

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响

成朔¹, 李冬^{1*}, 张杰^{1,2}, 李帅², 曹瑞华¹, 吕赛赛¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 常温(25 ± 1)℃下, 向中置(R1)、底部曝气(R2)的 AUSB 反应器中接种絮状厌氧氨氧化(ANAMMOX)污泥, 研究 AUSB 不同曝气位置对连续流 CANON 颗粒污泥工艺启动及运行的影响. 结果表明, R1、R2 分别于第 43 d、56 d 成功启动 CANON 颗粒污泥, 平均粒径分别为 214.79 μm、205.27 μm, 特征值(ΔNO₃⁻-N/ΔTN)为 0.128、0.129. 低氨氮(90 mg·L⁻¹)下, 逐步增大氮负荷(NLR), AUSB 中置曝气更利于 CANON 颗粒粒径的持续增长及脱氮负荷(NRR)的提高, R1 于第 88 d 颗粒平均粒径即增至 507.46 μm, NRR 达 0.277 kg·(m³·d)⁻¹; R2 污泥颗粒历时 108 d, 粒径增长至 467.72 μm, NRR 仅为 R1 的 87.73%. 底部曝气 AUSB 全程好氧模式下长期运行, 亚硝酸盐氧化菌(NOB)显著增殖, 第 125 d 后特征值增至 0.136 ± 0.004, NRR 仅(0.231 ± 0.015) kg·(m³·d)⁻¹; 而中置曝气 AUSB 特定的缺氧/好氧模式有效抑制了 NOB 活性, 特征值维持在 0.127 ± 0.003, NRR 为(0.262 ± 0.019) kg·(m³·d)⁻¹. AUSB 中置曝气可促进絮状 ANAMMOX 污泥演变至 CANON 颗粒污泥, 且系统脱氮性能及运行稳定性均优于底部曝气 AUSB.

关键词: AUSB; 颗粒污泥; 中置曝气; 底部曝气; 运行稳定性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1286-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708209

Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor

CHENG Shuo¹, LI Dong^{1*}, ZHANG Jie^{1,2}, LI Shuai², CAO Rui-hua¹, LÜ Sai-sai¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The impact of different aeration positions on startup and operation of the continuous flow CANON granular sludge process was considered by inoculating flocculent ANAMMOX activated sludge at room temperature (25 ± 1)℃ in two sets of AUSB reactors. The aeration unit of R1 was installed 0.3 m above the base, while the aeration unit of R2 was set at the bottom. R1 and R2 successfully developed the granule CANON process on the 43rd d and 56th d, respectively. The mean particle diameter of R1 granular sludge increased to 214.79 μm, and the eigenvalue (ΔNO₃⁻-N/ΔTN) was maintained at 0.128; whereas, the granular sludge size of R2 rose to 205.27 μm with an eigenvalue maintained at 0.129. The nitrogen loading rate (NLR) was gradually increased in the low ammonia-nitrogen (90 mg·L⁻¹) wastewater within R1 and R2. This was more beneficial in R1, resulting in the persistent growth of CANON granular sludge and the enhancement of the systematic nitrogen removal rate (NRR). The average particle diameter of R1 rose to 507.46 μm in 88 d, while NRR reached up to 0.277 kg·(m³·d)⁻¹. R2 granule sludge particle size was 467.72 μm after 108 d of cultivation, and achieved a 0.243 kg·(m³·d)⁻¹ NRR, which was 87.73% of that in R1. During the course of steady operation, the specific anoxic/aerobic mode of R1 effectively suppressed NOB microbial activity, the eigenvalue remained around 0.127 ± 0.003, and the NRR of R1 was maintained at about (0.262 ± 0.019) kg·(m³·d)⁻¹. However, NOB was propagated observably in the continuously aerobic R2, whose eigenvalue rose to 0.136 ± 0.004, while NRR was merely (0.231 ± 0.015) kg·(m³·d)⁻¹ after 125 d of long-term operation. During the whole experiment period, the intermediate-setting aerated AUSB accelerated the formation of CANON granular sludge evolving from flocculent ANAMMOX sludge, and better nitrogen removal performance and operational stability were achieved.

Key words: AUSB; granular sludge; intermediate-setting aeration; bottom-setting aeration; operational stability

全程自养脱氮(CANON)颗粒污泥, 其结构致密、沉降性能优良, 可将具有不同生长动力学属性的亚硝化及厌氧氨氧化(ANAMMOX)功能微生物有效持留于单级反应器中, 相较于絮状污泥, 可达到更高的脱氮负荷, 成为 CANON 工艺发展的主流形式^[1-3].

