

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

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

2006~2015年北京市不同地区O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气PM ₁₀ 和PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响

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: 以实际生活废水为处理对象, 考察了 SBR 工艺好氧/缺氧(O/A)和缺氧/好氧(A/O)运行模式对生物脱氮性能、胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)及其组分(蛋白质 PN、多糖 PS 和核酸 DNA)的影响。结果表明, O/A 和 A/O 运行模式下, SBR 工艺均获得了高效稳定的 NH_4^+-N 去除, 去除率分别为 97.5% 和 98.0%, 且硝化速率与 NH_4^+-N 负荷呈现较好正相关性。交替缺氧/好氧运行模式对于 EPS 影响, A/O 模式下 EPS 产量略高于 O/A 模式下, 且运行模式对 TB-EPS 及其组分(PN、PS 和 DNA)产量无显著影响, 但 A/O 模式下 LB-EPS 及其组分(PN 和 PS)产量均高于 O/A 模式下, 倍数介于 1.38 ~ 1.56 之间。2 种模式条件下, PS 是 TB-EPS 和 EPS 的主要组分, 而 PN 是 LB-EPS 的主要成分。EPS 含量与污泥沉降性能具有良好的线性正相关。

关键词: SBR; 运行模式; 生物脱氮; 胞外聚合物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0256-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705191

Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge

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: Nitrogen removal, extracellular polymeric substances (EPS), and the chemical composition (protein (PN), polysaccharide (PS), and DNA) by the aerobic/anoxic (O/A) and the anoxic/aerobic (A/O) modes were studied in a sequencing batch reactor (SBR) fed with domestic wastewater. The results showed that the removal rates of NH_4^+-N were 97.5% and 98.0% in the two operating modes, respectively, and a removal efficiency of NH_4^+-N with high efficiency and stability was obtained. The nitrification rate was positively correlated with the nitrogen loading ratio. The influence of operating modes for the alternating anoxic/oxic mode on extracellular polymeric substances of activated sludge was evaluated. The EPS constituent in the A/O mode was slightly higher than the O/A mode. The operating mode had no effect on the contents of PN, PS, and DNA in tightly bound EPS (TB-EPS) and TB-EPS. However, PN and PS in loosely bound EPS (LB-EPS) and LB-EPS in the A/O mode were 1.38 to 1.56 times those of the O/A mode. In the two operating modes, PSs were the main constituents in the TB-EPS and EPS, while PNs were the main constituents in LB-EPS. The EPS content had a good linear correlation with the sludge settling performance.

Key words: sequence batch reactor (SBR); operating modes; biological nitrogen removal; extracellular polymeric substances

序批式活性污泥法(SBR)工艺具有生化反应推动力大,脱氮除磷效果好,耐冲击负荷强,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。好氧/缺氧(O/A)模式为进水、曝气、搅拌、沉淀、排水和闲置等5个阶段,反硝化过程需从外界投加碳源;缺氧/好氧(A/O)模式为进水、搅拌、曝气、沉淀、排水和闲置等5个阶段,其反硝化时无需外加碳源,同时硝化过程中所消耗的碱度可在反硝化中得到一定的补偿。

胞外聚合物(extracellular polymeric substance,

EPS)作为活性污泥中除细胞和水分之外的重要成分^[1,2],其主要来源于微生物细胞代谢的分泌物、细胞自溶产生的聚合物、细胞脱落的表面物质及进水基质中的相关组分^[2,3]。主要成分与微生物的胞内

收稿日期: 2017-05-19; 修订日期: 2017-06-12

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); 兰州交通大学大学生科技创新项目(DXS-KJCX-2016-011); 大学生创新实验项目(2017070)

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: shw@emails.bjtu.edu

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

成分相似,是一些高分子物质,如多糖(PS)、蛋白质(PN)和核酸(DNA)等聚合物^[4]. 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^[5,6]. 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性聚合物——松散型 EPS(LB-EPS)^[7].

目前,有关 SBR 工艺 O/A 和 A/O 运行方式对其脱氮效果及 EPS 影响研究主要涉及以下 2 方面: ①运行模式对 SBR 脱氮效果具有重要影响. 如王芳等^[8]研究 SBR 工艺厌氧/好氧运行模式交替次序、次数和持续时间对脱氮性能影响,认为交替次数增加有利于提高系统的脱氮性能. 楼菊青等^[9]发现将 SBR 工艺闲置阶段设置在进水和曝气阶段之间可提高 40% 的 TN 去除率. 杨延栋^[10]的研究认为,2 种运行模式条件下,均可获得较好的有机物和氨氮去除效果. ②尚未见有报道 2 种运行模式条件下 EPS 产量及其组分差异情况,仅 Wang 等^[11]进行了相似性研究. 他们对比了 SBR 运行模式 I (30 min 进水

+18 h 生物反应+2 h 沉淀+1 h 排水+2.5 h 闲置)与模式 II (18 h 生物反应+6 h 闲置)对胞外聚合物产量的影响,发现模式 II 下 LB-EPS 含量是模式 I 的 3 倍.

