

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)
《环境科学》征订启事 (65)	
《环境科学》征稿简则 (220)	
信息 (226, 270, 298, 364)	

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究

刘小英^{1,4}, 林慧^{1,4}, 马兆瑞^{1,4}, 王磊², 刘静伟^{1,4}, 郭超³, 姜应和^{1,4*}

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉市城市排水发展有限公司, 武汉 430060; 3. 武汉科技大学城市建设学院, 武汉 430065; 4. 武汉理工大学城镇供水与水污染控制技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 在厌氧/好氧交替运行的 SBR 反应器中, 以成熟的脱氮除磷颗粒污泥为研究对象, 对其硝化及反硝化特性进行研究。结果表明, 静态试验中颗粒污泥的最大硝化速率为 $14.13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大反硝化速率为 $34.89 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大缺氧吸磷反硝化速率为 $13.11 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 污泥具有较好的硝化、反硝化性能; 反应器中污泥最大硝化速率为 $4.60 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大反硝化速率为 $1.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 通过 N 的物料平衡得到, 同步硝化反硝化反应去除 N 约为 $232.5 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 占 N 去除总量的 54.3%; 另外, 颗粒污泥对 P 和 N 的去除率分别在 95% 和 90% 左右, 反应器具较好的同步脱氮除磷效果。

关键词: 颗粒污泥; 硝化; 反硝化; 同步硝化反硝化; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0214-07

Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge

LIU Xiao-ying^{1,4}, LIN Hui^{1,4}, MA Zhao-rui^{1,4}, WANG Lei², LIU Jing-wei^{1,4}, GUO Chao³, JIANG Ying-he^{1,4}

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan City Drainage Development Limited Company, Wuhan 430060, China; 3. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 4. Research Center of Urban Water Supply and Contaminated Water Control Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In the alternating anaerobic/aerobic SBR reactor, the nitrification and denitrification characteristics of simultaneous nitrogen and phosphorus removal by granular sludge were studied. The results of batch experiments indicated that the maximal nitrification rate, denitrification rate, anoxic phosphorus uptake and denitrification rate were $14.13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $34.89 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and $13.11 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. In SBR, the maximal nitrification rate and denitrification rate were $4.60 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and $1.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, which were lower than those in the batch test. The amount of nitrogen removal by the simultaneous nitrification and denitrification process was approximately $232.5 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, which was 54.3% of the total nitrogen removal. The removal efficiency of N and P was about 90% and 95%, respectively. The simultaneous nitrogen and phosphorus removal by granular sludge showed high efficiency in nitrogen and phosphorus removal.

Key words: granular sludge; nitrification; denitrification; simultaneous nitrification and denitrification; nitrogen removal

氮、磷污染已成为破坏水体环境的主要因素之一(如水体富营养化),生物脱氮除磷越来越受到人们的重视^[1~3]。在常规污水生物处理系统中,由于脱氮与除磷之间存在矛盾,常采用化学法辅助除磷(通过投加铁盐和铝盐出水 TP 含量在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下);而脱氮由于受温度、DO、pH 值等因素的影响难以达到稳定的脱氮效果^[4~8]。

好氧颗粒污泥具有优异的沉降性能、较高的微生物浓度和良好的抗冲击负荷能力^[9~11]。有研究发现,颗粒污泥一定的粒径和紧密结构导致 DO 在污泥内部传质时形成好氧区/缺氧区/厌氧区从而有利于系统同步脱氮除磷^[12~14]。Kern-Jespersen 等^[15]发现 PAOs 具有反硝化聚磷能力,它以 NO_x^- ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) 代替氧作为电子受体同步去除 N 和 P,可以有效节约碳源和能源,反应器形成 NO_x^- 是反硝化聚磷

的重要步骤。如果系统中存在反硝化聚磷菌,反应器吸磷过程中可以减缓硝酸盐存在对聚磷菌活性的影响;如果反硝化聚磷菌不存在,在脱氮除磷颗粒污泥中好氧段硝酸盐将对好氧吸磷产生影响^[16,17]。