目前, 连续流 CANON 颗粒污泥的培养多以亚

收稿日期: 2017-08-24; 修订日期: 2017-09-01

基金项目: 北京市市委组织部青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

作者简介: 成朔(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理技术、水环境恢复理论及关键技术, E-mail: xxctcs@qq.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

硝化或 ANAMMOX 颗粒污泥为种泥, 于全程好氧模式下实现自养脱氮功能的演替^[2-4], 鲜有文献报道以絮状污泥启动连续流 CANON 颗粒污泥工艺. 有研究表明, 微生物于特定环境条件下分泌、合成的结构性物质——胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 在絮体污泥颗粒化进程中发挥着重要作用^[5-7]; 缺氧/好氧运行模式可优化全程自养脱氮过程的启动, 促进 EPS 的分泌, 加速污泥颗粒化, 并抑制 NOB 的增殖, 提高运行稳定性^[7-10]. 基于此, 为于单级连续流 CANON 反应器中实现空间上缺氧/好氧的不同分区, 提出 AUSB 中置曝气.

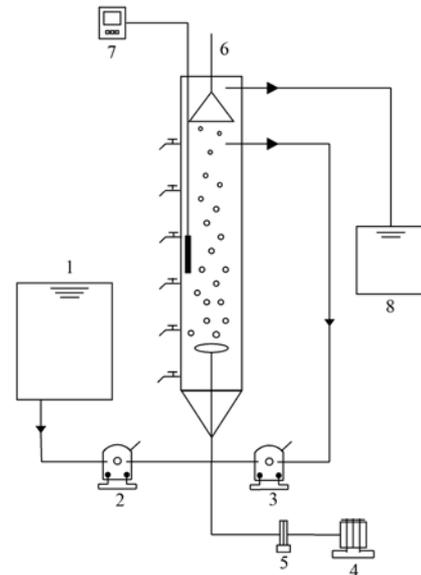
本试验接种 ANAMMOX 絮状污泥, 通过中置曝气 AUSB(R1)与底部曝气 AUSB(R2)的对比, 明确了连续流缺氧/好氧与全程好氧两种运行模式, 对以絮状 ANAMMOX 污泥启动 CANON 颗粒污泥的影响, 并在后续阶段分析了不同模式下该工艺的长期运行稳定性, 以期为连续流 CANON 颗粒污泥工艺的优化提供技术支撑, 对污水处理厂由传统硝化-反硝化转为自养脱氮的升级改造具有工程指导意义^[11].

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用两组相同规格的 AUSB 反应器, 如图 1 所示, 由有机玻璃制成, 高 1.55 m, 内径 100 mm, 有效容积 12.0 L, 总容积 20.0 L. 反应器顶部设倒置漏斗状三相分离器, 用以分离液体、污泥和试验过程中产生的气体; 外部设有恒温水浴层, 保持反应区温度(25 ± 1) °C; 底部放置砾石层, 以使回流布水均匀.

曝气装置使用曝气盘, 其中, R1 曝气盘置于距



1. 进水箱; 2. 进水泵; 3. 回流泵; 4. 气泵; 5. 气体流量计; 6. 三相分离器; 7. 溶解氧 (DO) & pH 测定仪; 8. 出水箱

图 1 中置曝气 AUSB 示意

Fig. 1 Schematic of intermediate-setting aerated AUSB reactor

反应器底部 0.3 m 处; R2 曝气盘置于反应器底部, 由气泵与气体流量计控制曝气强度.

1.2 接种污泥与试验水质

接种污泥取自实验室运行稳定的 ANAMMOX 絮状污泥, 初始污泥 MLSS = 4.56 g·L⁻¹、MLVSS = 3.24 g·L⁻¹, 污泥平均粒径为 87.72 μm, 试验期间不进行主动排泥. 进水采用人工配水, 以 (NH₄)₂SO₄ 和 NaHCO₃ 提供 NH₄⁺-N 和碱度, 并以 NaHCO₃ 调节进水 pH = 8.0 ± 0.2. 营养液 I、II 提供微量元素^[4], 均以 1 mL·L⁻¹ 为单位投加. 本试验共进行 145 d, 根据进水水质及运行参数的不同, 划分为 4 个阶段, 其中, S1 ~ S3 为污泥颗粒化阶段, S4 为稳定运行阶段, 见表 1.