基于上述背景,本试验采用 SBR 工艺,主要考察 O/A 和 A/O 运行模式对系统脱氮效能及活性污泥 EPS 含量的影响,在揭示运行模式对生物脱氮和 EPS 同步影响的基础上,进一步分析 EPS 含量对活性污泥沉降性能的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置、废水特性及接种污泥

试验装置主要包括序批式 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. 通过水温自动控制系统以维持 SBR 反应器的运行温度. 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]准确指示生化反应的进程. 本试验用水取自兰州交通大学家属区生活污水,主要水质参数见表 1.

表 1 试验用水水质参数					
Table 1 Characteristics of the wastewater used in this study					
项目	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO _x ⁻ -N/mg·L ⁻¹	pH	C/N
范围	109.9~273.7	11.3~51.7	0.1~0.6	7.0~7.8	1.2~4.2
平均值	163.4	26.0	0.2	7.4	3.1

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%),其性质为:MLSS=8 000 mg·L⁻¹,pH 为 7.21~7.46.

1.2 试验方案

本试验开始前,为强化接种污泥的脱氮性能,对该接种污泥进行 20 d 的培养驯化(表 2),获得稳定的脱氮效果后进行了连续试验. 污泥驯化结束后,

均分 2 个运行方式分别为好氧/缺氧(O/A)和缺氧/好氧(A/O)的 SBR 反应器(分别表示为:R_{O/A}和 R_{A/O}). 反应器内混合液的温度利用恒温循环水浴池维持. 反应器每天运行 1 个周期,R_{O/A}运行模式为包括瞬时进水、曝气、缺氧搅拌、沉淀排水和闲置这 5 个阶段;R_{A/O}运行模式为包括瞬时进水、缺氧搅拌、曝气、沉淀排水和闲置这 5 个阶段. 每周运行 6 h(曝气 4 h,缺氧 2 h),反硝化时投加乙醇为外加碳源(30 mg·L⁻¹),排水比为 0.5.

表 2 试验控制条件									
Table 2 Operating conditions in this study									
运行模式	运行周期及各阶段反应时间/min					污泥(MLSS) /mg·L ⁻¹	运行条件		
	周期时间	进水	好氧	缺氧	沉淀排水		T/℃	DO/mg·L ⁻¹	pH
R _{O/A}	395	5	240	120	30	5 400±400	25±1.0	0.1~2.5	7.5±0.2
R _{A/O}	395	5	120	240	30	5 400±400	25±1.0	0.1~2.5	7.5±0.2

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): 紫外分光光度法; 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; 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^[12]. 此外,pH 值、

DO 和温度(T)采用 WTW-Multi 3420 测定仪监测。

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出 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^[13]。

2 结果与讨论

2.1 运行模式对生物脱氮效能的影响

图 1 对比了 SBR 工艺 2 种运行模式下氮的去

除规律。图 1(a)可以看出,整个试验过程中,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度维持 $11.3 \sim 51.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间[平均值为 $(26.0 \pm 8.0) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$], $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 $0.1 \sim 12.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [平均值为 $(1.1 \pm 2.1) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 和 $0.1 \sim 3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [平均值为 $(0.7 \pm 0.8) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$], 相应地平均去除率分别为 96.5% 和 97.1%。本试验控制的 2 种运行模式下, SBR 反应器均实现了较高的氨氮去除率, 获得了较充分的氨氮去除效果, 这一结果与文献[9, 10] 获得结论相一致。

