ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第8期
2017年8月15日

目 次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 …… 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征 …… 张进生,吴建会,马咸,冯银厂(3102)
常州市大气 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 污染特征及来源解析 …… 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 …… 剧媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 …… 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 …… 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 …… 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM_{10} 浓度时序数据预测 …… 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 …… 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 …… 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 …… 芦会杰(3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 …… 张明,唐访良,俞雅雲,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 …… 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)
漓江地表水体有机碳来源 …… 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 …… 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 …… 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 …… 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 …… 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑侠(3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 …… 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型"土壤-水体"氮磷含量特征及其相互关系 …… 陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐(3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 …… 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 …… 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹, 潘旸(3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 …… 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 …… 向蓉,李巧玉,喻燚,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 …… 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽, 陶益, 张丽(3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性 …… 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征 …… 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 …… 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 …… 孟婷,杨宏(3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 …… 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 …… 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 …… 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 …… 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王骁静(3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 …… 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)
模拟废水中钯的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 …… 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 …… 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 …… 张婷,吴鹏,沈耀良,闾刚,徐乐中,Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 …… 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘忻,姚鹏程,张文静(3406)
不同 TOC/NH_4^+-N对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 …… 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 …… 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 …… 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 …… 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)
不同施肥方式下紫色土 N_2O 与 NO_x 的排放特征 …… 胡磊,刘韵,朱波(3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 …… 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 …… 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺纪正(3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 …… 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 …… 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王杨扬,王伯勋(3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 …… 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 …… 张彦军(3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 …… 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd^{2+} 活性 …… 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 …… 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 …… 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 …… 刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略

孙延芳[1],韩晓宇[2,3,4],张树军[3,4],李星[1*],曹相生[1]

(1. 北京工业大学建筑工程学院,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心,北京 100022; 4. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 为缩短工程应用中 CANON 颗粒污泥工艺的启动时间及提高总氮去除负荷,利用 SBR 反应器,研究了 CANON 颗粒污泥工艺启动规律与负荷提高策略. 试验过程中,温度控制在 30℃ ±1℃,pH 7 ~ 8,根据反应器内污泥形态及脱氮效果,调整沉淀时间及曝气量. 结果表明,反应器运行 55 d 后,实现了絮体和颗粒污泥共生系统向颗粒污泥系统的转变; 117 d 时,总氮去除负荷达到 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$,并能稳定维持,CANON 颗粒污泥工艺启动成功. 通过采取不断提高曝气量的方式,运行 77 d 后,总氮去除负荷能平均维持在 1.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$,实现了工艺负荷的提高. 试验中发现总氮去除负荷和 DO 之间具有较好的相关性,可以简单地通过观察 DO 浓度掌握脱氮效能,维持工艺的稳定运行.

关键词:全程自养脱氮; 启动; 颗粒污泥; 厌氧氨氧化; 曝气量

中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)08-3429-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201702043

Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate

SUN Yan-fang[1], HAN Xiao-yu[2,3,4], ZHANG Shun-jun[3,4], LI Xing[1*], CAO Xiang-sheng[1]

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Technology, Beijing 100022, China; 4. Beijing Engineering Research Center for Wastewater Reuse, Beijing 100124, China)

Abstract: To shorten the start-up time of the CANON granular sludge process and improve the total nitrogen removal rate in the engineering, the start-up method of CANON granular sludge process and the strategy for enhancing the total nitrogen removal rate were studied in an SBR reactor. During the experiment, the temperature was controlled at 30℃ ±1℃ and the pH was 7-8, the aeration rate and settling time were operated according to the sludge properties and effect of nitrogen removal. The results showed that the transition of the sludge properties from combined floc-granule to granule was realized after 55 d. The total nitrogen removal rate reached 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$ and remained stable after 117 d, thus the reactor was started up successfully. With constant improvement of the aeration rate, the average NRR was maintained at 1.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$ after 77 d and improvement of the process load was achieved. The results showed that there was good correlation between the NRR and DO, therefore, the NRR can be determined by observing the DO and the process can be maintained stably.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite; start-up; granular sludge; ANAMMOX; aeration rate

厌氧氨氧化菌在缺氧条件下,以二氧化碳为碳源,以 NO_2^- 为电子受体,NH_4^+ 为电子供体生成 N_2,达到最终脱氮目的[1]. 短程硝化与厌氧氨氧化耦合的脱氮工艺(partial nitritation/anammox, PN/A)与传统的硝化反硝化工艺相比,具有节省 60% 的曝气量、无需添加有机碳源、降低 90% 的污泥产量和较少氮氧化物释放等优势[2~4].

