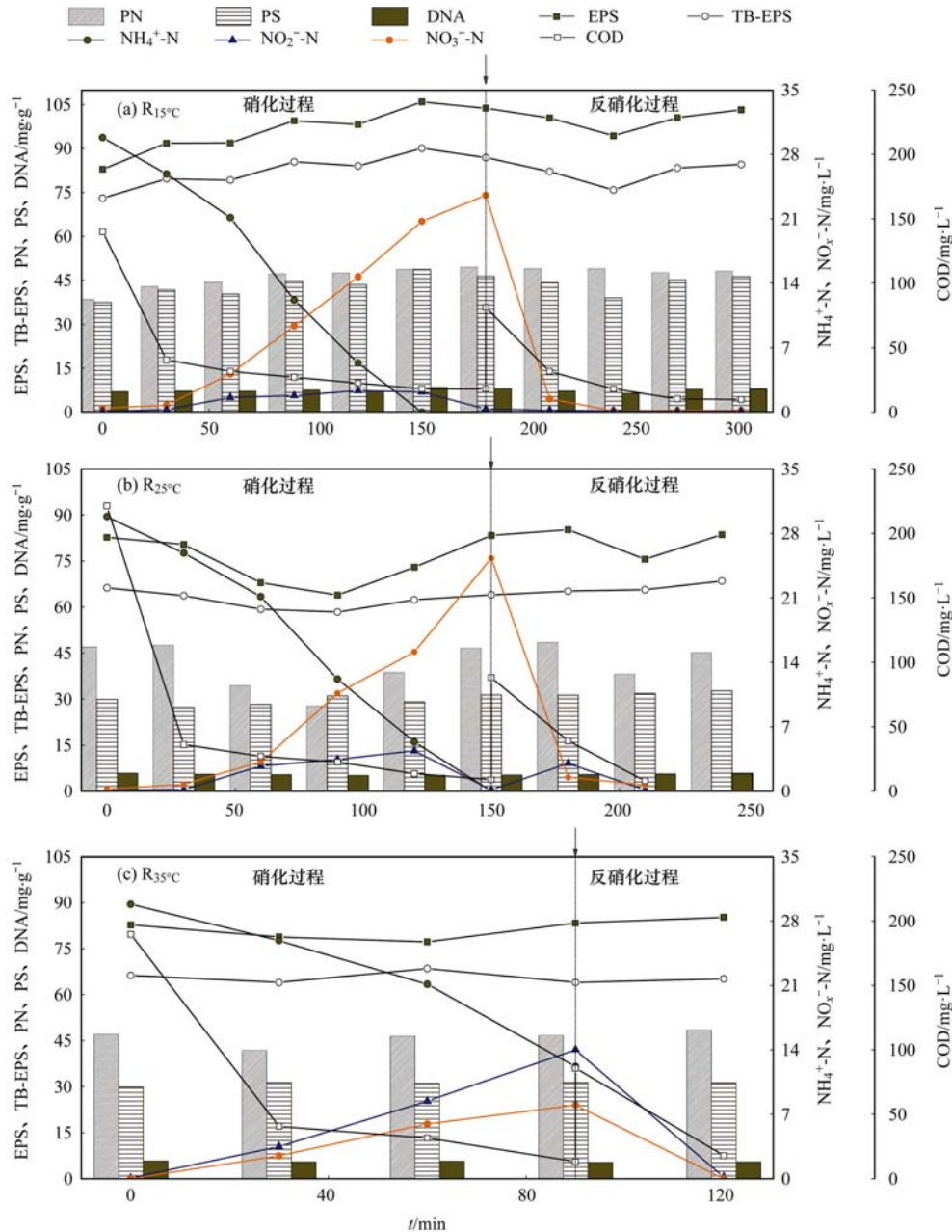


图 4 SBR 典型周期内有机物、氮、EPS 及其组分的变化规律

Fig. 4 Variations of COD, EPS and its components during typical period in the SBRs

3 结论

(1) 温度对生物脱氮硝化类型和反应速率具有重要影响. 高温条件有利于短程硝化的实现, 并获得较高的硝化速率.

(2) 温度对 EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 含量具有一定影响. 随着温度升高, 三者均呈现逐渐降低趋势. 此外, EPS 以 TB-EPS 为主 (占 69.0% ~ 79.5%), 随着温度升高, TB-EPS 含量逐渐降低, LB-EPS 含量却逐渐上升 (20.5% ~ 31%), 导致 TB-EPS/LB-EPS 比值逐渐减小, 介于 2.2 ~ 3.8 之间.

(3) 温度对 EPS 中 PN、DNA 和 PS 含量产生明显影响. PN 和 DNA 在 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 中含量随温度升高而降低. PS 在 EPS 和 LB-EPS 中含量随着温度升高而增加, 在 TB-EPS 中含量逐渐降低. 此外, 15°C 和 25°C 时, PN 是 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 的主要成分. 35°C 时, EPS 和 TB-EPS 主要成分是 PS, LB-EPS 主要成分是 PS 和 PN, 比例均为 49%.