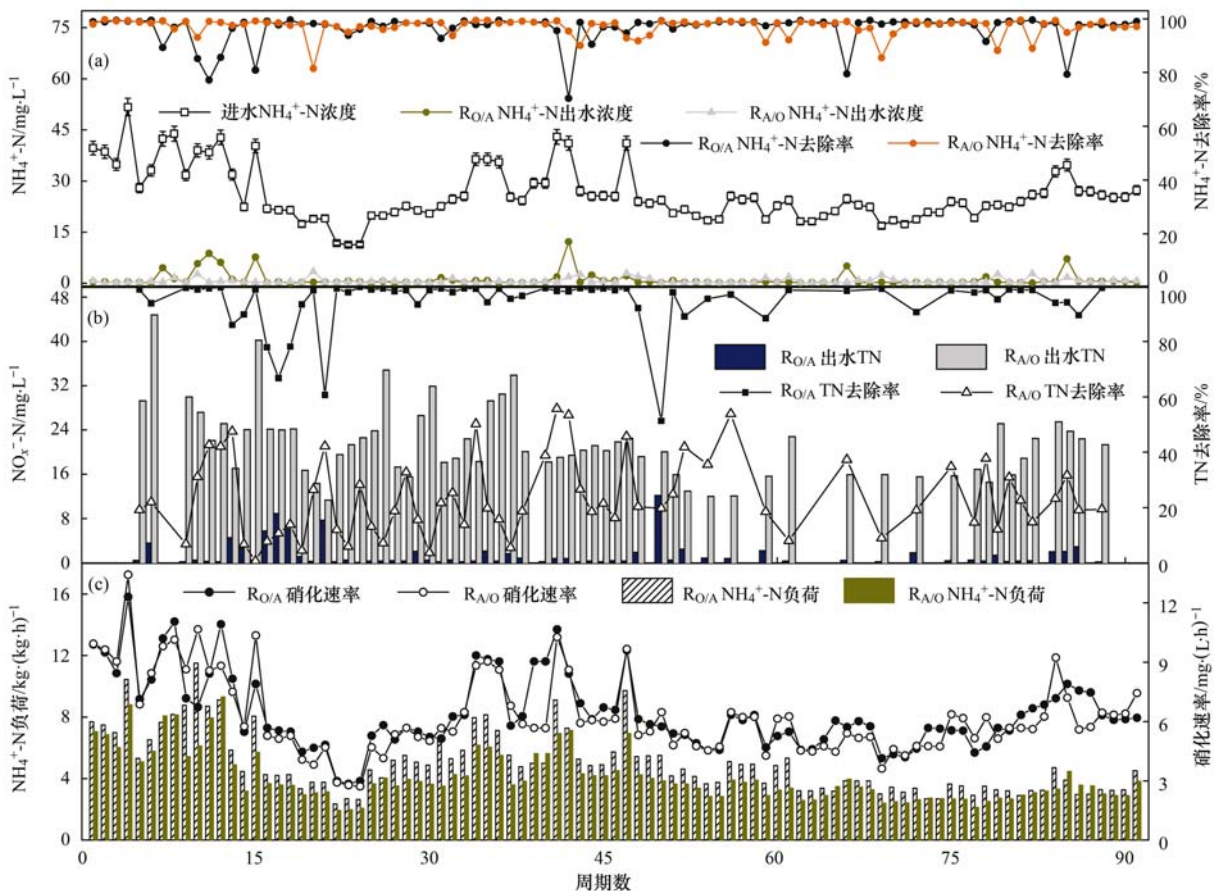


图 1 两种运行模式下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、硝化速率、氮氮负荷及 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 的变化规律

Fig. 1 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, nitrification rate, nitrogen loading ratio and $\text{NO}_x^-\text{-N}$ for the two operating modes

图 1(b) 表明了 $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统总氮(TN)的变化规律。2 种模式条件下,出水 TN 浓度分别为 $(1.5 \pm 2.3) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(21.7 \pm 6.5) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其整个运行周期的去除率均值分别为 94.4% 和 23.5%。可以看出,相对于 A/O 模式, O/A 模式 TN 去除率提高 75%。但楼菊青等^[9]的研究表明 O/A 模式 TN 降低了 60%。分析原因在于:本试验中 O/A 模式在反硝化阶段提供了充足的碳源作为电子供体被利用, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 全部被还原, TN 得到很好地去除。楼菊青等^[9]的研究可能是因为没有外加碳源, 所以总氮去

除率低, 其研究和实际污水处理工艺结合得更紧密, 也更有实际指导意义。

在 $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统, 硝化速率(以 VSS 计, 下同)分别为 $(6.4 \pm 1.9) \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $(6.3 \pm 2.0) \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$; 可以看出, SBR 的运行模式条件对硝化反应速率几乎无影响。此外, 2 种运行模式条件下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷分别为 $(5.0 \pm 2.0) \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $(4.1 \pm 1.6) \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ [图 1(c)], 氨氮负荷与硝化反应速率的变化趋势表现出正相关性, 即随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷的升高, 硝化速率也随之增大, 与郭

丽娜等^[14]的研究结果一致. 而王春英^[15]的研究认为随着 NLR 不断提高,硝化速率与 NH_4^+ -N 负荷由正相关转变为负相关. 笔者认为原因在于本试验中采用的 NH_4^+ -N 负荷较低,而王春英在研究中逐步提高 NH_4^+ -N 负荷,当 NH_4^+ -N 负荷超过了硝化菌所能承受的范围时,对其产生了毒害作用,导致硝化速率与 NH_4^+ -N 负荷由正相关转变为负相关.