ANAMMOX 菌生长较慢,世代周期长达 11d[5],且易流失,一般通过生物膜与颗粒污泥方式持留[6,7]. 颗粒污泥法相比于生物膜法具有较高的污泥浓度、良好的沉降性和抗冲击负荷能力、不需要反冲洗、降低成本费用等优势. 因此在国际工程的研究中,主要是以颗粒污泥为主. 在颗粒污泥的结构中,AOB 主要生长在表面,ANAMMOX 菌主要生长在内部[8],这样的分布形式可有效保护 DO 对 ANAMMOX 菌的冲击[9],保证工艺的稳定运行.

据报道,CANON 颗粒污泥工艺在实际工程应用中启动时间较长,多数在半年以上[5,10~12],总氮去除负荷较低,大部分在 1 kg·(m^3·d)$^{-1}$ 以下[13~16],而国内对 CANON 颗粒污泥工艺的研究较少. 本课题以高氨氮废水为处理对象,重点研究了 CANON

收稿日期: 2017-02-12; **修订日期**: 2017-03-03

作者简介: 孙延芳(1990 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术,E-mail:f507051500@126.com

* 通信作者,E-mail:lixing@bjut.edu.cn

颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略,以期为实现高效稳定的 CANON 颗粒污泥工艺工程应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本课题以 SBR 反应器作为 CANON 颗粒污泥反应器,如图 1 所示. 反应器由有机玻璃制成,内径 300 mm,高1 400 mm,总容积为 100 L,有效容积为 90 L. 曝气器采用穿孔管,激光开孔孔径为0.1 mm,孔间隔为 10 mm,曝气量通过转子流量计控制. 试验温度通过恒温加热棒控制. 反应器内设有水质监测探头,用以监测工艺运行工程中的 pH、DO 和温度(T).

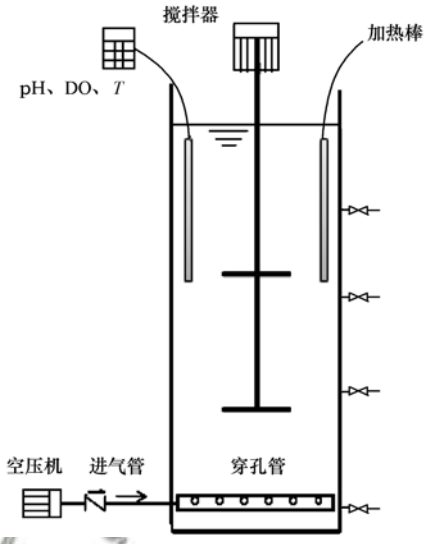


图 1 SBR 反应器试验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus of the SBR reactor

1.2 试验用水与接种污泥

试验用水为人工配制的高氨氮废水. 即通过向北京市高碑店污水处理厂初沉池出水中投加 NH_4HCO_3 和 $NaHCO_3$ 调节进水氨氮浓度和 pH 值. 进水水质如表 1 所示.

启动试验开始前,反应器内接种大于 0.5 mm 粒径的 ANAMMOX 颗粒污泥[17],接种量为 4 L. ANAMMOX 颗粒污泥取自高碑店污水处理厂内某高氨氮废水中试 SBR 反应器[14],接种时该反应器已运行两年,总氮去除负荷稳定维持在 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$.

表 1 反应器进水水质/mg·L^{-1}

Table 1 Water quality of the influent for the reactor/mg·L^{-1}

项目	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	COD	TP
范围	500 ~ 1 500	0 ~ 10	0 ~ 20	150 ~ 300	5 ~ 8

1.3 试验方案

1.3.1 启动阶段

试验采用间歇运行的方式,每个周期包括:瞬间进水、曝气、沉淀、排水. 每个周期运行结束后直接进入下一周期. 试验温度通过恒温加热棒控制在 30℃ ±1℃. 基质浓度对颗粒的形成至关重要[18],因此在启动过程中,为促进微生物快速增殖,出水氨氮浓度不低于 100 mg·L^{-1},并通过逐步缩短沉淀时间和提高曝气量的方式,快速启动 CANON 颗粒污泥工艺. CANON 颗粒污泥工艺启动成功的标准是系统内总氮负荷稳定维持在 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$,且以颗粒污泥形态为主. 每个周期的出水用孔径为 0.3 mm 的筛网过滤,截留的颗粒再返回至反应器,减少颗粒的流失. 启动过程共分为 3 个阶段,各阶段的运行参数如表 2 所示.

表 2 启动阶段反应器内运行参数

Table 2 Operational conditions of the reactor in initialization phase

阶段序号	运行时间/d	沉淀时间/min	表面气体流速/cm·s^{-1}
Ⅰ	1 ~ 27	5	0.05
Ⅱ	28 ~ 55	2	0.05
Ⅲ	56 ~ 117	2	0.10

1.3.2 负荷提高阶段

生物量的增多和活性的提高均有利于脱氮效率的增大. 负荷提高过程共分为 2 个阶段,各阶段的运行参数如表 3 所示.