同步硝化反硝化(simultaneous nitrification and denitrification, SND)作用是使在污泥外部好氧区形成的 NO_x^- ,通过内层缺氧区反硝化作用降低从而减少主体溶液中 NO_x^- ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) 的积累(NO_x^- 不积累可以降低其对聚磷菌活性的影响)^[18]。因此,

收稿日期:2013-04-09; 修订日期:2013-06-14

基金项目:中央高校基本科研业务专项(2012-IV-072);武汉理工大学本科生自主创新研究基金项目(116606001, 126806006);国家自然科学基金项目(31270573);国家级大学生创新训练计划项目(20121049706003);武汉市城市排水发展有限公司资助项目

作者简介:刘小英(1975~),女,博士,副教授,主要研究方向为污水脱氮除磷新技术,E-mail:xy2000225@sohu.com

* 通讯联系人,E-mail:jyhe123@whut.edu.cn

污泥内部形成稳定性的好氧区/缺氧区是影响系统脱氮效果的关键。在较低 DO 下硝化菌活性受到抑制,在较高 DO 下反硝化菌受到抑制,因此在好氧池中 DO 对脱氮影响很大。文献[19~21]指出,当 DO 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统可以获得良好的同步硝化反硝化脱氮效果。

利用好氧颗粒污泥进行脱氮除磷研究近年来取得了较大进展^[12],但少有人系统研究脱氮除磷颗粒污泥的硝化反硝化特性。因此,笔者以好氧/厌氧交替运行的 SBR 反应器培养的脱氮除磷颗粒污泥为研究对象,采取一定的手段对颗粒污泥反应器的 N、P 历时去除效果、硝化及反硝化反应特性等进行研究,并通过 N 的平衡细致分析脱氮除磷反应过程中 N 的去除走向,丰富了颗粒污泥进行脱氮除磷研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验用 SBR 反应器,材质为有机玻璃,有效容积 4 L,内径 16 cm,高径比为 1.56(图 1)。反应器每周运行 4.8 h,包括进水 1 min、厌氧 80 min、好氧 196 min、沉淀 4 min、出水 4 min 以及闲置 4 min 共 6 个阶段。反应器每周进水 2 L,出水 2 L。反应器搅拌强度在 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右,曝气强度在 $12 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,温度在 $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (由水浴控制)、pH 值在 7.5 左右。每天从反应器中排出一定量混合液,维持系统污泥龄在 23 d 左右。

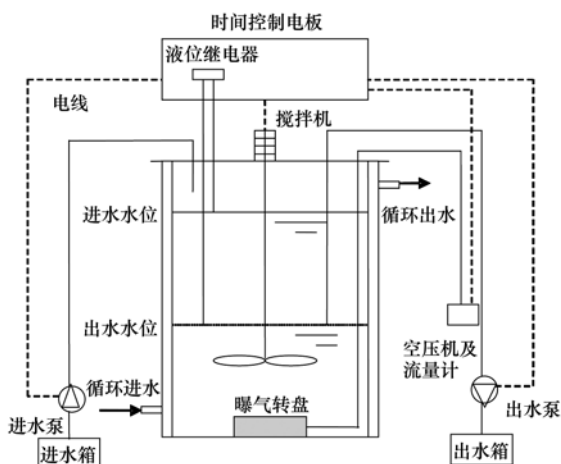


图1 SBR反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR reactor

1.2 试验用水

试验用水采用自来水人工配制,其成分如下: COD ($\text{NaAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) $380 \sim 430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (NH_4Cl) $36 \sim 43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ (KH_2PO_4 和

K_2HPO_4) $12 \sim 17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} ($\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) $60 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 蛋白胨 $26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, EDTA $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, KI $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 反应速率测定

硝化反应速率测定:从反应器中取适量污泥,经 3 次离心清洗($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 5 min)后,放入容积为 1 L 的静态反应装置(图 2),控制反应器温度($22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)和 pH 值(7.5),通入空气,投加适量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 后立即计时开始取样,测定不同时间 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。

反硝化反应速率测定:适量污泥经如前所述前处理后放入容积为 1 L 静态反应装置,控制反应器的温度($22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)和 pH 值(7.5),通入 N_2 ,投加适量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和过量 COD,测定不同时间 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。