2.2 运行模式对 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 含量的影响

EPS 主要由 LB-EPS 和 TB-EPS 两部分组成,因此,活性污泥中 EPS 含量(以 VSS 计,下同)为 LB-EPS 和 TB-EPS 含量之和. 图 2 和表 3 对比了 $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统硝化结束和反硝化结束时 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 变化规律. 对于硝化结束和反硝化结束时, $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统中 TB-EPS 含量占 EPS 含量的 80% 以上, LB-EPS 占 EPS 含量的 16% ~ 20%, 因此, EPS 主要以 TB-EPS 为主.

$R_{A/O}$ 系统中的 EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 含量均略高于 $R_{O/A}$ 系统产生的量,也就是说,缺氧/好氧运行模式更有利于活性污泥产生 EPS. 从表 3 还可以清楚看出,对于硝化结束和反硝化结束时, LB-EPS 在 $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统中的比值分别为 1.36 和 1.4, 因此相对于 EPS 和 TB-EPS, 运行模式对 LB-EPS 含量变化影响较大. 关于运行模式对 EPS 和 TB-EPS 产量的影响, 研究者获得的结论也不尽相同, 有研究认

为虽然运行模式对 EPS 和 TB-EPS 产量影响不显著,但对 TB-EPS 中的 PN 和 PS 产量有显著影响^[11],同时有研究者认为运行模式对 EPS 产量有显著影响^[16]. 本研究中运行模式对 EPS 和 TB-EPS 有一定影响,但并不显著,而对于 LB-EPS 影响较为显著.

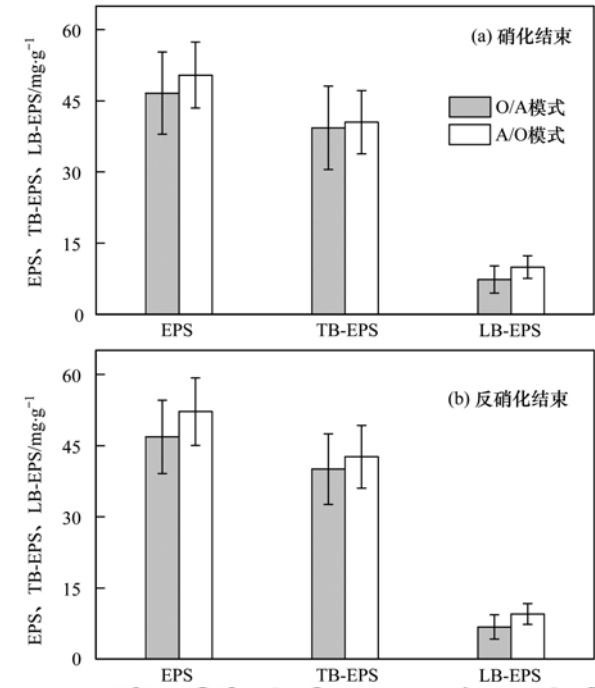


图 2 不同运行模式下 EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 含量的变化
Fig. 2 Variations of EPS, LB-EPS, and TB-EPS in the $R_{O/A}$ and $R_{A/O}$ systems

表 3 2 种运行模式下,活性污泥中 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 含量¹⁾/mg·g⁻¹
Table 3 EPS, TB-EPS, and LB-EPS of sludge in the two operating modes/mg·g⁻¹

项目	硝化结束			反硝化结束		
	O/A	A/O	$R_{A/O}/R_{O/A}$	O/A	A/O	$R_{A/O}/R_{O/A}$
EPS	46.6 ± 8.7	50.4 ± 6.9	1.08	46.9 ± 7.7	52.2 ± 7.1	1.11
TB-EPS	39.23 ± 8.8	40.5 ± 6.7	1.03	39.9 ± 7.8	42.7 ± 6.6	1.07
LB-EPS	7.3.9	9.9 ± 2.4	1.36	6.8 ± 2.6	9.5 ± 2.2	1.40

1) $R_{A/O}/R_{O/A}$ 表示 O/A 模式和 A/O 模式中 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 含量的比,下同

此外,对比 2 个系统硝化结束和反硝化结束时 EPS 含量可以发现, $R_{O/A}$ 系统硝化结束和反硝化结束时, EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 含量几乎相同. 而对于 $R_{A/O}$ 系统,硝化结束时 EPS 和 TB-EPS 含量略低于反硝化结束时, LB-EPS 含量却高于反硝化结束时.