表 3 负荷提高阶段反应器内运行参数

Table 3 Operational conditions of the reactor in load achieved phase

阶段序号	运行时间/d	气量/L·h	DO/mg·L^{-1}
A	118 ~ 180	170	0.51
B	181 ~ 257	170 ~ 400	0.51 ~ 1.2

1.4 分析方法

水质指标检测方法按照文献[19]规定的方法测量,总氮采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度法; 氨氮采用纳氏试剂光度法; 硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和总磷采用离子色谱法; 化学需氧量采用重铬酸钾法; 污泥浓度采用称重法; 不同粒径质量分析采用湿式筛分法; 污泥粒径采用激光粒度分析仪(马尔文2000); 污泥形态分析采用奥林巴斯显微镜; DO、pH 和 T 采用 WTW 测定.

2 结果与讨论

2.1 CANON 颗粒污泥的启动

2.1.1 颗粒污泥的形成

阶段 I 运行前,SBR 反应器内污泥形态为絮体

污泥和颗粒污泥共存的体系，MLSS 为 2 479 mg·L^{-1}，其中颗粒质量为 665 mg·L^{-1}，仅占到 27%. 接种 ANAMMOX 颗粒污泥后，开始阶段 I 的运行，反应器的沉淀时间由之前的 30 min 缩短至 5 min，反应器内表面气体流速调整为 0.05 cm·s^{-1}. 阶段 I 运行的第 1 d，测得污泥粒径分布出现明显的双峰（图 2 中曲线 a），表明反应器内存在两种形态的污泥，絮体污泥和颗粒污泥. 絮体污泥粒径分布 4 ~ 300 μm，占到总体积的 46%，颗粒污泥粒径分布 300 ~ 2 000 μm，占到总体积的 54%. 不同粒径质量变化（图 3）表明，启动初期反应器内絮体和颗粒质量相当，絮体质量为 1 349 mg·L^{-1}，占总质量的 55%，颗粒质量为 1 115 mg·L^{-1}，占总质量的 45%. 显微照片［图 4（a）］也发现了絮状污泥和颗粒污泥，与粒径分布图结果一致. 照片中颗粒污泥与絮体污泥都呈红色，说明系统内存在丰富的 ANAMMOX 菌.

阶段 I 结束时测得污泥粒径分布仍出现明显的双峰（图 2 中曲线 b），絮体污泥粒径分布 4 ~ 250 μm，占到总体积的 39%，颗粒污泥粒径分布 250 ~ 2 000 μm，占到总体积的 61%. 图 3 数据显示，总的污泥浓度减少了 57%，颗粒质量比增加了 21%，占到总质量的 66%，絮体质量比减少了 21%，占总质量的 34%.

阶段 I 的运行结果表明，5 min 的沉淀时间有利于沉降性较差的絮体污泥被淘洗出反应器，但反应器内污泥形态并未发生明显变化，因此在阶段 II 运行中继续减少沉淀时间至 2 min，加快颗粒污泥系统的形成.

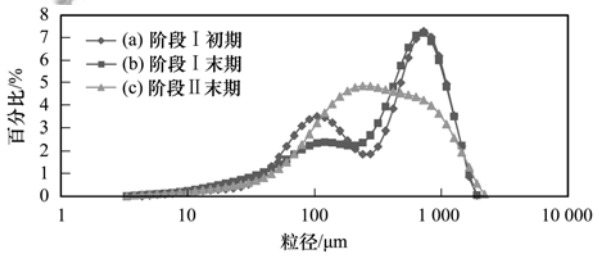


图 2　不同运行阶段的粒径分布

Fig. 2　Variations of particle size at different phases

第 28 ~ 55 d 为阶段 II. 运行 28 d 后，粒径分布并未出现两个峰（图 2 中曲线 c），说明反应器内污泥形态发生明显变化，为颗粒污泥. 粒径质量变化（图 3）显示，阶段 II 运行 19 d 后，由于过量排泥，污泥浓度降至最低为 531 mg·L^{-1}. 污泥量的减少有利于颗粒得到充足的基质用于新陈代谢，因此污泥浓度呈上升增长趋势. 第 55 d，污泥浓度增长至 668 mg·L^{-1}，絮体污泥质量占总质量的 10%，颗粒污泥质量占总质量的 90%，与粒径分布结果一致. 显微照片［图 4（b）］显示仍存在絮体和颗粒两种形态的污泥，但絮体所占比例已大量降低.