表 1 试验期间主要水质指标及运行参数

Table 1 Major wastewater quality and operational parameters during the experiment

运行阶段	时间/d		NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	HRT /h	NLR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	DO 分布/mg·L ⁻¹		
	R1	R2				R1 缺氧区 ¹⁾	R1 好氧区 ¹⁾	R2
S1	1 ~ 43	1 ~ 57	150	18	0.20	0.06 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.15 ± 0.05
S2	44 ~ 55	58 ~ 70	90	11	0.20	0.05 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.18 ± 0.02
	56 ~ 73	71 ~ 93	90	8	0.28	0.07 ± 0.01	0.24 ± 0.04	0.22 ± 0.03
S3	74 ~ 88	94 ~ 110	90	6	0.37	0.08 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.26 ± 0.04
	89 ~ 98	111 ~ 118	90	4	0.56	0.13 ± 0.03	0.35 ± 0.02	0.33 ± 0.03
S4	99 ~ 145	119 ~ 145	90	6	0.37	0.07 ± 0.02	0.28 ± 0.04	0.26 ± 0.03

1) R1 缺氧、好氧区分别为曝气盘下方、上方区域

1.3 分析项目与方法

DO、pH、温度均采用 pH/Oxi-340i 型 WTW 便携式测定仪测定; MLSS、MLVSS 采用标准重量法

测定; 颗粒粒径的测定使用 Mastersize-2000 型激光粒度分析仪. 水样分析中 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 指标的测定分别采用纳氏试剂光度法、N-(1-萘

基)-乙二胺光度法、紫外分光光度法^[12]。

EPS 中蛋白质(PN)、多糖(PS)含量分别采用考马斯亮蓝法、苯酚-硫酸比色法测定。EPS 的提取方法为:首先取泥水混合样品于 10 mL 离心管中,室温下用离心机以 8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,倒掉上清液,加入适量磷酸盐缓冲溶液,将污泥稀释至原体积,之后将污泥摇散后超声处理 3.5 min,继而 80℃ 水浴 30 min(水浴期间每隔 10 min 将污泥摇匀一次),最后用离心机以 8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取上清液测定 PN、PS 含量(mg·g⁻¹,以 VSS 计),剩余污泥测定 MLVSS。

游离氨(FA)的计算如下:

$$[FA] = \frac{17 \times \rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) \times 10^{\text{pH}}}{14 \times [e^{\frac{6.344}{273+T}} + 10^{\text{pH}}]}$$

式中, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为氨氮浓度, mg·L⁻¹; T 为水温,℃。

2 结果与讨论

2.1 AUSB 不同曝气位置下污泥颗粒化进程

全程自养脱氮功能菌种增殖缓慢^[13],连续流 CANON 反应器须具备优异的污泥滞留能力^[1]。基

于污泥形态变化,以平均粒径 200 μm 界定颗粒污泥的形成^[2],比较中置、底部曝气 AUSB 的污泥持留性能,并系统分析连续流态下污泥颗粒化进程。

S1 阶段,第 1~15 d,为防止曝气的引入对 ANAMMOX 接种污泥产生较大冲击、厌氧氨氧化菌(AnAOB)活性受到显著抑制^[10],初始曝气强度设定为 0.06 L·min⁻¹,DO 被控制在 0.15 mg·L⁻¹ 以下,如图 2。两组 AUSB 污泥浓度略有上升,R1、R2 污泥 MLSS 由 4.56 g·L⁻¹ 分别增至 4.81 g·L⁻¹、4.93 g·L⁻¹,但因氨氮氧化受限于 DO,不足以 AnAOB 提供充足的亚硝酸盐基质^[13],微生物量增加并不明显,MLVSS 仅由 3.24 g·L⁻¹ 分别升至 3.46 g·L⁻¹、3.58 g·L⁻¹。适当提高曝气强度可增强反应器脱氮性能^[14],于是,第 16 d 将曝气强度提升为 0.10 L·min⁻¹,但由于 DO 浓度升高、气体上升流速增大,两组反应器发生了污泥流失。R1 污泥历时 9 d 适应期,至第 27 d,MLSS 降至 2.53 g·L⁻¹,MLVSS/MLSS=0.62,污泥浓度及微生物量均大幅降低,但在污泥流失的选择作用下,沉降性能良好的污泥得以保留^[7,15],平均粒径长至 128.78 μm,如图 3 所示。相较于 R1,R2 污泥适应期较长