2.3 运行模式对 EPS 各组分影响

EPS 主要由多糖 (PS)、蛋白质 (PN) 和核酸 (DNA) 这 3 种组分组成,不同运行模式对 PS、PN 和 DNA 的含量产生重要影响. 相对于 $R_{O/A}$ 系统, $R_{A/O}$ 系统中 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 中 PS、PN 和 DNA 的含量均较高(图 3 和表 4). 进一步可以看

出, $R_{A/O}$ 系统中的 EPS 和 LB-EPS 中的 PN 分别是 $R_{O/A}$ 系统的 1.15 和 1.44 倍,可得运行模式对 EPS 和 LB-EPS 中的 PN 含量影响明显. 在反硝化阶段 $R_{A/O}$ 系统中 LB-EPS 中的 PS 是 $R_{O/A}$ 系统的 1.56 倍,即反硝化阶段时,运行模式对 LB-EPS 中的 PS 有显著影响.

对于 EPS 和 TB-EPS, PS 分别占 EPS 和 TB-EPS 含量的 50% 和 70% 左右, PN 分别占 40% 和 25% 左右, DNA 分别占 10% 和 5% 左右,因此, PS 是 EPS 和 TB-EPS 最重要的组成部分, PN 次之, DNA 含量最少,与文献^[17,18]的研究结果一致. 而文献^[19 ~ 22]认为 PN 是 EPS 的重要组分. 对于 LB-PES, PN、

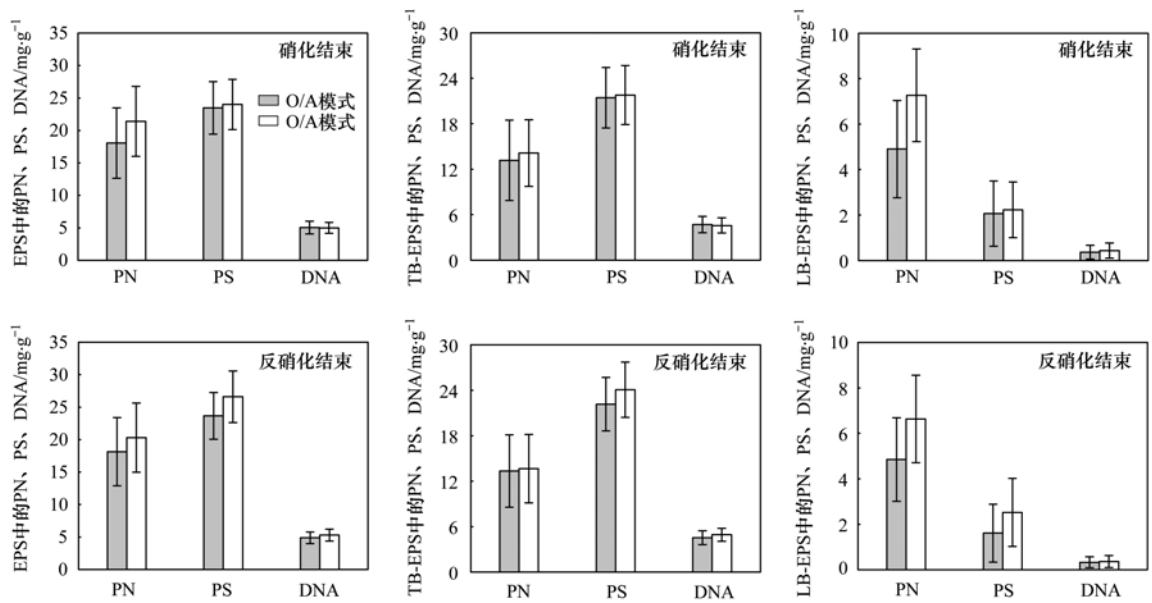


图 3 EPS 组分含量变化规律

Fig. 3 Variations of PN, PS and DNA in EPS, TB-EPS and LB-EPS

表 4 EPS 组分的含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 Components of EPS and their proportions/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

