

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

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

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响

王文啸¹, 卞伟¹, 王盟², 阚睿哲¹, 赵青¹, 梁东博¹, 李军^{1*}

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 基于4个不同进水条件的小试实验探究, 得出所接种好氧颗粒污泥表面异养菌在曝气初期阶段大量消耗碳源, 对于 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的反硝化效率较低。为此, 实验在常温(20~23℃)条件下, 在同一周期内先采用低曝气量曝气之后再采用高曝气量曝气的两段式曝气方式运行好氧颗粒污泥SBR反应器, 低曝气量时长分别取1、2、3 h这3个阶段分别运行, 并运用扫描电镜(SEM)和荧光原位杂交技术(FISH)对颗粒污泥进行分析, 结果表明AGS粒径增大, 反硝化能力提升, NO_2^- -N的反硝化速率(以LVSS计)在低曝气时长为2 h时升至最高, 达 $9.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。亚硝态氮积累率不断升高至77.84%, 总氮去除率最高达70%。颗粒污泥内部孔隙增多, 且细菌多以球菌、椭圆状及杆菌为主, 氨氧化菌(AOB)占总菌的比例由13.70%升至15.40%。因此, 通过两段式曝气过程实现了短程同步硝化反硝化过程并具有一定的脱氮性能。

关键词: 两段式曝气; 好氧颗粒污泥; 短程同步硝化反硝化; 亚氮积累率; 反硝化速率

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4332-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201703207

Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge

WANG Wen-xiao¹, BIAN Wei¹, WANG Meng², KAN Rui-zhe¹, ZHAO Qing¹, LIANG Dong-bo¹, LI Jun^{1*}

(1. College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Four mini experiments were conducted at different conditions. The heterotrophic microorganisms on the aerobic granular sludge surface consumed organic compounds at the initial stage of aeration. The denitrification rate and the efficiency of NO_2^- -N and NO_3^- -N removal were relatively low. Therefore, under the normal temperature conditions (20–23℃), aerobic granular sludge sequencing batch reactor (SBR) was operated in the two-stage aeration mode (first in low aeration then in high aeration mode). The low aeration time were carried out at 1, 2 and 3 hours stages respectively, and the characteristics of the granular sludge and its effects on microorganisms were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and fluorescence in situ hybridization (FISH) technique. The results show that the increase in the aerobic granular sludge (AGS) particle size improved the denitrification capacity; the denitrification rate of NO_2^- -N was the highest at low aeration mode with 2 h and reached $9.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. The accumulation rate of nitrite increased to 77.84% and the total nitrogen removal rate to 70%. The bacterial count inside the granular sludge increased and they were mainly cocci, bacillus, and ellipsoidal bacteria. Moreover, the proportion of ammonia-oxidizing bacteria in total bacterial count increased from 13.70% to 15.40%. Therefore, the two-stage aeration process achieved shortened simultaneous nitrification and denitrification processes and showed a good denitrification performance.

Key words: two-stage aeration; aerobic granular sludge; shortcut simultaneous nitrification and denitrification; nitrite accumulation rate; denitrification rate

好氧颗粒污泥(AGS)以其良好的沉降性能、结构特点及脱氮除磷性能等优势, 近年来成为了最具有应用前景的废水处理技术之一。许多学者开展了对于好氧颗粒污泥反应器中高浓度废水和生活污水处理的研究^[1, 2], 其中提高AGS在好氧条件下总氮(total nitrogen, TN)去除能力和稳定运行能力, 是现阶段研究亟待解决的问题之一。

AGS可以在好氧条件下发生同步硝化反硝化过程(simultaneous nitrification and denitrification, SND), 对总氮具有去除效果^[3~5]。同时AGS需要通过较高的曝气量获得一定的水力剪切力来维持自身的稳定^[6, 7], 但DO较高时会抑制反硝化效果, 过

低又会导致水力剪切力不足, 丝状菌快速滋生等问题^[8], 导致颗粒污泥解体。王盟等^[9]的研究表明, 通过高低曝气量转换的两段式曝气方式可以较好提供不同曝气量条件下微生物生存的良好环境, 提升反应器运行稳定性。因此本实验通过两段式曝气的方式探究在同一SBR反应器中既能实现较高的脱氮效果, 又能实现颗粒污泥稳定运行的工况参数,

收稿日期: 2017-03-23; 修订日期: 2017-05-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202-013)

作者简介: 王文啸(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为好氧颗粒污泥脱氮性能强化及稳定运行, E-mail: 464078588@qq.com

* 通信作者, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

以期 AGS 脱氮工艺提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验是为了探究接种的成熟颗粒污泥对 COD 的降解途径及其降解量, 从而分析 AGS 利用碳源的途径及反硝化情况。小试实验装置如图 1 所示, 血清瓶容积为 0.5 L, 进气口可接通空气或氮气进行曝气, 出气口处带有液封设置防止空气流入。通过小试装置即可控制好氧和缺氧条件进行实验探究。