反硝化聚磷反应速率测定:适量污泥经前处理后放入容积为 1 L 静态反应装置,控制反应器的温度($22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)和 pH(7.5),投加适量 KH_2PO_4 和过量 COD,通入 N_2 进行厌氧释磷,结束后将污泥进行离心清洗,再重新置入反应装置,加入适量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,取样测 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 。

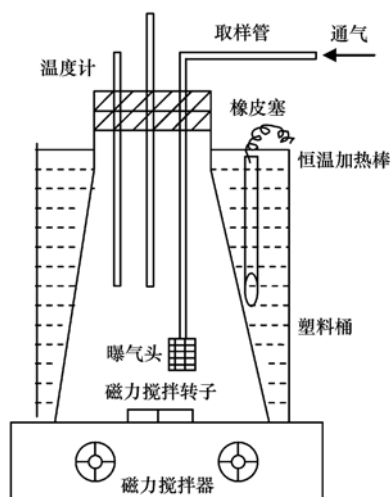


图2 静态试验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of batch experiments

1.4 分析项目与方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、COD、SVI、MLSS、MLVSS 等均按标准方法测定^[22]; DO 采用

HACH 溶解氧仪测定,污泥形态通过普通光学显微镜观察和电子扫描显微镜(SEM)观察,污泥粒径利用 Mastersizer 2000 粒度分析仪(测定粒径在 1 mm 以下)及直接读数法测定.

2 结果与讨论

2.1 脱氮除磷颗粒污泥性能

颗粒污泥反应器稳定运行 190 d 后,污泥颜色

为淡黄色,呈近似球形或椭圆形,结构致密[图 3(a)],平均粒径为 1.2 mm;颗粒边缘清晰并且附有一定的丝状物,其中还有一定的原生动物,如钟虫、轮虫等[图 3(b)];颗粒污泥是一个复杂的微生物系统,大量丝状菌缠绕颗粒污泥表面,球菌和短杆菌分布在丝状菌周围[图 3(c)];污泥内部有孔隙,孔隙内部也分布着为数较多的球菌和短杆菌[图 3(d)].