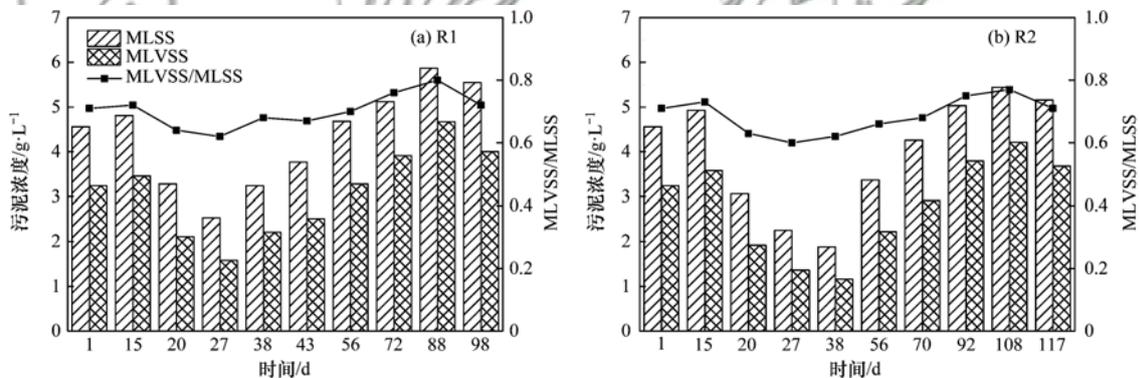


图 2 污泥浓度变化

Fig. 2 Variation of the sludge concentration

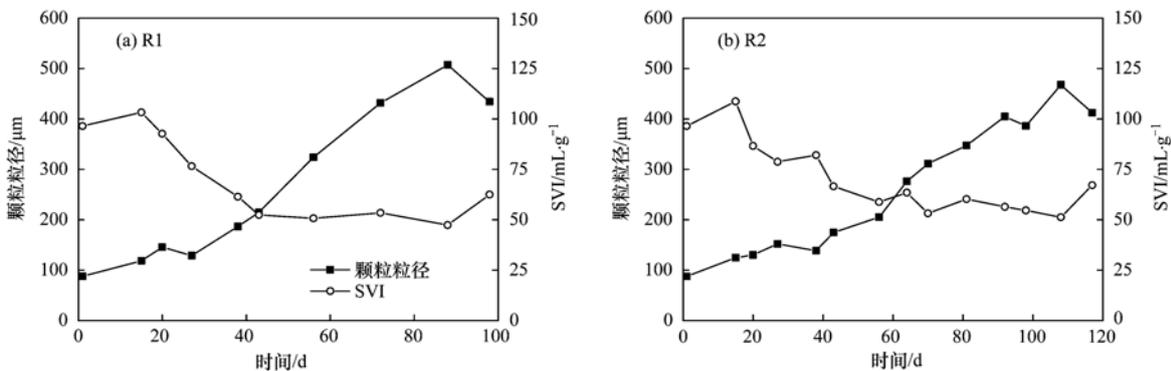


图 3 污泥平均粒径及 SVI 变化

Fig. 3 Variation of sludge mean diameter and SVI

(20 d), 至第 38 d 其 MLSS 降至 $1.88 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥平均粒径增大到 $138.38 \mu\text{m}$. S1 阶段后期, 底部曝气 AUSB 中 MLSS 及 MLVSS/MLSS 提高, 第 56 d 其 MLSS 为 $3.37 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、MLVSS/MLSS = 0.66, 污泥平均粒径增至 $205.27 \mu\text{m}$, 特征值 ($\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{TN}$) 稳定在 0.129, 接近理论比值 0.127^[16], 连续流 CANON 颗粒污泥启动成功. 中置曝气 AUSB 弱化了曝气对接种污泥的冲击, 避免了污泥的大量流失, 缩短了连续流 CANON 颗粒污泥工艺的启动时长, 仅历时 43 d, 污泥浓度即提升至 $3.37 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 颗粒平均粒径达 $214.79 \mu\text{m}$, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{TN} = 0.128$, 启动全程自养脱氮过程的同时实现了污泥颗粒化.

S2 阶段, 保持 NLR 不变, 将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 缩至 11 h, 在水力剪切力、气流剪切力和污泥间相互碰撞的持续共同作用下, 微生物间的自凝聚现象得以强化^[7,15], R1、R2 污泥平均粒径分别于第 56 d、第 70 d 增长至 $323.68 \mu\text{m}$ 、 $311.08 \mu\text{m}$. S3 阶段, NLR 由 $0.28 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提升至 $0.37 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的过程中, 单位时间进入反应器的氨氮基质增多, 促进了污泥中微生物量的提高^[2], 两组 AUSB 污泥浓度及颗粒平均粒径逐步增大. 中置曝气 AUSB, 底部缺氧区为 AnAOB 的增殖营造了适宜的缺氧环境^[13], 好氧区为好氧氨氧化菌 (AOB) 提供 DO 基质, 并利用其“饱食-饥饿”生理特性快速富集历经缺氧饥饿后的 AOB^[17], 因而 R1 污泥微生物量增长更快, 于第 88 d 其 MLVSS/MLSS 即提高至 0.80, 污泥浓度达到了 $5.87 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 粒径增至 $507.46 \mu\text{m}$. 底部曝气 AUSB 污泥历时 108 d, 其平均粒径长至 $467.72 \mu\text{m}$, MLSS = $5.44 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、MLVSS/MLSS = 0.77, 污泥粒径及微生物量增长速度均低于 R1. 然而, NLR 进一步提升至 $0.56 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 后, 因 HRT 过短 (4 h), 两组 AUSB 污泥浓度及颗粒平均粒径出现了不同程度的衰减, R1、R2 污泥分别于第 98 d、第 117 d 颗粒粒径降至 $434.17 \mu\text{m}$ 、 $412.11 \mu\text{m}$, 但 CANON 颗粒污泥并未解体. R1、R2 污泥在颗粒形成后, 沉降性能较接种时大为改观, R1 污泥容积指数 (SVI) 于第 43 d 降至 $52.37 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 并在后续运行中稳定在 $(54.96 \pm 7.58) \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; R2 污泥 SVI 虽在污泥流失期间略有波动, 但于第 56 d 降至 $58.78 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 后保持在 $(59.23 \pm 7.92) \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 两组反应器运行期间均未发生污泥膨胀.