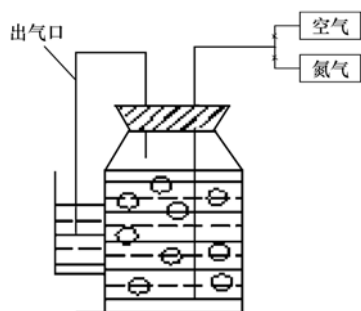


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Mini experimental device

好氧颗粒污泥 SBR 实验装置如图 2 所示, SBR 反应器整体为有机玻璃制成, 有效容积 21 L, 直径为 23.5 cm, 高度为 50 cm。反应器底部装有曝气盘, 采用鼓风曝气装置连接转子流量计进行曝气。反应器外壁设有排水口, 排水比为 60%, 即排出水的体积占原水总体积的 60%。反应器还装有 pH 和 DO 在线监测设备。

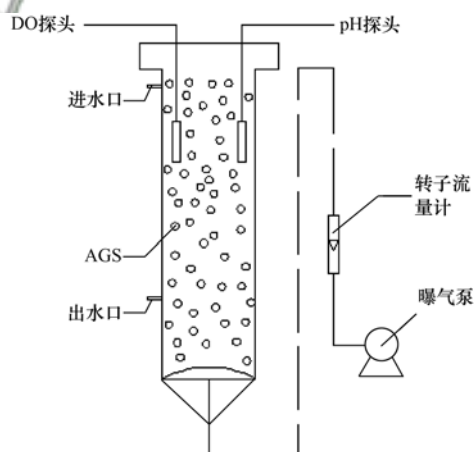


图 2 好氧颗粒污泥 SBR 反应器装置示意

Fig. 2 Aerobic granular sludge SBR reactor experimental device

1.2 接种污泥与实验用水

本实验接种成熟的好氧颗粒污泥, 污泥浓度 (MLSS) 为 $5200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, $\text{MLVSS}/\text{MLSS} = 0.7$

左右。进水模拟较高浓度的生活污水水质, 水质条件 COD 质量浓度为 $280 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷为 $6 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $90 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 $100 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 $180 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 投加 16 g 左右 NaHCO_3 用来维持反应器 pH 在 7.4 ~ 8.0 之间并提供足够的碱度。

1.3 实验方法

1.3.1 小试实验方法

AGS 在 SBR 反应器曝气初始阶段主要有吸附作用、反硝化作用、短程反硝化作用及异养呼吸作用对 COD 起到降解作用, 采用 4 个不同的条件对这 4 个过程进行小试实验。分别使用 4 个 0.5 L 的血清瓶, 都加入 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD, MLVSS 为 $3850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右的好氧颗粒污泥, 调节好 pH (8.0 左右), 同时进行如下 4 个方案: ①只曝氮气, 探究吸附作用降解的 COD 量 $M_1 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。②曝氮气, 同时加入 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 探究吸附和反硝化作用共同降解的 COD 量 $M_2 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。③曝氮气并加入 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 探究吸附和短程反硝化作用降解的 COD 量 $M_3 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。④只曝氧气, 基质无 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 探究吸附和异养呼吸作用降解的 COD 量 $M_4 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。间隔 4 min 取一个水样, 检测 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 COD 的含量, 共测 20 min。进水的 COD 含量和 20 min 后出水的 COD 含量差值即为 COD 在反应器运行初始阶段 (20 min) 的降解量 $M (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 即可通过下列计算式得出各个过程消耗的 COD 的量。

$$M_{\text{吸附}} = M_1 \quad (1)$$

$$M_{\text{反硝化}} = M_2 - M_1 \quad (2)$$

$$M_{\text{短程反硝化}} = M_3 - M_1 \quad (3)$$

$$M_{\text{异养呼吸}} = M_4 - M_1 \quad (4)$$

1.3.2 SBR 反应器运行方法

好氧颗粒污泥 SBR 反应器在室温下运行, 周期时间为 12 h, 每天运行 2 个周期, 每个周期包括 2 min 进水, 低曝气量阶段和高曝气量阶段 (两阶段具体曝气时间详见 2.2 节), 45 s 沉淀, 1.5 min 快速排水。低曝气量控制在 $50 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右 (DO 为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 之后的高曝气量阶段需要增加水力剪切力则采用原反应器运行的曝气量 $160 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (DO 为 $7 \sim 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。反应器中高、低曝气阶段 DO 范围的选择依据详见 2.1 节。

1.4 分析项目与方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法检测; $\text{NO}_2^- - \text{N}$

采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法检测; NO_3^- -N 采用麝香草酚分光光度法检测; DO 和 pH 用 WTW 在线测定仪测定; MLSS 采用重量法测定; COD 质量浓度采用 COD 快速测定仪测定.

1.5 检测技术

1.5.1 SEM 方法

取不同时期的好氧颗粒污泥,离心后用 2.5% 的戊二醛在 4℃ 冰箱固定 1.5 h,用磷酸缓冲溶液冲洗 3 次,分别用浓度 50%、70%、80%、90% 乙醇进行脱水,再用 100% 的乙醇脱水 3 次.用 100% 乙醇:乙酸异戊酯 = 1:1 和纯乙酸异戊酯各置换一次,再用 FD-1A-50 型冷冻干燥机对样品进行干燥.用 IB25 (Giko) 型离子溅射镀膜仪在样品表面镀上一层金属膜,最后置于扫描电镜下观察.