第 56 ~ 117 d 为阶段 III. 沉淀时间不变，通过充入氮气的方式提高反应器内表面气体流速至 0.10 cm·s^{-1}. 运行 62 d 后，如图 3 所示，污泥浓度持续增加，由 688 mg·L^{-1} 增长至 1 231 mg·L^{-1}，增长了 79%，大于 0.5 mm 的颗粒由 608 mg·L^{-1} 增长至 1 069 mg·L^{-1}，增长了 76%. 图 4（c）显示，反应器内已是颗粒污泥系统，且颗粒粒径较图 4（b）已有明显的增大.

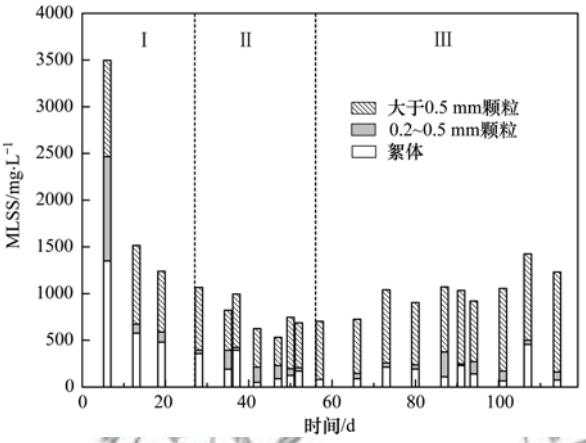
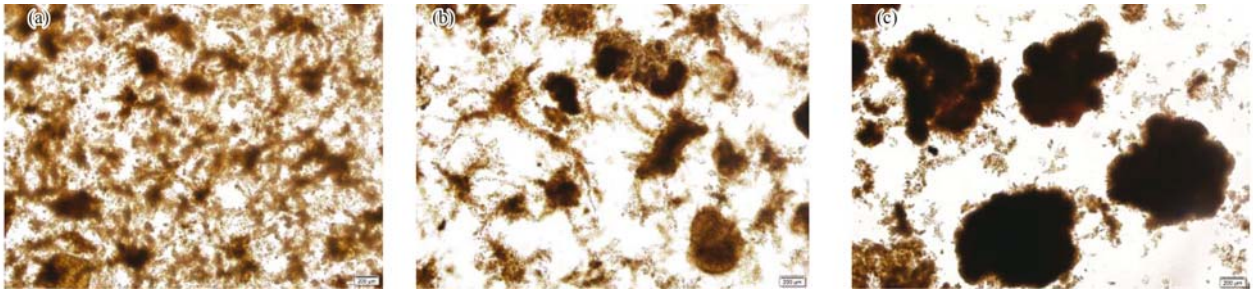


图 3　不同运行阶段的污泥粒度分布

Fig. 3　Sludge particle size at different phases

以上数据可知，阶段 II 比阶段 I 可较快实现颗粒污泥的状态，阶段 III 比阶段 II 更有利于颗粒的增值与增大. 有研究表明，水力选择压是促进颗粒污泥形成的重要因素[20]. 水力剪切力作用可有利于微生物分泌胞外聚合物，从而促进颗粒污泥的形成；反应器内表面气体流速的增加有利于颗粒与絮体的分离，通过沉淀排水过程对絮体进行淘洗，有利于颗粒污泥的生长[21]. 阶段 III 相比于阶段 II，在沉淀时间不变，反应器内表面气体流速升高的条件下，污泥浓度仍能持续增加的现象证实了文献［21］的观点. 本研究通过不断缩短沉淀时间和增加曝气量的运行方式是促进系统由絮体污泥与颗粒污泥共生的状态转换为颗粒污泥状态的主要原因. 巫恺澄等[22]的试验中将沉淀时间由 2.0 h 缩短至 0.75 h，絮状污泥的大量淘洗实现了污泥的颗粒化；丛岩等[23]通过调节外循环回流比，将系统内上升流速由 3 m·h^{-1} 逐渐提高至 9 m·h^{-1} 实现了颗粒污泥的生长. 与现有研究相比，本文通过选取沉淀时间和反应器内表面气体流速两个因素，在双重选择压的调控下实现了污泥的颗粒化，与已有结果相似. 沉淀时间过短同时带来



(a) 阶段Ⅰ, (b)阶段Ⅱ, (c)阶段Ⅲ

图 4 不同阶段污泥的显微照片

Fig. 4 Micrograph of sludge at different phases

絮状厌氧氨氧化菌的流失,造成污泥浓度的持续降低;较高的气体流速会带来能耗的增加,同时造成颗粒表面微生物的脱落[24],因此对于生长缓慢的 ANAMMOX 菌,沉淀时间和反应器内表面气体流速的选择显得尤为重要.

2.1.2 脱氮效能

反应器进水氨氮、出水氨氮、硝态氮、亚硝态氮和总氮去除负荷变化如图 5 所示.