项目		EPS			TB-EPS			LB-EPS		
		PN	PS	DNA	PN	PS	DNA	PN	PS	DNA
硝化结束	O/A	18.1 ± 5.4	23.5 ± 4.0	5.1 ± 1.0	13.2 ± 5.3	21.4 ± 4.0	4.7 ± 1.1	4.9 ± 2.1	2.1 ± 1.4	0.4 ± 0.3
	A/O	21.4 ± 5.4	24.0 ± 3.9	5.0 ± 0.8	14.1 ± 4.4	21.8 ± 3.9	4.6 ± 1.0	7.3 ± 2.0	2.2 ± 1.2	0.4 ± 0.3
	R _{AO} /R _{OA}	1.18	1.02	0.98	1.07	1.02	0.98	1.49	1.05	1.00
反硝化结束	O/A	18.1 ± 5.3	23.7 ± 3.6	4.9 ± 0.9	13.3 ± 4.8	22.2 ± 3.5	4.5 ± 0.9	4.8 ± 1.8	1.6 ± 1.3	0.3 ± 0.2
	A/O	20.3 ± 5.3	26.6 ± 4.0	5.3 ± 0.9	13.7 ± 4.5	24.1 ± 3.6	4.9 ± 0.9	6.6 ± 1.9	2.5 ± 1.5	0.4 ± 0.3
	R _{AO} /R _{OA}	1.12	1.12	1.08	1.03	1.09	1.09	1.38	1.56	1.33

PS 和 DNA 大约分别占 LB-EPS 含量的 55%、33% 和 12%, 因此, PN 是 LB-PES 最重要的组成部分, PS 次之, DNA 含量最少, 这与 Wang 等^[11]的研究结果一致. 有研究认为 TB-EPS 与 LB-EPS 中 PS 的含量比 PN 和 DNA 都要高^[17,18].

2.4 有机物、氮、EPS 及其组分在 SBR 典型周期内变化规律

图 4 表明了 2 种运行模式下, SBR 典型周期内有机物、氮、EPS 及其各组分的变化规律. $R_{O/A}$ 系统, 硝化反应过程, 随着反应进行, COD 和 NH_4^+-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_3^--N 被还原, 两者浓度均逐渐降低. $R_{A/O}$ 系统, 反硝化反应过程, 利用原污水中的有机物作为碳源, 将硝态氮还原为气态氮, 硝化反应过程, 随着反应进行, COD 和 NH_4^+-N 浓度逐渐降低, NO_x^--N 浓度逐渐升高.

在硝化反应阶段, $R_{O/A}$ 系统的 EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 呈现上升趋势, 分析原因: EPS 产量一部分由微生物代谢产生, 在硝化阶段, 系统内的营养物质

充足, 微生物代谢活跃, TB-EPS 与 LB-EPS 含量上升, EPS 产量增加; 并且当营养物质匮乏, 异养型细菌消耗自身物质, 导致 EPS 产量的增加. 在反硝化阶段, EPS、TB-EPS 和 LB-EPS 整体呈现下降趋势, 分析原因: EPS 还可以作为碳源和能源物质供给细胞^[4,23~26], 缺氧环境下好氧细菌以自身产生的 EPS 作为营养物质消耗 EPS, 导致 EPS 产量下降. 在反硝化阶段, $R_{A/O}$ 系统的 EPS 和 TB-EPS 呈现下降的趋势, LB-EPS 呈现先下降后上升的趋势, 在硝化阶段, EPS、LB-EPS 呈现先上升后下降的趋势, TB-EPS 呈现上升的趋势, 说明整个运行周期内运行模式对于 TB-EPS 无影响, 而对 LB-EPS 有一定影响. 需要指出的是, 不同运行模式下, 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.