1.5.2 平均粒径测量方法

对于粒径较大的颗粒污泥粒径分布及平均粒径测量可采用湿式筛分法^[10]测定:准备筛孔孔径分别

为 6.0、4.0、2.5、2.0、1.5、1.0 和 0.5 mm 的不锈钢筛网.从反应器中取污泥混合液,用 1 × PBS 冲洗 3 遍后待用.将钢筛按孔径大小由上而下垂直放置,在最底层的 0.5 mm 的筛下放一个容器盛放筛出的细小颗粒,筛分结束后将不同粒径范围的颗粒污泥分别收集到不同的容器内,测量各筛网截留颗粒污泥的 MLSS 和 MLVSS,可计算出的平均粒径及粒径分布情况.

1.5.3 荧光原位杂交技术(FISH)

将泥样进行前期相关处理,利用总菌探针 (EUBmix),氨氧化菌特异性探针 (NSO1225) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 特异性探针 (NIT3) 对处理后的泥样进行杂交培养,探针序列如表 1 所示,通过荧光显微镜进行观察,并使用 image pro-plus 软件 (Image-Pro Plus 5.1, Media Cybernetics, USA) 进行图像分析,可得出 AOB 与 NOB 在所有活性细菌中所占的比例^[11~13].

表 1 荧光原位杂交所用的探针及对应杂交条件^[14,15]

Table 1 Probes used for FISH and the corresponding hybridization conditions

探针名称	探针序列(5'-3')	专一性
NSO1225	CGC CAT TGT ATT ACG TGT GA	Ammonia oxidizing beta-proteobacteria
NIT3	CCT GTG CTC CAT GCT CCG	Nitrobacter
EUB338	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	Most bacteria
EUB338 II	GCA GCC ACC CGT AGG TGT	Planctomycetales
EUB338 III	GCT GCC ACC CGT AGG TGT	Verrucomicrobiles

2 结果与讨论

2.1 AGS 降解有机物途径分析及曝气方式的选择

本实验结果如图 3 所示,在 20min 内,方案 4 表现出的 COD 降解量 ($63.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和降解速率 (以 LVSS 计,下同)最大 [$49.29 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$],说明 AGS 中外层的异养微生物有氧呼吸作用对 COD 的降解作用较明显,是反映周期初始阶段降解 COD 的主要过程.由方案 1、2、3 得出,吸附作用在 12 min 左右达到对 COD 的吸附平衡,20 min 内吸附了 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD,吸附量较小仅 $2.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. NO_2^- -N 反硝化速率为 $1.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, NO_3^- -N 反硝化速率为 $0.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,总体的反硝化速率相对较低.

通过 IAWQ1 号模型提出的计算公式:

$$\text{COD}/\text{NO}_3^- \text{-N} = \frac{2.86}{1 - Y_{\text{H}}} \quad (5)$$

式中, Y_{H} 为缺氧微生物产率 (COD 生物体产量/COD 底物),假定值为 0.67^[16].即 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{-N}$

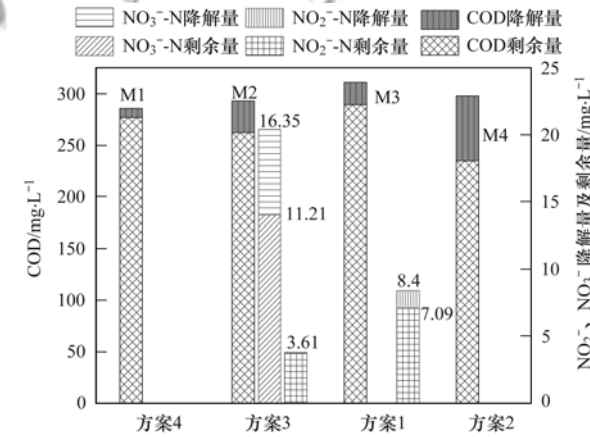
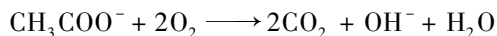
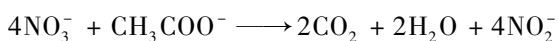


图 3 小试实验底物降解情况

Fig. 3 Schematic diagram of substrate degradation in mini experiments

经过反硝化作用生成 N_2 , 理论上需要消耗 $8.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N 需要消耗 $5.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD^[17].但因微生物降解有机物的效率不相同,反硝化所需要的碳源量也不同,满足完全反硝化的 COD/N 差别很大,范围在 4 ~ 15^[18].

$M_{\text{反硝化}}$ 值(以 COD 计, 下同)为 $21.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 NO_3^- -N 反硝化至 NO_2^- -N 和 N_2 共消耗了 $21.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD. 在不考虑细胞合成的条件下^[19]:



通过上述两个方程式和图 3 方案 2 中 NO_3^- -N 降解量和 NO_2^- -N 剩余量可以计算出, 反硝化过程中消耗的 $5.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NO_3^- -N 中, 仅有 $1.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 完全反硝化, 其余全部进行不完全反硝化生成 $3.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N, 完全反硝化率仅为 29.80%. 计算可知 NO_3^- -N 转化为 NO_2^- -N 消耗了 $4.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, NO_3^- -N 完全反硝化的 COD/N 为 11.56. $M_{\text{短程反硝化}} = 12.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即反硝化 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N 需要消耗 $12.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD, NO_2^- -N 完全反硝化的 COD/N 为 9.73, 反硝化的效率整体较低.