阶段Ⅰ,进水氨氮浓度为 500 ~ 800 mg·L^{-1},DO 平均维持在 0.26 mg·L^{-1}. 运行的第 1 d,总氮的消耗很少,仅为 0.1 kg·(m^3·d)$^{-1}$,而出水氨氮为 151 mg·L^{-1},亚硝态氮为 0 mg·L^{-1},硝态氮累积到 27 mg·L^{-1}. 因 AOB 和 NOB 更倾向生长在絮体污泥[25],启动初,系统内絮体的质量占到 55%,亚硝酸盐氧化菌 NOB 将 AOB 生成的亚硝态氮氧化为硝态氮,ANAMMOX 菌不能得到充足的基质,总氮去除率仅为 49%. 运行第 2 d,出水氨氮 277 mg·L^{-1},亚硝态氮达到 28 mg·L^{-1},硝态氮降低至 7.74 mg·L^{-1},这是因为沉淀时间的缩短带来 AOB 和 NOB 的流失,同时接种 ANAMMOX 菌颗粒污泥的适应性并未表现出较高的脱氮效能. 之后阶段Ⅰ的运行中,出水硝态氮和亚硝态氮并未出现增多的现象,总氮平均去除率为 64%,总氮平均去除负荷仅为 0.09 kg·(m^3·d)$^{-1}$.

阶段Ⅱ,进水氨氮浓度为 500 ~ 800 mg·L^{-1},DO 平均维持在 0.42 mg·L^{-1}. 沉淀时间的再次缩短增大了 NOB 的淘洗量,但 DO 的提高并未促进 NOB 活性的增加和 ANAMMOX 菌活性的抑制,系统对总氮的去除率平均维持在 76%,总氮平均去除负荷增加至 0.13 kg·(m^3·d)$^{-1}$,出水硝态氮和亚硝态氮并未出现明显的累积.

阶段Ⅲ,进水氨氮浓度为 500 ~ 1 300 mg·L^{-1},DO 平均维持在 0.56 mg·L^{-1}. 在运行期间,出水硝态氮和亚硝态氮的浓度逐渐稳定,虽有少许的波动,但均无较大比例的累积且能尽快降低至稳定浓度. 总氮平均去除率为 78%,在阶段Ⅲ运行的第 62 d,总氮去除负荷达到 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$并能稳定维持,且系统内污泥呈颗粒形态,CANON 颗粒污泥工艺启动成功.

分析 CANON 颗粒污泥工艺快速启动的原因,①接种已有的 ANAMMOX 颗粒污泥,强化了系统内厌氧氨氧化的活性,大大缩短了启动的时间; ②较高的氨氮进水浓度有利于抑制 NOB 的活性,维持短程硝化的稳定实现,从而为厌氧氨氧化提供基质和微氧环境; ③沉淀时间的不断缩短和反应器内表面气体流速的不断提高有利于淘洗絮状污泥,促进颗粒化的形成; ④颗粒污泥作为活性污泥的一种形式,具有生物量大、沉降性好和抗冲击负荷强等优势,尤其适合生长缓慢的 ANAMMOX 菌.

本课题组通过接种厌氧氨氧化颗粒污泥,通过不断缩短沉淀时间和增大曝气量的方式,117 d 成功启动了 CANON 颗粒污泥反应器,大大缩短了启动时间,有利于工艺工程化的推广应用.

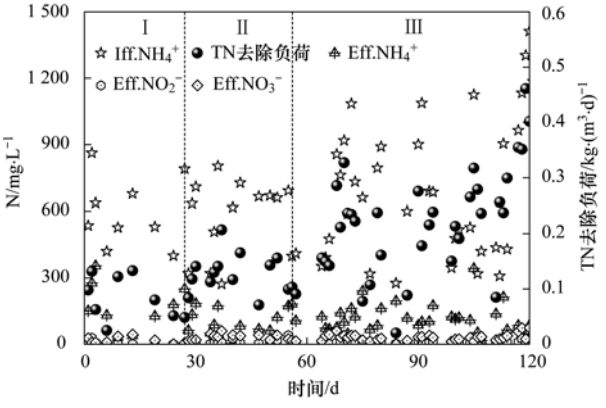


图 5 CANON 反应器的脱氮性能

Fig. 5 Nitrogen removal performance of the CANON reactor

2.2 工艺的稳定运行及总氮负荷提高策略

TN 去除负荷、气量和 DO 变化见图 6.