2.2 AUSB 不同曝气位置对系统脱氮性能及运行稳定性的影响

2.2.1 颗粒化阶段系统脱氮性能对比

颗粒尺寸影响功能菌种微生物量及其分布、基质传递效率^[2,18,19], 因此系统整体脱氮性能与 CANON 颗粒粒径有关. 表 2 选取不同 NLR 下出水水质稳定的一天, 分析了污泥平均粒径与系统脱氮性能间的联系. 两组 AUSB 中 CANON 颗粒污泥在 NLR 由 $0.20 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 增至 $0.37 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的过程中, 污泥浓度及平均粒径增大, 反应器自养脱氮性能提高. 好氧颗粒污泥微生物量增多, 可提高污染物去除能力^[7]. 中置曝气 AUSB 缺氧/好氧分区在保证 AnAOB 所需缺氧环境的同时^[13], 利用 AOB“饱食-饥饿”的生理属性^[17], 促进了 CANON 颗粒污泥自身所聚集微生物的增殖, 实现了微生物量的高速增长, 第 88 d, MLVSS 即达到了 $4.67 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 脱氮负荷 (NRR) 达 $0.277 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 而底部曝气 AUSB 历时 108 d 培养, MLVSS 方提高至 $4.21 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 微生物量增速较低, NRR 为 $0.243 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 仅达同期中置曝气 AUSB 的 87.73%. 对比以往研究, 中置曝气 AUSB 氮去除性能亦优于 Zhang 等在底部曝气 AUSB 中添加微量 NO_2 强化自养脱氮后所达到的 $0.234 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的脱氮负荷^[20]. 但当 NLR 进一步提升至 $0.56 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 后, 因 CANON 颗粒污泥与污水的有效接触时间过短^[2], 微生物对基质摄入不足发生内源代谢^[7], 两组 AUSB 脱氮性能恶化, 颗粒污泥平均粒径及 MLVSS 降低.

2.2.2 稳定运行阶段系统脱氮性能及运行稳定性分析

S4 阶段, R1、R2 分别于第 106 d、125 d 后实现了自养脱氮的稳定运行, 如图 4, NRR 分别为 $(0.262 \pm 0.019) \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $(0.231 \pm 0.015) \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 横向对比本试验, 纵向比较以往研究^[4,8,20], 如表 3, 中置曝气 AUSB 脱氮性能更优. CANON 工艺基于对 NOB 活性的有效抑制, 由 AOB 与 AnAOB 共同完成全程自养脱氮过程^[3], 因此, 抑制 NOB 活性是实现该工艺高效稳定运行的关键^[1]. 根据 CANON 工艺反应式^[3], 通过特征值与理论值 0.127 的比较, 衡量自养脱氮运行稳定性, 小于 0.127, 或是因内源反硝化所致; 大于 0.127 则说明 NOB 活性较强, 且差值越大, 其活性越高^[16]. 稳定运行期间, R1 特征值为 0.127 ± 0.003 , 与理论值相持平, NOB 得到了有效控制; 而 R2 特

表 2 不同 NLR 下 CANON 颗粒污泥粒径与系统脱氮性能

NLR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	中置曝气 AUSB				底部曝气 AUSB			
	时间 /d	粒径 /μm	MLVSS /g·L ⁻¹	NRR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	时间 /d	粒径 /μm	MLVSS /g·L ⁻¹	NRR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
0.20	56	323.68	3.28	0.149	70	311.08	2.91	0.135
0.28	72	431.92	3.91	0.214	92	404.91	3.79	0.205
0.37	88	507.46	4.67	0.277	108	467.72	4.21	0.243
0.56	98	434.17	4.00	0.143	117	412.11	3.72	0.101