在本实验室长期运行反应器的过程中, 分别采用过不同 DO 条件运行 SBR 反应器, 运行结果表明 DO 在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, 反应器运行稳定, 当 $\text{DO} < 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 颗粒污泥会因水力剪切力不足出现堆积在反应器底部的现象, 长期运行会导致硝化性能下降, 当 $\text{DO} < 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 运行两周左右会出现颗粒污泥解体, 导致反应器失稳. 即仅降低 DO 浓度运行不是提高 TN 去除率的良好方式. 由阮文权等^[20]采用氮气和空气共同曝气的方式运行好氧颗粒污泥反应器, 分别选取了 1、2、3、4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 这 4 个水平的 DO 浓度进行了实验, 结果表明当 DO 浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 好氧颗粒污泥的脱氮效果最好, 这说明了在水力剪切力相同的条件下, 低 DO 浓度可以提高 TN 去除.

综上所述, 在 SBR 反应器运行周期初始曝气时, COD 被异养微生物大量消耗, 造成了大量碳源和溶解氧浪费, 没有形成良好反硝化环境. 为了减少碳源在初期消耗, 本实验采用两段式曝气的方式运行. 即初始阶段在碳源充足的条件下降低曝气量, 从而减缓异养微生物的呼吸作用, 增加内部反硝化菌可利用的碳源, 提供良好的反硝化环境的同时也要维持颗粒稳定性, 选用 DO 为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 进行曝气, 后期高曝气阶段提供足够的水力剪切力, 维持反应器稳定运行, 提高整体硝化反应速率, 所以 DO 选择为 $7 \sim 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 两段式曝气时长分配对 AGS 的影响

反应器运行采用图 2 装置, 周期时间固定为 12

h. 如图 4 所示, 本实验主要分为 3 个部分, 维持周期时间不变, 第 1 部分低曝气量曝气 1 h, 高曝气量曝气 11 h; 第 2 部分低曝气量曝气 2 h, 高曝气量曝气 10 h; 第 3 部分低曝气量曝气 3 h, 高曝气量曝气 9 h, 当低曝气量提升至 4 h 时, 运行 15 个周期后颗粒污泥出现破碎解体现象, 且总氮去除率下降, 继而停止了反应器的运行.

如图 4 所示, 在整个运行过程中出水氨氮几乎为 0, 氨氮去除率稳定在 96% 以上, 整体硝化速率由原来的 $3.45 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 稍有下降至 $3.16 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 整体还具有良好的硝化性能. 这是由于在反应初期曝气量较小, 且有些颗粒污泥沉积在底部, 不能与溶解氧充分接触, 硝化细菌的活性虽然受到一定程度的抑制, 但是由于 AGS 表层硝化细菌已经培养成熟并具有较强的优势, 在后期高曝气量反应过程中可快速恢复活性, 同时较小的溶解氧抑制了 AGS 表层丝状菌等异养菌的活性, 反硝化作用又消耗了部分 COD, 造成高曝气量阶段 F/M 值较低^[21], 异养菌的有氧呼吸作用受到限制, 进而减少了系统对 DO 的需求, 使得在 DO 较低的条件也能维持较好的硝化性能.

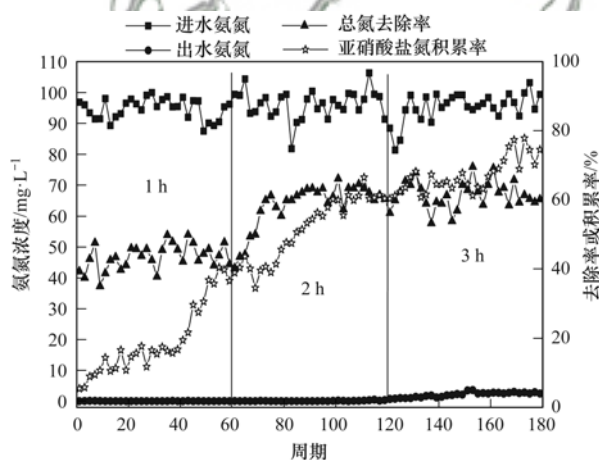


图 4 不同工况下各项参数的变化曲线图

Fig. 4 Change curve of the parameters under different conditions

反应器亚氮积累率不断增加, 由原来的 5.41% 增长至 77.84%, 其原因可以根据双因素限制的 Monod 方程^[22]进行说明:

$$\mu_x = \mu_{x,\max} \left(\frac{S_x}{K_x + S_x} \right) \left(\frac{\rho_{\text{DO}}}{K_{\text{DO}} + \rho_{\text{DO}}} \right) \quad (6)$$

式中, μ_x 为硝化细菌 (AOB 或 NOB) 的比增长速率, d^{-1} ; $\mu_{x,\max}$ 为硝化细菌的最大比增长速率, d^{-1} ; S_x 为 NH_4^+ -N 或 NO_2^- -N 的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_x 为底物的饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_{DO} 为溶解氧饱和常数,

mg/L; ρ_{DO} 为反应器内溶解氧浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

由式(6)可知, 当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度远高于 K_x 时, μ_{AOB} 的大小主要取决于 ρ_{DO} 的浓度, 继而 $\rho_{DO} = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > K_{DO}$ 时, μ_{AOB} 达到最大值^[9]. 而由于 SND 过程的存在, 反应初期 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度非常低, 即 S_x 几乎为零, 且 AOB 菌的氧饱和常数较小 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的氧饱和常数较大 ($1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[23], 当 $\rho_{DO} = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\mu_{AOB} > \mu_{NOB}$. 同时 AGS 本身结构特点会形成氧传质的阻碍, 也会造成 AGS 颗粒表层的亚硝酸盐氮氧化受到抑制, 抑制了 NOB 的活性^[24]. 高曝气阶段随着碳源的减少和溶解氧的增大, 反硝化作用虽然被削弱, 但 NOB 菌的活性在初期受到极大地抑制作用, 所以 AOB 菌在体系中处于优势, 进而出现亚氮积累现象.