阶段 A,118 ~ 180 d,颗粒污泥的富集. CANON

工艺启动成功后进入稳定运行阶段，进水氨氮浓度控制在 700 ~ 1 300 mg·L^{-1}，沉淀时间为 2 min，气量平均维持在 170 L·h^{-1}，DO 平均维持在 0.51 mg·L^{-1}. 亚硝态氮平均出水浓度为 12 mg·L^{-1}，硝态氮平均出水浓度为 48 mg·L^{-1}，Δ(硝态氮)/Δ(氨氮)平均为 0.04. 系统内污泥浓度由 1 192 mg·L^{-1}增殖为2 409 mg·L^{-1}，增长了 1.02 倍，大于 0.2 mm 小于 0.5 mm 的颗粒增长了 1.34 倍，大于 0.5 mm 的颗粒增长了 0.98 倍. 表明此阶段的运行有利于颗粒污泥的富集，为阶段 B 总氮负荷的提高提供基础. 因运行条件维持恒定，总氮去除负荷平均维持在 0.40 kg·(m^3·d)$^{-1}$，系统运行稳定.

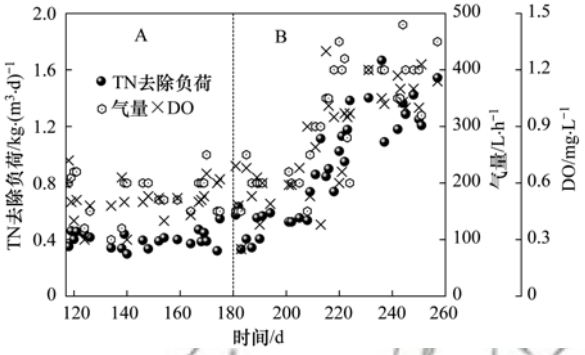


图 6　曝气量、DO 浓度与总氮去除负荷关系

Fig. 6　Correlations of aeration rate, dissolved oxygen, and total nitrogen removal rate

阶段 B，181 ~ 257 d，CANON 颗粒污泥工艺负荷提高阶段. 根据已有的报道，CANON 工艺的总氮去除负荷大部分在1 kg·(m^3·d)$^{-1}$以下[13~16]. 为促进工艺脱氮性能的提高，采取实时监测出水硝态氮和亚硝态氮的浓度，不断提高曝气量的方式运行.

从图 6 可以看出，随着曝气量的提高，DO 和总氮去除负荷均呈上升趋势. 当气量由 170 L·h^{-1}提高至 400 L·h^{-1}，DO 由 0.51 mg·L^{-1}升高至 1.2 mg·L^{-1}，总氮去除负荷由 0.40 kg·(m^3·d)$^{-1}$提高至 1.67 kg·(m^3·d)$^{-1}$，并能稳定维持在 1.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 运行期间，亚硝态氮平均出水浓度为 6.3 mg·L^{-1}，硝态氮平均出水浓度为 81.6 mg·L^{-1}，Δ(硝态氮)/Δ(氨氮)平均为 0.06，因此，短程硝化-厌氧氨氧化途径是总氮去除的主要途径. 继续调高气量，出水亚硝态氮浓度超过 20 mg·L^{-1}且总氮去除负荷出现下降的现象. 分析原因是气量调高导致系统内 DO 浓度超过 1.2 mg·L^{-1}，不仅直接抑制了 ANAMMOX 菌的活性[26]，而且强化了 AOB 的活性. 根据文献报道，亚硝态氮不仅是 ANAMMOX 菌的基质，同时也是抑制剂[27]，亚硝态氮的累积降低了 ANAMMOX 菌的活性，出现总氮去除负荷降低的现象.

有研究表明，DO 浓度对 CANON 工艺的效能有重要影响[28]. 阶段 2 可明显观察到 DO 浓度与总氮去除负荷有较好的相关性，如图 7 所示. DO 浓度为 0.25 ~ 1.20 mg·L^{-1}的范围内，总氮去除负荷随着 DO 浓度的增加而提高，由 0.33 kg·(m^3·d)$^{-1}$升高至 1.40 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 系统内 DO 浓度超过 1.20 mg·L^{-1}时，ANAMMOX 菌的活性受到抑制，NOB 活性增强，系统内短程硝化-厌氧氨氧化的脱氮途径会受到破坏. 因此在运行 CANON 颗粒污泥工艺过程中，可以粗略地根据 DO 浓度掌握反应器的运行状态. 当反应器因进水水质的变化等原因引起反应器内 DO 浓度突然波动时，能及时通过调整曝气量维持系统内稳定的 DO 浓度，避免系统脱氮途径破坏，为工程的稳定运行提供参考依据.