2.5 EPS 对污泥沉降性能的影响

国内外学者对活性污泥中 EPS 含量与活性污泥的沉降性能的影响进行了大量的研究, 但获得的

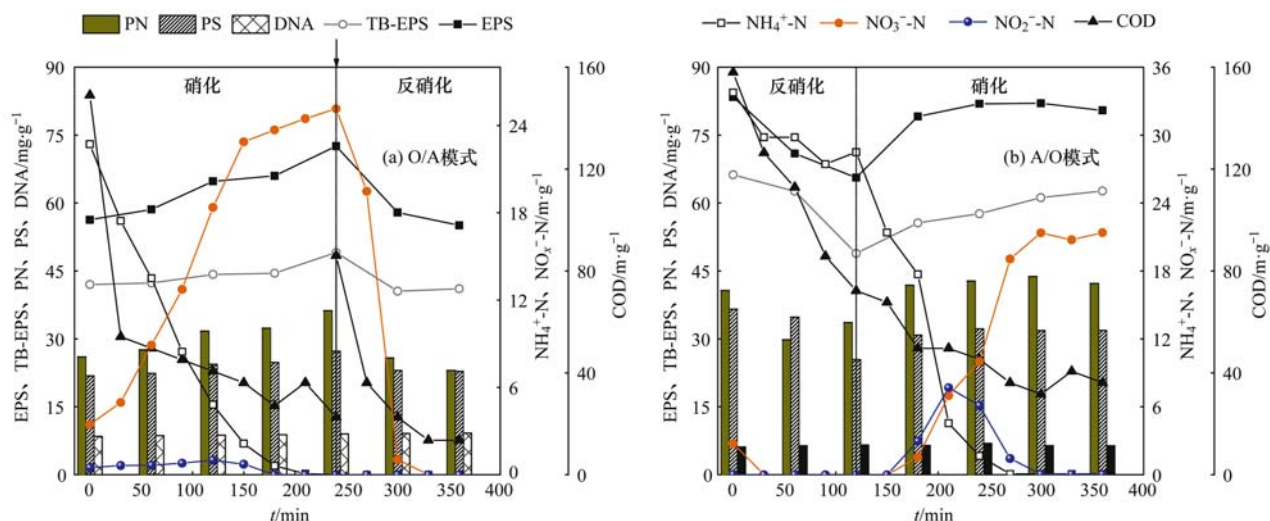


图4 SBR典型周期内有机物、氮、EPS及其组分的变化规律

Fig. 4 Variations of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and EPS and their components during a typical period in the SBRs

结论也不尽相同. 因此, 本试验也考察了 EPS 含量对活性污泥沉降性能的影响. 从图 5 可以看出, $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统中 SVI 随 EPS 含量的变化规律相似, 即 SVI 随 EPS 含量的增加而增加, 表现为正相关性, 充分表明 EPS 含量的增加不利于活性污泥的沉降性能, 这与周健等^[27] 的研究结果相一致. Forstor^[28] 的研究发现污泥中 EPS 含量与 SVI 同步增加. 但刘佩等发现^[29], 在低负荷氧化沟系统中污泥中的 EPS 含量与 SVI 成显著的负向线性关系, 笔者分析原因首先可能在于所采用的处理工艺不同, 其次微生物的生存环境有较大的差别.

此外, 通过对 $R_{O/A}$ 和 $R_{A/O}$ 系统中 SVI 和 EPS 的数据进行拟合, 可得回归方程分别为 $\text{SVI}_{O/A} = 0.63\text{EPS} + 14.2$ 和 $\text{SVI}_{A/O} = 0.75\text{EPS} + 3.9$, 表明两者均呈现线性正相关, 国内有学者^[27] 得到的回归方程为 $\text{SVI} = 4.12\text{EPS} + 21.66$. 通过对比回归方程的斜率还可以看出, 相对于 $R_{O/A}$ 系统回归方程的斜率

(为 0.63), $R_{A/O}$ 系统回归方程的斜率较大 (为 0.75), 说明在 $R_{A/O}$ 系统中 EPS 对污泥的沉降性能影响更为显著.

3 结论

(1) O/A 和 A/O 运行条件下, SBR 反应器均实现了较高的氨氮去除率, 去除率分别为 97.5% 和 98.0%. 硝化速率随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷的增加而升高, 呈现正相关.

(2) 运行模式对 TB-EPS 及其组分 (PN、PS 和 DNA) 无影响; 而 A/O 中的 LB-EPS 含量及其组分 (PN 和 PS) 是 O/A 模式的 1.4、1.38 和 1.56 倍.

(3) 两种运行模式下, PS 占 TB-EPS 和 EPS 含量的 67% ~ 73% 和 48% ~ 51% 之间, PS 是 TB-EPS 和 EPS 中主要的组分, 而 PN 为 LB-EPS 的主要成分, 占 LB-EPS 含量的 54% ~ 56%.

(4) EPS 对活性污泥的沉降性能具有一定的影响. 随着 EPS 产量增加, 活性污泥沉降性能逐渐变差, 活性污泥 EPS 含量与 SVI 呈线性正相关.

参考文献:

- [1] Tian Y, Zheng L, Sun D Z. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(3): 420-427.
- [2] 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.
- [3] 袁冬琴, 王毅力. 活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及