TN 去除率由原有的 40% 左右, 在低曝气时长为 3 h 阶段总氮去除率提升至最高为 70% 左右, 主要原因是初始阶段的低曝气量一定程度上抑制了表层异养微生物的呼吸作用, 使更多的碳源可以被内部缺氧区反硝化异养菌利用, 随着外部溶解氧的不断降低, 内部缺氧区域也会随之增加, 从而提升了总氮的去除率^[25, 26].

与此同时也可知低曝气持续时间不宜过长, 当达到 4 h 时, 由于外部剪切力的减小和内部厌氧区的不断扩大, 增加了 AGS 的不稳定因素, 会导致了污泥解体破碎的现象.

2.3 低曝气时长对 AGS 的影响分析

图 5 和图 6 分别是在不同低曝气时长条件下, 反应器运行相对稳定的周期内测得的数据. 图 5 可

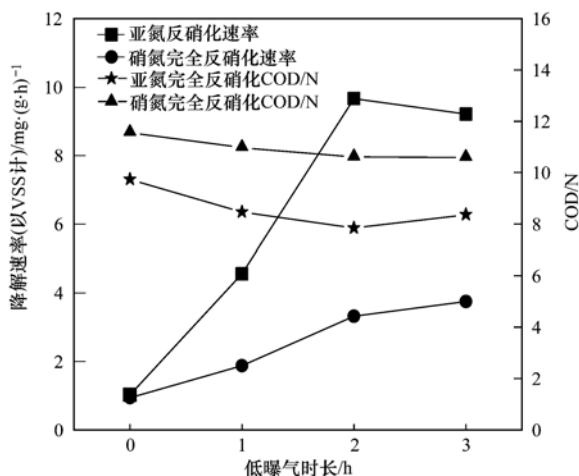


图 5 低曝气时长与相关参数的关系变化曲线

Fig. 5 Curves of the relationship between low aeration time and related parameters

知硝氮和亚氮完全反硝化所需要的 COD 有所减少, 反硝化的效率提高, 即在碳源充足的情况下, 更好地利用碳源进行反硝化脱氮.

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 反硝化到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的速率没有明显变化, 但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 完全反硝化速率由 $0.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提高到了 $3.75 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 这主要是因为两段式曝气的方式快速实现了短程硝化过程 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率的增长速率为 21.9), 使硝化过程主要停留在亚硝态氮阶段, 同时由于曝气量的减少和充足的碳源, 提供了更好的反硝化条件, 不仅促进了硝态氮进行不完全反硝化生成亚硝态氮, 而且更有利于亚硝态氮直接进行反硝化过程, 促成了短程反硝化的实现. 经过反应器的不断运行和低曝气时长增加, 可能短程反硝化菌更占优势, 短程反硝化速率不断提升, 亚硝态氮反硝化速率由原来 $1.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 快速提高到了最高 $9.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 短程反硝化逐渐成为反硝化过程的主体过程. 硝态氮在反硝化时生成的亚硝态氮被快速地反硝化成氮气, 继而增加了硝态氮完全反硝化的速率, 但由于反应器内亚硝态氮积累率不断提高 (由 10% 提高至 80% 左右), 硝态氮质量浓度没有明显增加, 所以硝态氮完全反硝化到亚硝态氮的过程没有得到进一步的提升.

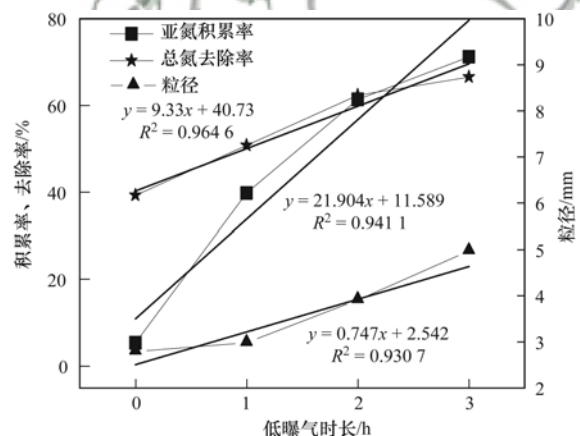


图 6 低曝气时长与亚氮积累率、总氮去除率、平均粒径的关系曲线图

Fig. 6 Low aeration time and nitrite accumulation rate, total nitrogen removal rate, and the average size of the curve

通过图 6 可知在低曝气时长为 0 ~ 3 h 范围内, 时长与亚氮积累率、TN 去除率和平均粒径都有着较好的线性关系, 且亚硝态氮积累率增长速率快.

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 反硝化速率不能进一步提升的原因主要是初始阶段低曝气造成硝化速率降低到 3

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右, 低曝气时长为 3 h 时, 硝化生成的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 已经不能满足亚硝态氮反硝化菌的需求, 导致了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 反硝化速率不能进一步提高, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 反硝化速率由峰值 $9.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 稍有降低到了 $9.21 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 由于反硝化过程以短程反硝化为主, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 反硝化速率决定了 TN 去除率的增长速率, 所以 TN 去除率也不会持续维持线性增加的趋势^[19].