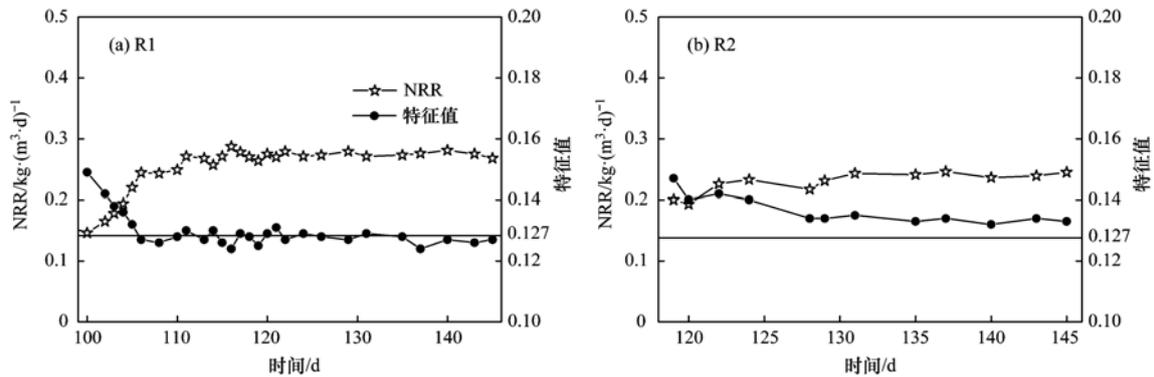


图 4 稳定运行阶段 NRR 及特征值

Fig. 4 NRR and eigenvalue during the steady running period

表 3 不同单级反应器中 CANON 颗粒污泥工艺脱氮性能对比

反应器	运行模式	污泥形式	温度/℃	进水氨氮 /mg·L ⁻¹	NLR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	NRR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	文献
UMABR ¹⁾	连续	颗粒污泥	25	70	0.105	0.085	[4]
SBR	间歇	颗粒污泥	20~25	80	0.256	0.216	[8]
AUSB	连续	颗粒污泥	30	100~120	0.371	0.234	[20]
AUSB(R1)	连续	颗粒污泥	25±1	90	0.37	0.262±0.019	本研究
AUSB(R2)	连续	颗粒污泥	25±1	90	0.37	0.231±0.015	本研究

1) UMABR: upflow membrane-aerated biofilm reactor

征值为 0.136 ± 0.004 , 高于理论值 0.127, 污泥中 NOB 增殖, 与 AnAOB 竞争亚硝酸盐基质^[13], 致使其脱氮负荷较低。

为实现全程自养脱氮的高效稳定运行, 可控制温度、出水剩余游离氨 (FA)、低溶解氧等方式保证亚硝酸盐基质的长效供给^[13]. 但本试验考虑到工程实际应用性, 于常温 (25 ± 1)℃ 下进行, 无法达到保持 AOB 优势地位的最适温度 ($35 \sim 45$)℃^[21]. 如表 4, 稳定运行阶段 R1、R2 出水剩余 FA 均低于 NOB 受抑制的最小浓度阈值 ($0.1 \sim 4.0$ mg·L⁻¹)^[22,23], 不足以构成对 NOB 的有效抑制. 溶解氧作为 AOB 与 NOB 的反应基质, 以往研究认为 AOB 对溶解氧更具亲和性, 更易适应低 DO 环境^[13]. 但有研究发现, 长污泥龄的全程好氧 CANON 颗粒污泥系统长期运行, 充当 K-对策 (比

生长速率较低, 但底物亲和性较高) 的 Nitrospira-like NOB 得以增殖, NOB 丰度显著提高^[24,25]. 而本试验为避免微生物量不足, 未进行主动排泥, 底部曝气 AUSB 或因 Nitrospira-like NOB 活性增强^[25], 致使特征值增至 0.136 ± 0.004 , 且 NRR 由 (0.249 ± 0.006) kg·(m³·d)⁻¹ 降至 (0.231 ± 0.015) kg·(m³·d)⁻¹, 自养脱氮性能及稳定性均变差. 底部曝气 AUSB 中, 全程好氧模式下长期运行的连续流 CANON 颗粒污泥系统存在微生物量的保有与自养脱氮的稳定运行之间的矛盾。

中置曝气 AUSB 于空间上在单级连续流 CANON 反应器中创造的缺氧/好氧不同分区, 分别为 AOB、AnAOB 增殖及脱氮功能的发挥创造了适宜微环境; 底部缺氧区增强了 AnAOB 在同 NOB 对亚硝酸盐基质持续竞争中的优势^[26]; 交替缺

氧/好氧强化了系统内 DO 的波动,从而有效抑制了 NOB 活性^[27,28],在保有微生物量的同时,实现了连续流 CANON 颗粒污泥系统长期高效稳定地自养脱氮。