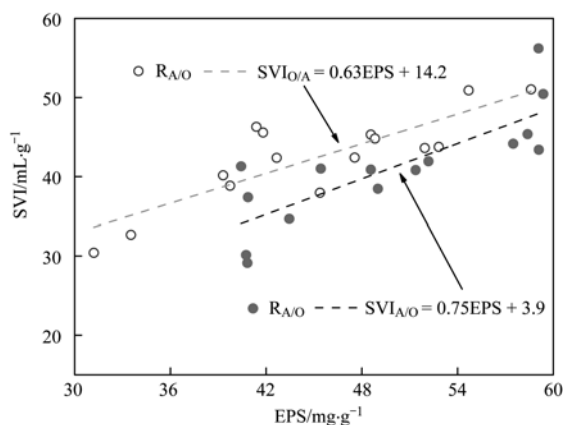


图5 EPS含量对污泥沉降性能的影响

Fig. 5 Influence of EPS on the SVI

- 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]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3522-3528.
- [4] 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.
- [5] 李绍峰, 崔崇威, 黄君礼. 胞外聚合物 EPS 对 MBR 膜污染的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(2): 266-269.
- Li S F, Cui C W, Hang J L. Effect of extracellular polymeric substances on membrane fouling of membrane bioreactor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, **39**(2): 266-269.
- [6] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, **13**(9): 31-34.
- Wang H W, Li X Y, Zhao Q X. Effect of extra-cellular polymeric substances(EPS) on bio-flocculation and settlement of activated sludge[J]. China Safety Science Journal, 2003, **13**(9): 31-34.
- [7] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2752-2757.
- Zhou J, Zhou L X, Wong W C. Optimization of extracellular polymeric substance extraction method and its role in the dewaterability of sludge[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2752-2757.
- [8] 王芳, 葛佳波. SBR 不同运行模式对好氧颗粒污泥性能的影响[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2015, **28**(4): 18-23.
- Wang F, Ge G B. Influence of different SBR models on nitrogen removal performance of aerobic granules[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2015, **28**(4): 18-23.
- [9] 楼菊青, 郭茂新. SBR 生物脱氮运行控制方式的优化[J]. 水资源保护, 2009, **25**(4): 70-72, 81.
- Lou J Q, Guo M X. Operating modes optimization of biological nitrogen removal in sequencing batch reactor system[J]. Water Resources Protection, 2009, **25**(4): 70-72, 81.
- [10] 杨延栋. 不同运行方式下好氧颗粒污泥处理生活污水[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Yang Y D. Using aerobic granule sludge to treat domestic sewage with different operate patterns[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [11] Wang H W, Deng H H, Ma L M, *et al.* Influence of operating conditions on extracellular polymeric substances and surface properties of sludge flocs[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, **92**(1): 510-515.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 郭丽娜, 姚亮, 徐秉坤. SBR 工艺硝化脱氮过程研究[J]. 安徽工业大学学报, 2006, **23**(2): 155-159.
- Guo L N, Yao L, Xu B K. Study on the nitrification process of SBR[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2006, **23**(2): 155-159.
- [15] 王春英. 碱度、氨氮负荷和 COD 对独立硝化的影响[J]. 四川环境, 2009, **28**(4): 16-19.
- Wang C Y. Effect of basicity, ammonia-N and COD on independent nitrification[J]. Sichuan Environment, 2009, **28**(4): 16-19.
- [16] Pollice A, Laera G, Saturno D, *et al.* Effects of sludge retention time on the performance of a membrane bioreactor treating municipal sewage[J]. Journal of Membrane Science, 2008, **317**(1-2): 65-70.
- [17] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 2007, **41**(1): 1022-1030.
- [18] Yang S F, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions[J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(1): 91-96.
- [19] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges[J]. Journal of Biotechnology, 2002, **95**(3): 249-256.
- [20] Liu H, Fang H H P. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on flocculation, settling, and dewatering of activated sludge[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2003, **33**(3): 237-273.
- [21] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. Water Research, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [22] Morgan J W, Forster C F, Evison L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges[J]. Water Research, 1990, **24**(6): 743-750.
- [23] Wingender J, Neu T R, Flemming H C. Microbial extracellular polymeric substances[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1999.
- [24] Sutherland I W. Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework[J]. Microbiology, 2001, **147**(1): 3-9.
- [25] Zhang X Q, Bishop P L, Kupferle M J. Measurement of polysaccharides and proteins in biofilm extracellular polymers[J]. Water Science and Technology, 2015, **37**(4-5): 345-348.
- [26] 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.
- [27] 周健, 龙腾锐, 苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(4): 613-618.
- Zhou J, Long T R, Miao L L. Effect of extracellular polymeric substances (EPS) on sedimentation of activated sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, **24**(4): 613-618.
- [28] Forster C F. Factors involved in the settlement of activated sludge—I: nutrients and surface polymers[J]. Water Research, 1985, **19**(10): 1259-1264.
- [29] 刘珮, 袁林江, 陈希, 等. 低负荷氧化沟系统中 EPS 与活性污泥沉降性能的关系[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1611-1615.
- Liu P, Yuan L J, Chen X, *et al.* Relationship between EPS and activated sludge sedimentation performance in the low-load oxidation ditch system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1611-1615.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)