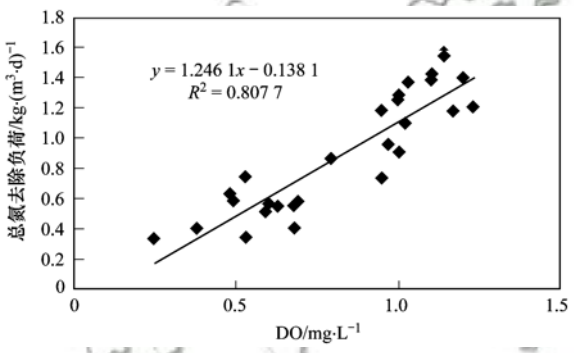


图 7　DO 浓度与总氮去除负荷关系

Fig. 7　Correlation between dissolved oxygen and total nitrogen removal rate

3　结论

(1)接种 4 L 的 ANAMMOX 颗粒污泥反应器，进水氨氮浓度控制在 700 ~ 1 300 mg·L^{-1}，pH 控制在 7 ~ 8，温度控制在 30℃ ±1℃，在沉淀时间由 30 min 逐渐缩短至 2 min，反应器内表面气体流速由 0.05 cm·s^{-1}缓慢提高至 0.10 cm·s^{-1}的水力选择压下，117 d 实现了 CANON 颗粒污泥的启动并能稳定运行.

(2)长期稳定运行的 CANON 颗粒污泥系统，通过实时监测出水的亚硝态氮和硝态氮浓度，采取不断提高曝气量的方式，经过 77 d 的运行，在气量提高至 400 L·h^{-1}时，总氮去除负荷平均维持在 1.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$.

(3)在 DO 浓度为 0.25 ~ 1.20 mg·L^{-1}时，总氮去除负荷和 DO 浓度具有较好的相关性，因此可以简单地通过观察 DO 浓度掌握系统脱氮效能，并对

系统内 DO 浓度的突然波动及时做出调整,维持工艺的稳定运行.

参考文献:

[1] Kartal B, de Almeida N M, Maalcke W J, *et al*. How to make a living from anaerobic ammonium oxidation [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2013, **37**(3): 428-461.

[2] Kartal B, van Niftrik L, Rattray J, *et al*. *Candidatus* 'Brocadia fulgida': an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, **63**(1): 46-55.

[3] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al*. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. Water Science & Technology, 2008, **57**(3): 383-388.

[4] Morales N, del Río á V, Vázquez-Padín J R, *et al*. Integration of the Anammox process to the rejection water and main stream lines of WWTPs[J]. Chemosphere, 2015, **140**: 99-105.

[5] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al*. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50**(5): 589-596.

[6] Rosenwinkel K H, Cornelius A. Deammonification in the moving-bed process for the treatment of wastewater with high ammonia content [J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, **28**(1): 49-52.

[7] Abma W R, Driessen W, Haarhuis R, *et al*. Upgrading of sewage treatment plant by sustainable and cost-effective separate treatment of industrial wastewater [J]. Water Science & Technology, 2010, **61**(7): 1715-1722.

[8] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al*. Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor[J]. Water Research, 2010, **44**(15): 4359-4370.

[9] 顾书军, 方芳, 李凯, 等. 低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3120-3127.
Gu S J, Fang F, Li K, *et al*. Rapid Start-up of one-stage autotrophic nitrogen removal process in EGSB reactor for wastewater with low concentration of ammonia[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3120-3127.

[10] Ali M, Oshiki M, Awata T, *et al*. Physiological characterization of anaerobic ammonium oxidizing bacterium '*Candidatus jettenia* caeni'[J]. Environmental Microbiology, 2015, **17**(6): 2172-2189.

[11] Awata T, Oshiki M, Kindaichi T, *et al*. Physiological characterization of an anaerobic ammonium-oxidizing bacterium belonging to the "*Candidatus* Scalindua" group[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(13): 4145-4148.

[12] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, *et al*. Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an air pulsing SBR[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(1): 336-341.

[13] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al*. Partial nitrification and anammox process: a method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment[J]. Water Research, 2013, **47**(9): 2929-2937.

[14] Qiao S, Nishiyama T, Fujii T, *et al*. Rapid startup and high rate nitrogen removal from anaerobic sludge digester liquor using a SNAP process[J]. Biodegradation, 2012, **23**(1): 157-164.

[15] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al*. Nitrogen removal from digested black water by one-stage partial nitritation and anammox[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(13): 5035-5041.

[16] Winkler M K H, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures [J]. Water Research, 2012, **46**(1): 136-144.

[17] 韩晓宇, 常江, 孟春霖, 等. 短程硝化/厌氧氨氧化一步法自养脱氮中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(19): 1-5, 10.
Han X Y, Chang J, Meng C L, *et al*. Single-stage autotrophic nitrogen removal based on partial nitrification and Anammox[J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(19): 1-5, 10.

[18] Chen T T, Zheng P, Shen L D, *et al*. Dispersal and control of anammox granular sludge at high substrate concentrations[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2012, **17**(5): 1093-1102.