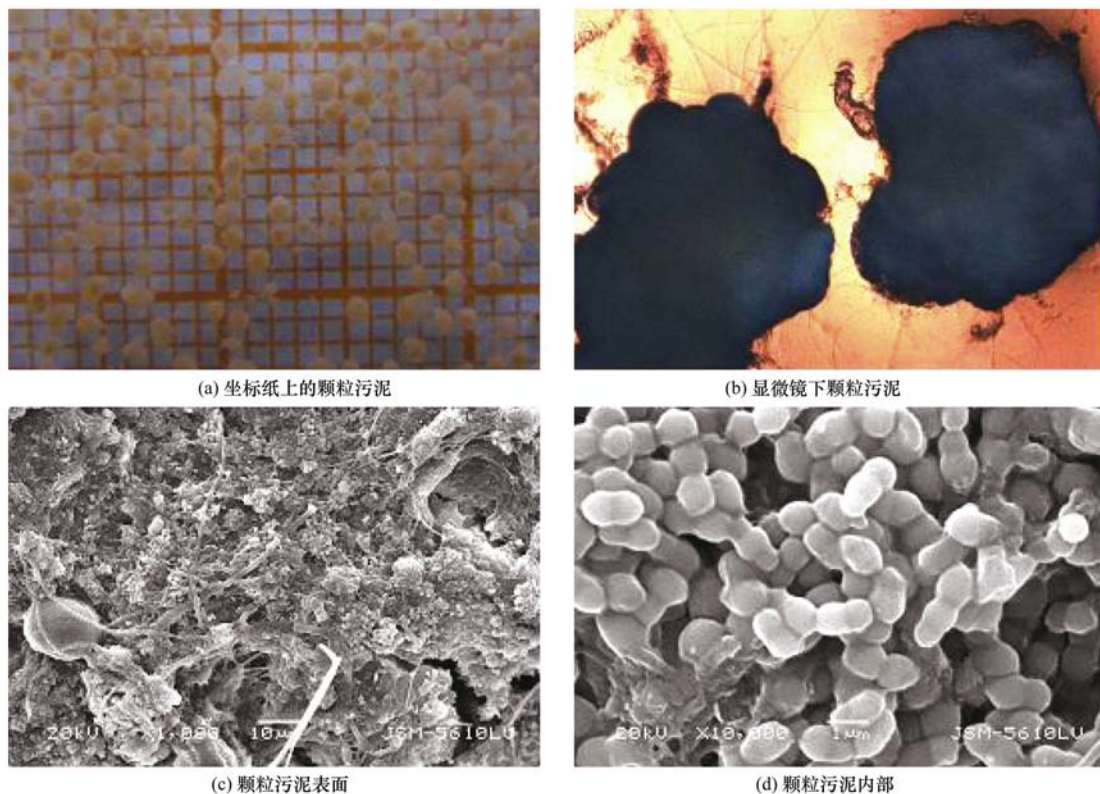


图 3 反应器中颗粒污泥的形态

Fig. 3 Morphology of granular sludge in the SBR reactor

反应器的 MLSS 约为 $6\,600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 约为 $4\,092\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SVI 在 $20\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,单颗颗粒污泥沉速在 $29.0\sim40.9\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,出水 SS 在 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

2.2 反应器中 N 去除率

图 4 为反应器运行 190 d 内 N 去除率的变化情况.可以看出,反应器运行 5 d 时 N 去除率很低(在 62% 以下),之后 N 去除率逐渐提高到 90% 以上,但运行第 24 d 时 N 去除率突然降到 65% 以下,到 50 d 之后,其去除率基本维持在 90% 左右.开始阶段 N 起伏变化可能是由于污泥吸附、解析作用所致^[23];随着污泥颗粒化完善,硝化细菌在污泥表面稳定富集, N 去除率比较稳定.污泥颗粒形成(30 d 左右)后反应器 15% 时间内出现 N 去除率降低的现象,其

主要由于曝气不稳定[低于 $9\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 或高于 $14\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$]所致.

试验发现,当反应器运行至第 24~26 d 时,曝气量在 $9\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 以下时(此时反应器主体溶液中好氧段 DO 浓度在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下),出水中 NH_4^+-N 的含量在 $11\sim16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但出水中 NO_x^- 含量在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,由此可以推断,由于 DO 太低,氨氧化细菌活性受到抑制;当反应器运行至第 30~45 d 时,提高曝气量到 $14\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ (好氧段开始 DO 在 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,颗粒污泥刚刚形成,其平均粒径为 0.32 mm),此时反应器出水中 NO_x^- 含量在 $11\sim16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (主要以 NO_3^--N 形式存在, NO_2^--N 含量在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下), NH_4^+-N 的含量在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, DO 太高污泥内部难以形成缺氧

环境而使反硝化菌受到抑制(据报道 DO 的扩散深度为 0.5 mm 左右)。由此可见,曝气量的瞬间变化会迅速影响氨氧化微生物和反硝化微生物生物活性。

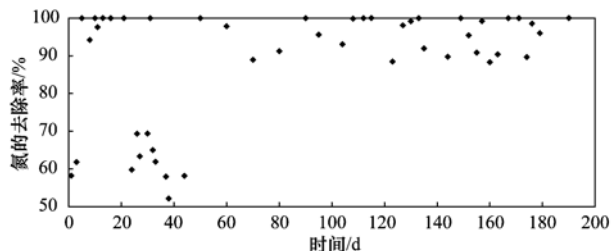


图4 反应器内氨去除率历时变化

Fig. 4 Diachronic variation of ammonia nitrogen removal efficiency

2.3 颗粒污泥硝化和反硝化性能

反应器运行 183 d 时取颗粒污泥进行静态试验,其试验结果见图 5~6。

由图 5(a)可以看出,整个硝化反应过程持续 30 min,随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下降, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 逐渐上升,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低到 $1.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 达到 $12.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在整个硝化过程中,其浓度维持在 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 没有发生积累;脱氮除磷颗粒污泥最大硝化速率 $[m(\text{NH}_4^+\text{-N})/m(\text{VSS})\cdot t]$ 为 $14.13 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,而姜体胜等^[24]在同样条件下,获得的脱氮除磷絮状污泥最大硝化速率约为 $6.25 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,本试验培养的颗粒污泥具有较好的硝化能力。