AGS 粒径有线性的增加趋势 (增长速率为 0.75), 除了水力剪切力减小后导致颗粒粒径增大的因素外, 颗粒完整性和强度都有所提升, 这主要是因为反硝化过程得到了强化, 反硝化阶段产生的

碱度会在反应器中形成微小的 CaCO_3 固体, 为颗粒污泥提供了良好的晶核条件, 有利于增强颗粒的完整性^[27].

2.4 污泥性状分析

通过 SEM 电镜观察 (图 7), 以两段式曝气的运行方式运行 180 个周期之后, 原泥 (A1: $\times 100$) 已经变为完整程度更高, 粒径更大的颗粒污泥 (A2: $\times 50$), 且表皮和内层分化明显, 外表层和内层之间的空隙可以为内部厌氧区和外部好氧区提供良好的分界, 有利于内部营养物质的储存和利用. 较好的外部结构也有利于 AGS 抵抗外部剪切力, 维持自身的稳定.

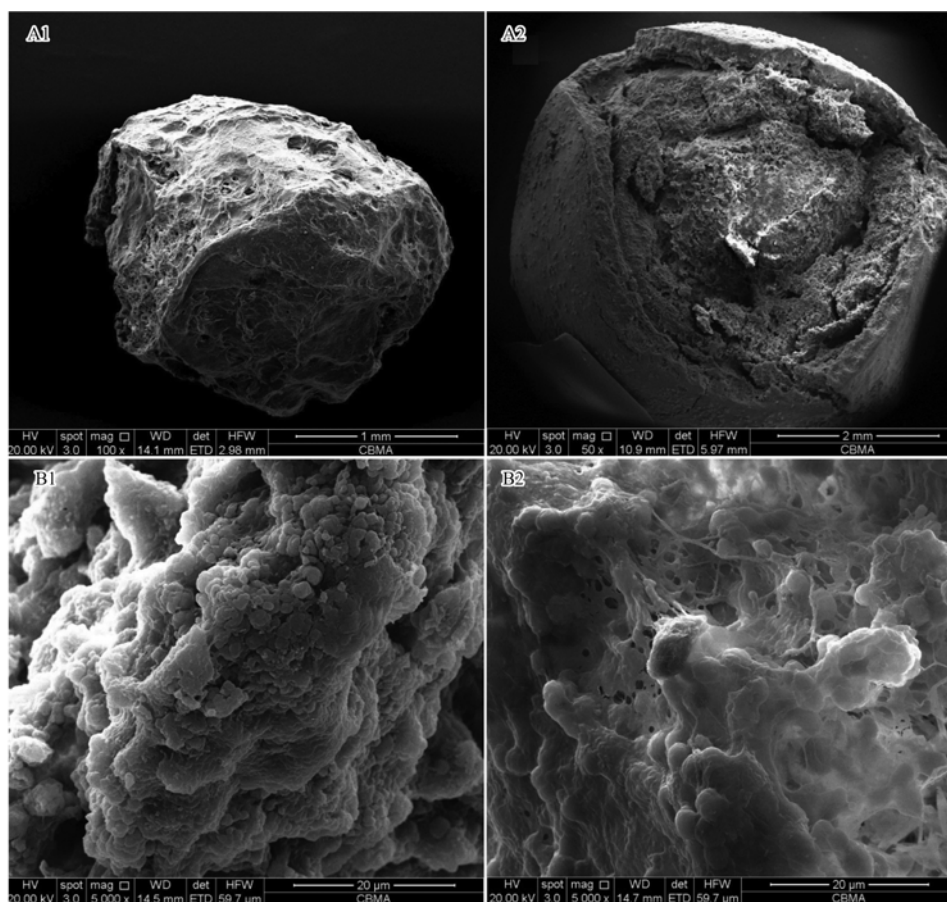


图 7 原泥和经过两段式曝气运行后的颗粒污泥电镜观察

Fig. 7 Electron microscope observations of original sludge and granular sludge after two-stage aeration

由更高倍数的电镜观察其内部结构, 原泥 (B1: $\times 1000$) 内部有许多较大的孔洞, 这些孔洞的形成可能是由于颗粒内部底物基质和营养物质不足造成的细胞自溶现象造成的^[28], 外界的营养物质以及溶解氧可以通过这些孔洞和通道进入到颗粒污泥内部, 为微生物提供所需的底物. 在图 7 B2 ($\times 1000$) 中, 在丝状菌和胞外聚合物 (EPS) 的作用下^[29], 微小的污泥聚集体不断融合, 形成粒径更

大的颗粒污泥, AGS 内部细菌多以球状、椭球菌和杆状为主, 内部结构则变得更为密实, 布满了孔隙, 孔洞变得小而密, 颗粒内部缺氧区的反硝化菌等微生物生存的比表面积有所增加, 提供了更好内部生长空间.