[19] 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.

[20] 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 等. 接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2302-2308.
Liu W R, Shen Y L, Ding L L, *et al*. Study on rapid start-up of a nitrifying process using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2302-2308.

[21] Lens P N L, Korthout D, van Lier J B, *et al*. Effect of the liquid upflow velocity on thermophilic sulphate reduction in acidifying granular sludge reactors[J]. Environmental Technology, 2001, **22**(2): 183-193.

[22] 巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 等. ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2947-2953.
Wu K C, Wu P, Xu L Z, *et al*. Formation mechanism of aerobic granular sludge and removal efficiencies in integrated ABR-CSTR reactor[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2947-2953.

[23] 丛岩, 黄晓丽, 王小龙, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成[J]. 化工学报, 2014, **65**(2): 664-671.
Cong Y, Huang X L, Wang X L, *et al*. Faster formation of anammox granular sludge[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(2): 664-671.

[24] Turan M. Mechanisms of biofilm detachment in anaerobic fluidized bed reactors[J]. Environmental Technology, 2000, **21**(2): 177-183.

[25] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[26] Yin Z X, Santos C E D D, Vilaplana J G, *et al*. Importance of the combined effects of dissolved oxygen and pH on optimization of nitrogen removal in anammox-enriched granular sludge[J]. Process Biochemistry, 2016, **51**(9): 1274-1282.

[27] Puyol D, Carvajal-Arroyo J M, Sierra-Alvarez R, *et al*. Nitrite (not free nitrous acid) is the main inhibitor of the anammox process at common pH conditions[J]. Biotechnology Letters, 2014, **36**(3): 547-551.

[28] Wen X, Zhou J, Wang J L, *et al*. Effects of dissolved oxygen on microbial community of single-stage autotrophic nitrogen removal system treating simulating mature landfill leachate [J]. Bioresource Technology, 2016, **218**: 962-968.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 8

Aug. 15, 2017

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $MgCl_2$ Solution ····· LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, *et al.* (3095)

Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry ····· ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, *et al.* (3102)

Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Changzhou City ····· GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, *et al.* (3110)

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China ····· JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, *et al.* (3120)

Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China ····· WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, *et al.* (3130)

Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck ····· XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, *et al.* (3139)

Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System ····· SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, *et al.* (3146)

PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM ····· WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, *et al.* (3153)

Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port ····· HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, *et al.* (3162)

Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols ····· LI Hong-tao, Qi jian-hua, DONG Li-jie, *et al.* (3169)

Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities ····· LU Hui-jie (3178)

Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China ····· ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, *et al.* (3185)

Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River ····· NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, *et al.* (3192)

Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River ····· ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, *et al.* (3200)

Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer ····· WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, *et al.* (3209)

Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas: A Case Study of Ningbo ····· XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, *et al.* (3218)

Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater: A Case Study of Liujiang Basin ····· ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, *et al.* (3225)

Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario ····· LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, *et al.* (3235)

Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance ····· LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, *et al.* (3243)

Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, *et al.* (3254)

Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China: A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed ····· E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, *et al.* (3264)

New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination ····· LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, *et al.* (3273)

Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process ····· ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, *et al.* (3281)

Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River ····· XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, *et al.* (3290)

Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir ····· SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, *et al.* (3302)

Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms ····· WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, *et al.* (3312)

Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake ····· ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, *et al.* (3319)

Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology ····· ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, *et al.* (3330)

Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora ····· MENG Ting, YANG Hong (3339)

Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource ····· HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, *et al.* (3347)

Purification Effect of Piggery Wastewater with *Chlorella pyrenoidosa* by Immobilized Biofilm-Attached Culture ····· WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, *et al.* (3354)

Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater ····· LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, *et al.* (3362)

Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater ····· YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, *et al.* (3369)

Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX ····· ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, *et al.* (3377)

Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue ····· KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, *et al.* (3385)

Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space ····· WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, *et al.* (3393)

Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR ····· ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, *et al.* (3399)

Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System ····· WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, *et al.* (3406)

Effect of Different TOC to NH_4^+-N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process ····· WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, *et al.* (3415)

Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge ····· TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, *et al.* (3422)

Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate ····· SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, *et al.* (3429)

Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge ····· LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (3435)

Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes ····· HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)

Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field ····· ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, *et al.* (3451)

Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia ····· ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, *et al.* (3463)

Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils ····· XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, *et al.* (3473)

Effects of $CaCO_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil ····· GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, *et al.* (3483)

Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil ····· WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3489)

Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors ····· ZHANG Yan-jun (3497)

Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications ····· WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, *et al.* (3507)

Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium ··· ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, *et al.* (3519)

Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation ····· WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, *et al.* (3529)

Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting ····· YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (3536)

Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China ····· LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)