表 4 稳定运行阶段出水剩余游离氨(FA)浓度

Table 4 Concentration of effluent residual FA during the steady operation period

中置曝气 AUSB				底部曝气 AUSB			
时间/d	出水氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	时间/d	出水氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
112	17.49	7.26	0.18	124	20.88	7.21	0.19
118	10.72	7.02	0.06	129	21.72	7.17	0.18
125	12.70	7.13	0.10	135	12.70	7.02	0.08
131	12.70	7.15	0.10	137	15.52	7.06	0.10
140	10.44	7.13	0.08	143	15.52	7.03	0.09
145	10.44	7.07	0.07	145	21.16	7.07	0.14

2.3 AUSB 不同曝气位置对 EPS 分泌的影响

EPS 对颗粒污泥的形成、结构的维持及功能的演变具有重要作用,其组分变化可用作揭示颗粒污泥形成的内在原因,其中以 PN/PS 表征的污泥表面疏水性是促使颗粒污泥形成的原始动力^[5~7]。如图 5 所示,第 1~15 d, R1 污泥 PN 增加, PS 相对维持稳定,第 15 d 时 PN 增至 $68.36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, PS 为 $36.18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, PN/PS 由 1.42 升至 1.89;第 16 d 后,污泥流失致使 R1 污泥 PN、PS 大幅降低;第 27~43 d,因污泥流失问题的改观,PN、PS 分别由 $43.13 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $21.25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 $63.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $33.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。中置曝气 AUSB 中 CANON 污泥颗粒形成初期,PN 占主导地位,PN/PS 保持在 1.73 ± 0.30 ,污泥表面疏水性增强,微生物细胞间静电斥力减弱^[5,7],相互聚集形成粒径达 $214.79 \mu\text{m}$ 的微小污泥颗粒。历经 S1 阶段的培养, CANON 颗粒

污泥形成后,在 S2~S3 阶段,因中置曝气 AUSB 于反应器内部空间上缺氧/好氧的不同分区,强化了系统中污泥“厌氧饱食-好氧饥饿”的交替状态,刺激微生物分泌 EPS^[7,9],PN 及 PS 快速增长,但 PS 增速高于 PN,PN/PS 下降,至第 88 d,PN/PS 降至 1.58,PN、PS 分别增至 $90.74 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $57.43 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,PS 分泌的增多加强了颗粒表层以架桥作用对微生物的吸附效果^[5~7,9],相较于 R2,中置曝气 AUSB 率先完成了对微生物高效地富集,宏观表现为 CANON 颗粒污泥粒径的持续快速增长。在 PN、PS 两种机制的交替作用下,中置曝气 AUSB 内最终形成粒径为 $507.46 \mu\text{m}$ 的成熟稳定的 CANON 颗粒污泥。底部曝气 AUSB 全程好氧运行模式下 EPS 增速较缓,经 108 d 培养,PN 及 PS 增长至 $80.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $48.67 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,R2 污泥粒径的增长滞后于 R1。

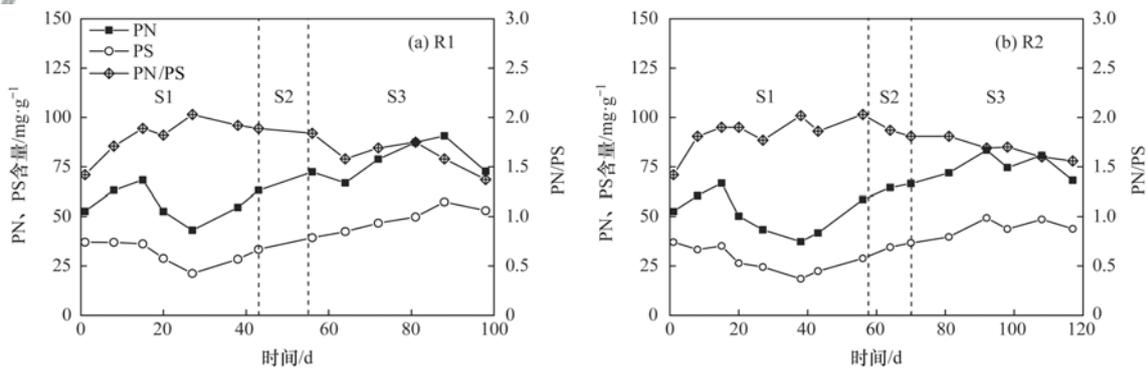


图 5 EPS 组分变化

Fig. 5 Variation of the EPS component

3 结论

(1)中置、底部曝气 AUSB 分别于第 43 d、56 d 成功启动 CANON 颗粒污泥工艺,颗粒平均粒径达 $214.79 \mu\text{m}$ 、 $205.27 \mu\text{m}$,中置曝气 AUSB 其特定的