通过 FISH 手段对原泥和经过两段式曝气运行后的污泥泥样进行对比观察 (图 8, 绿色为 EUBmix 探针标记的总菌, 红色为 NSO1225 探针标记的 AOB

菌,紫色为 NIT3 探针标记 NOB 菌),原 AGS 中具有少量的 AOB 以及 NOB 菌, AOB 菌约占细菌总量的 13.7%, NOB 菌则占 1% 左右. 经过两段式曝气运行后, AOB 菌占据优势得到了富集, 约占细菌总量的

15.4%, 而 NOB 菌依然较少, 占总菌的 1% 左右, 验证了亚氮积累率提升的分析结果, 同时 AOB 菌的增多没有带来氨氧化速率的提升, 也说明了 AOB 菌和氨氧化速率没有明显的正比关系^[30].

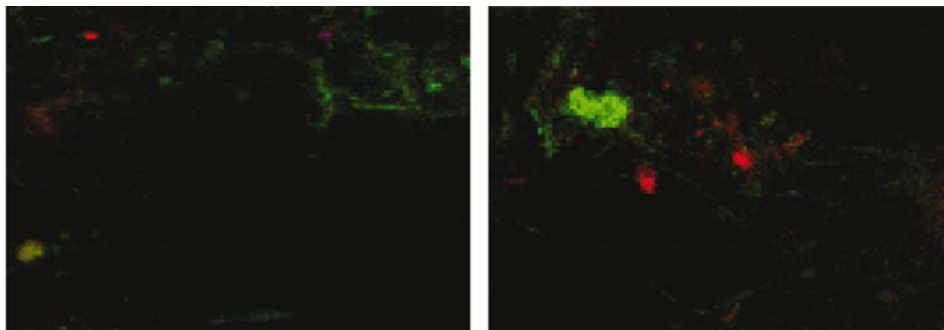


图 8 经过两段式曝气运行前后 AGS 泥样 FISH 照片

Fig. 8 FISH photos of AGS before and after two-stage aeration

3 结论

(1)通过小试实验得出, 接种好氧颗粒污泥表层异养菌在初期降解大量碳源, 碳源没有被反硝化过程良好利用, 在好氧条件下原 AGS 反硝化能力较差.

(2)采用两段式曝气方式运行后, 颗粒粒径增大, 可能为内部缺氧区域增大, 反硝化菌增多导致了反应体系内总氮去除率逐渐上升.

(3)根据 Monod 方程, 由于 $\mu_{\text{AOB}} > \mu_{\text{NOB}}$, AOB 在硝化过程中占据优势, NOB 菌受到抑制, 随着碳源不断减少, 曝气量逐渐增大, NO_2^- -N 的反硝化作用逐渐减弱, 导致了亚氮积累现象, 亚氮积累率由原来的 5.41% 增长至 77.84%. 通过 SEM 和 FISH 手段观察得出颗粒内部孔隙增多, 球状菌有所增多. AOB 菌占总菌的比例由 13.70% 增长到了 15.40%, 验证了 AGS 中 AOB 菌得到了良好的富集.

(4)由于硝化作用主要停留在亚氮阶段, 为短程反硝化提供了良好反应环境, 亚氮反硝化速率由 $1.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 快速提高到了最高 $9.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 反应体系主要以短程同步硝化反硝化过程为主.

参考文献:

[1] Schwarzenbeck N, Erley R, Mc Swain B S, *et al.* Treatment of malting wastewater in a granular sludge sequencing batch reactor (SBR) [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2004, **32** (1): 16-24.
[2] Tay J H, Jiang H L, Tay S T L. High-rate biodegradation of phenol by aerobically grown microbial granules [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130** (12): 1415-1423.

[3] Satoh H, Nakamura Y, Ono H, *et al.* Effect of oxygen concentration on nitrification and denitrification in single activated sludge flocs [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **83** (5): 604-607.
[4] He S B, Xue G, Wang B Z. Factors affecting simultaneous nitrification and de-nitrification (SND) and its kinetics model in membrane bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168** (2-3): 704-710.
[5] 冷璐, 信欣, 鲁航, 等. 同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (11): 4180-4188.
Leng L, Xin X, Lu H, *et al.* Rapid start-up of simultaneous nitrification and denitrification coupled phosphorus removal process and its performing characteristics [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (11): 4180-4188.
[6] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **57** (1-2): 227-233.
[7] 王超, 郑晓英. 剪切应力对好氧颗粒污泥形态结构和微生物活性的影响机制研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29** (8): 2235-2241.
Wang C, Zheng X Y. Effect of shear stress on morphology, structure and microbial activity of aerobic granules [J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (8): 2235-2241.
[8] 王芳, 杨凤林, 张兴文, 等. 好氧颗粒污泥稳定性影响因素分析 [J]. *环境科学与技术*, 2006, **29** (1): 47-49, 81.
Wang F, Yang F L, Zhang X W, *et al.* Influencing factors on stability of aerobic granules in SBAR [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29** (1): 47-49, 81.
[9] 王盟, 卞伟, 侯爱月, 等. 两段式曝气工艺的短程硝化反硝化特性 [J]. *化工学报*, 2016, **67** (4): 1497-1504.
Wang M, Bian W, Hou A Y, *et al.* Characteristics of partial nitrification and denitrification *via* two-stage aeration [J]. *CIESC Journal*, 2016, **67** (4): 1497-1504.
[10] 石宪奎, 王凯军, 倪文. 颗粒污泥粒径的工程测定方法 [J]. *环境污染与防治*, 2006, **28** (2): 140-142.
Shi X K, Wang K J, Ni W. Tap water based sieving method for