(4) 不同温度条件下, EPS 及其各组分在生物脱氮过程的变化规律表现出一定差异性. 15°C 时, EPS 及其各组分呈现逐渐增加 (硝化反应过程), 而后逐渐降低的趋势 (反硝化过程). 25°C 和 35°C 时,

EPS 及其各组分呈现先降低、后升高(硝化反应过程),再轻微升高的趋势。

参考文献:

- [1] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [2] Zhang X Q, Bishop P L, Kupferle M J. Measurement of polysaccharides and proteins in biofilm extracellular polymers [J]. *Water Science and Technology*, 1988, **37**(4-5): 345-348.
- [3] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, **65**(2): 143-148.
- [4] Poxon T L, Darby J L. Extracellular polyanions in digested sludge: measurement and relationship to sludge dewaterability [J]. *Water Research*, 1997, **31**(4): 749-758.
- [5] 汪志龙. 温度对 SBR 单级好氧生物脱氮除磷性能的影响 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014. 2-2.
- Wang Z L. Effect of temperatures on nitrogen and phosphorus removal in aerobic/extended-idle regime [D]. Changsha: Hunan University, 2014. 2-2.
- [6] Guo J B, Zhang L H, Chen W, *et al.* The regulation and control strategies of a sequencing batch reactor for simultaneous nitrification and denitrification at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 59-67.
- [7] Hendrickx T L G, Wang Y, Kampman C, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2187-2193.
- [8] 张宝良, 王宝辉, 田禹, 等. 温度对活性污泥胞外聚合物组分的影响研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(8): 1331-1333.
- Zhang B L, Wang B H, Tian Y, *et al.* Effect of temperature on composition of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(8): 1331-1333.
- [9] Song Y W, Zheng G Y, Huo M B, *et al.* Extracellular polymeric substances and bound water drastically affect bioleached sludge dewaterability at low temperature [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(20): 2538-2545.
- [10] Gao D W, Wen Z D, Li B, *et al.* Membrane fouling related to microbial community and extracellular polymeric substances at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 172-177.
- [11] 张兰河, 李巍巍, 庞香蕊, 等. 温度对 A²O 工艺脱氮速率及胞外聚合物影响 [J]. *化学工程*, 2014, **42**(3): 1-5.
- Zhang L H, Li W W, Pang X R, *et al.* Effect of temperature on denitrification rate and extracellular polymeric substances using A²O process [J]. *Chemical Engineering*, 2014, **42**(3): 1-5.
- [12] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- Song C K, Wang Y Y, Han H C, *et al.* Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- [13] 王彩霞, 张伟军, 王东升, 等. 钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2243-2251.
- Wang C X, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Influencing mechanism of titanium salt coagulant chemical conditioning on the physical and chemical properties of activated sludge flocs [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2243-2251.
- [14] 袁冬琴, 王毅力. 活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
- Yuan D Q, Wang Y L. Study on the stratification components of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge and their variation characteristics in physicochemical properties [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
- [15] Magara Y, Nambu S, Uotosawa K. Biochemical and physical properties of an activated sludge on settling characteristics [J]. *Water Research*, 1976, **10**(1): 71-77.
- [16] Ye F X, Peng G, Li Y. Influences of influent carbon source on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(9): 1250-1255.
- [17] 国家环境保护局. 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. 200-281.
- [18] 曹占平, 张宏伟, 张景丽. 污泥龄对膜生物反应器污泥特性及膜污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(4): 386-390.
- Cao Z P, Zhang H W, Zhang J L. Effects of sludge retention time on the sludge characteristics and membrane fouling in membrane bioreactor [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(4): 386-390.
- [19] 郭宁, 张建, 孔强, 等. 温度对亚硝化及氧化亚氮释放的影响 [J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(4): 1308-1312.
- Guo N, Zhang J, Kong Q, *et al.* Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(4): 1308-1312.
- [20] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 温度对亚硝酸型硝化/反硝化的影响 [J]. *高技术通讯*, 2002, **12**(12): 88-93.
- Gao J F, Peng Y Z, Wang S Y. The effect of temperature on short-cut nitrification/denitrification [J]. *High Technology Letters*, 2002, **12**(12): 88-93.
- [21] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [22] 周健, 柴宏祥, 龙腾锐. 活性污泥胞外聚合物 EPS 的影响因素研究 [J]. *给水排水*, 2005, **31**(8): 19-23.
- Zhou J, Chai H X, Long T R. Study on influence factors of extra-cellular polymers in activated sludge [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005, **31**(8): 19-23.
- [23] 刘彪, 宁德刚. 细菌应激反应中 (p) ppGpp 代谢的调控 [J]. *微生物学通报*, 2011, **38**(9): 1425-1429.
- Liu B, Ning D G. Modulation of (p) ppGpp metabolism during bacterial stringent response [J]. *Microbiology China*, 2011, **38**(9): 1425-1429.
- [24] Tseng L Y, Gori R, Rosso D. Effects of activated sludge process conditions on the production of extracellular polymeric substances: results of yearlong monitoring in a warm climate [J]. *Environmental Engineering Science*, 2015, **32**(7): 582-592.
- [25] Wilén B M, Lumley D, Mattsson A, *et al.* Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant [J]. *Water Research*, 2008, **42**(16): 4404-4418.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)