连续流缺氧/好氧运行模式可更快地完成由絮状 ANAMMOX 接种污泥至 CANON 颗粒污泥形态及功能的演变。

(2)中置曝气 AUSB 可强化污泥“厌氧饱食-好氧饥饿”状态的交替,刺激微生物 EPS 的分泌,促

进 CANON 颗粒污泥的持续增长, 第 88 d 污泥平均粒径增至 507.46 μm , MLVSS 提高至 4.67 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在高效富集功能菌的基础上实现了 0.277 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的脱氮负荷, 而底部曝气 AUSB 中 EPS 及污泥粒径增长缓慢, 微生物量不及中置曝气 AUSB, 经 108 d 培养 NRR 仅达 0.243 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

(3) 中置曝气 AUSB 缺氧/好氧的不同分区, 构成了对 NOB 的长效抑制, 第 106 d 后特征值保持在 0.127 ± 0.003 , 实现了长期稳定的自养脱氮, NRR 达 $(0.262 \pm 0.019) \text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 高于底部曝气 AUSB 所取得的 $(0.231 \pm 0.015) \text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的脱氮负荷, 全程好氧模式下 CANON 颗粒污泥自养脱氮稳定性较差, 底部曝气 AUSB 中 NOB 增殖, 第 125 d 后特征值升至 0.136 ± 0.004 .

参考文献:

- [1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [2] Wang L, Zheng P, Chen T T, *et al.* Performance of autotrophic nitrogen removal in the granular sludge bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 78-85.
- [3] Qian F Y, Wang J F, Shen Y L, *et al.* Achieving high performance completely autotrophic nitrogen removal in a continuous granular sludge reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, **118**: 97-104.
- [4] Li X J, Sun S, Badgley B D, *et al.* Nitrogen removal by granular nitrification-anammox in an upflow membrane-aerated biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2016, **94**: 23-31.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 吴昌永, 王然登, 彭永臻. 污水处理颗粒污泥技术原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 135-145.
Wu C Y, Wang R D, Peng Y Z. Granular sludge technology of wastewater treatment: principles and applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. 135-145.
- [8] 李冬, 李晓莹, 杨杰, 等. SBR 中不同曝气方式下 CANON 工艺的启动与运行 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, **49**(9): 109-116.
Li D, Li X Y, Yang J, *et al.* Start-up and long term operation of CANON in sequencing batch reactor with different aeration patterns [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, **49**(9): 109-116.
- [9] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(7): 1237-1243.
Wu C Y, Zhou Y X. Effect of anaerobic/aerobic alternative operating strategy on the formation of granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(7): 1237-1243.
- [10] Joss A, Derlon N, Cyprien C, *et al.* Combined nitrification-anammox: advances in understanding process stability [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(22): 9735-9742.
- [11] Jin L Y, Zhang G M, Tian H F. Current state of sewage treatment in China [J]. *Water Research*, 2014, **66**: 85-98.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [14] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3429-3434.
Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of granular CANON process and the strategy for enhancing total nitrogen removal rate [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3429-3434.
- [15] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 919-934.
- [16] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Performance stability of CANON reactor and temperature impact [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- [17] 高春娣, 王惟肖, 李浩, 等. SBR 法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 403-409.
Gao C D, Wang W X, Li H, *et al.* Optimization of efficiency on partial nitrification under the mode of alternating anoxic/oxic in sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 403-409.
- [18] Wang L, Zheng P, Xing Y J, *et al.* Effect of particle size on the performance of autotrophic nitrogen removal in the granular sludge bed reactor and microbiological mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **157**: 240-246.
- [19] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitrification and anammox [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 900-909.
- [20] Zhang D J, Cai Q, Cong L Y. Enhancing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite by trace NO_2 addition to an AUSB reactor [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, **85**(2): 204-208.
- [21] Van Hulle S W, Volcke E I, Teruel J L, *et al.* Influence of temperature and pH on the kinetics of the Sharon nitrification process [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, **82**(5): 471-480.
- [22] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying granular systems: a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **74**(2): 178-186.

- [23] Maaikje V P, Hoekstra M, Geleijnse M A A, *et al.* Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 518-530.
- [24] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. 颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 672-678.
Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of combined floc-granule CANON process and the effects of SRT on reactor performance[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 672-678.
- [25] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [26] Ma B, Bao P, Wei Y, *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 13048.
- [27] Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process[J]. *Water Research*, 2014, **55**: 95-105.
- [28] Peng D C, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Effects of oxygen supply methods on the performance of a sequencing batch reactor for high ammonium nitrification [J]. *Water Environment Research*, 2000, **72**(2): 195-200.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。



CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)