- determining size distribution for anaerobic sludge granules of a full scale wastewater treatment plant[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, **28**(2): 140-142.
- [11] 邓黛青, 李光明, 周仰原, 等. FISH 荧光原位杂交技术在污水生物脱氮研究中的应用[J]. *微生物学通报*, 2006, **33**(2): 132-136.
- Deng D Q, Li G M, Zhou Y Y, *et al.* Application of fluorescence in situ hybridization in research on biological removal of nitrogen from wastewater[J]. *Microbiology*, 2006, **33**(2): 132-136.
- [12] 罗思音, 张可方, 张立秋. 荧光原位杂交技术检测污水处理中微生物的生理生态[J]. *水科学与工程学报*, 2009, (2): 27-29.
- Luo S Y, Zhang K F, Zhang L Q. FISH-fluorescence in situ hybridization in sewage treatment [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2009, (2): 27-29.
- [13] 陈瑛, 任南琪, 李永峰, 等. 微生物荧光原位杂交 (FISH) 实验技术[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(4): 546-549, 575.
- Chen Y, Ren N Q, Li Y F, *et al.* Microbiology experiment off fluorescence in situ hybridization (FISH) technique[J]. *Journal of harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(4): 546-549, 575.
- [14] Loy A, Maixner F, Wagner M, *et al.* probe Base-an online resource for rRNA-targeted oligonucleotide probes: new features 2007 [J]. *Nucleic Acids Research*, 2007, **35** (S1): D800-D804.
- [15] 于莉芳, 杜倩倩, 傅学焄, 等. 城市污水中硝化菌群落结构与性能分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- Yu L F, Du Q Q, Fu X T, *et al.* Community structure and activity analysis of the nitrifiers in raw sewage of wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- [16] 蔡碧婧, 谢丽, 杨殿海, 等. 反硝化脱氮工艺补充碳源选择与优化研究进展[J]. *净水技术*, 2007, **26**(6): 37-41.
- Cai B J, Xie L, Yang D H, *et al.* A review on carbon source supplement and optimization in denitrification process[J]. *Water Purification Technology*, 2007, **26**(6): 37-41.
- [17] 蔡碧婧. 反硝化脱氮补充碳源选择与研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- Cai B J. Study on choose and optimize of extra carbon source for denitrification[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] 李晓晨, 杨敏, 吴成强, 等. 城市污水高效低耗生物脱氮工艺研究[J]. *江苏环境科技*, 2003, **16**(3): 1-3.
- Li X C, Yang M, Wu C Q, *et al.* Biological denitrification process research of municipal sewage[J]. *Jiangsu Environment Science and Technology*, 2003, **16**(3): 1-3.
- [19] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- Ma J, Peng Y Z, Wang L, *et al.* Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- [20] 阮文权, 卞庆荣, 陈坚. COD 与 DO 对好氧颗粒污泥同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, **10**(3): 366-369.
- Ruan W Q, Bian Q R, Chen J. Effect of COD and DO on nitrogen removal process in SND aerobic granular sludge [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, **10**(3): 366-369.
- [21] 张雯, 邓风, 徐华. 间歇曝气和连续曝气对完全混合式反应器系统脱氮性能的影响[J]. *环境化学*, 2013, **32**(11): 2176-2185.
- Zhang W, Deng F, Xu H. The impact of intermittent aeration and continuous aeration on CSTR system denitrification performance[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(11): 2176-2185.
- [22] 卢阳阳. 生活污水同步硝化反硝化脱氮研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- Lu Y Y. The study on simultaneous nitrification and denitrification of domestic sewage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [23] Wu L N, Peng C Y, Zhang S J, *et al.* Nitrogen removal via nitrite from municipal landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(11): 1480-1485.
- [24] 高景峰, 周建强, 彭永臻. 处理实际生活污水短程硝化好氧颗粒污泥的快速培养[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1604-1611.
- Gao J F, Zhou J Q, Peng Y Z. Rapid cultivation of aerobic granular sludge for shortcut nitrification of domestic wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(10): 1604-1611.
- [25] 王淑莹, 黄惠璐, 郭建华, 等. DO 对 SBR 短程硝化系统的短期和长期影响[J]. *北京工业大学学报*, 2010, **36**(8): 1104-1110.
- Wang S Y, Huang H J, Guo J H, *et al.* Short-term and long-term effects of DO on the partial nitrification process in an SBR reactor[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, **36**(8): 1104-1110.
- [26] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(6): 61-68.
- [27] Suja E, Nancharaiyah Y V, Krishna M T, *et al.* Denitrification accelerates granular sludge formation in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 28-34.
- [28] Hulshoff Pol L W, de Castro Lopes S I, Lettinga G, *et al.* Anaerobic sludge granulation [J]. *Water Research*, 2004, **38**(6): 1376-1389.
- [29] 王昌稳, 李军, 赵白航, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养与污泥特性分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, **44**(6): 2623-2628.
- Wang C W, Li J, Zhao B H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granular sludge and analysis of sludge characteristics[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, **44**(6): 2623-2628.
- [30] 卞伟, 李军, 赵白航, 等. 硝化污泥中 AOB/NOB 对硝化特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2395-2401.
- Bian W, Li J, Zhao B H, *et al.* The effect of AOB/NOB in nitrifying sludge on nitrification characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2395-2401.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)