由图 5(b)可以看出,反应 20 min 内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由 $24.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速下降为 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与此同时

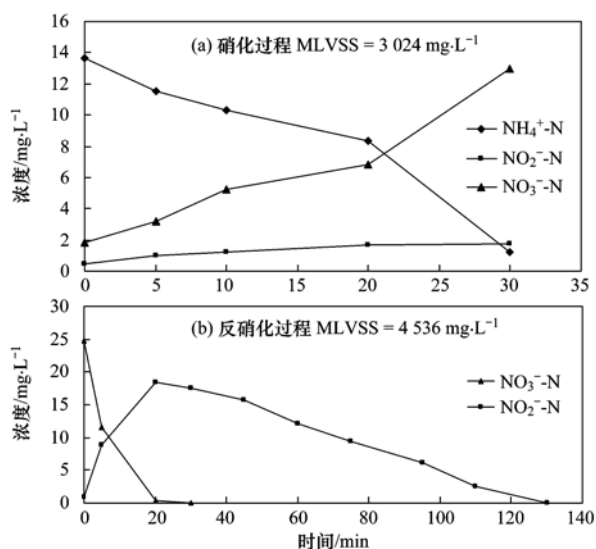


图5 N 的静态试验

Fig. 5 Variations of nitrogen concentrations in batch experiments

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 逐渐升高并达到最大 $18.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 缓慢下降,130 min 时 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 几乎为 0; 颗粒污泥最大反硝化速率 $[m(\text{NO}_3^-\text{-N})/m(\text{VSS})\cdot t]$ 为 $34.89 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,是絮状污泥反硝化速率[絮状污泥的最大反硝化速率约为 $16.67 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ^[24]]的 2.09 倍,该试验培养的颗粒污泥具有较好的反硝化能力。

2.4 颗粒污泥反硝化聚磷性能

图 6 为反硝化菌聚磷试验结果。从中可以看出, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 初始浓度为 $29.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应 85 min 之内升高到 $33.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后缓慢下降,在 300 min 时,吸磷速率 $[m(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})/m(\text{VSS})\cdot t]$ 达到最大[仅为 $2.54 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$],比富集反硝化聚磷菌的吸磷能力弱[吸磷速率为 $7.52 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]^[25]; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 初始浓度为 $35.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应开始后快速降低,105 min 时降低为 $4.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大反硝化速率为 $13.11 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 降低的同时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 迅速上升,105 min 达到最大 $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后缓慢下降,到 315 min 降低到 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。整个过程 P 仅仅下降了约 $7.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而伴随着 N 降低了 $35.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与文献[11, 12]报道的反硝化聚磷试验结果相比,本试验中通过反硝化聚磷作用进行脱氮和除磷能力很弱,N 的去除主要依赖厌氧段合成的胞内贮存物质进行反硝化,同时也显示出 P 的存在一定程度上抑制了反硝化菌的活性。

与图 5(b)得到的最大反硝化速率相比可以看出,其反硝化速率仅为外碳源为电子供体时速率的 0.43,内碳源反硝化速率远远小于外碳源反硝化速率。

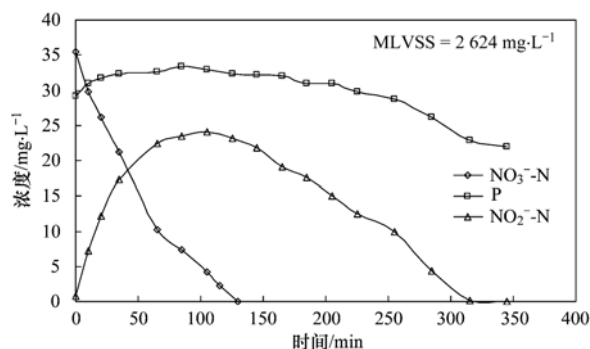


图6 反硝化聚磷静态试验

Fig. 6 Denitrifying phosphorus uptake in batch experiments

2.5 反应器内颗粒污泥脱氮性能研究

2.5.1 反应器某一周期内各参数的变化

反应器运行 190 d 时对其某一周期进行监测,

得到 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 各参数的变化(图 7)。

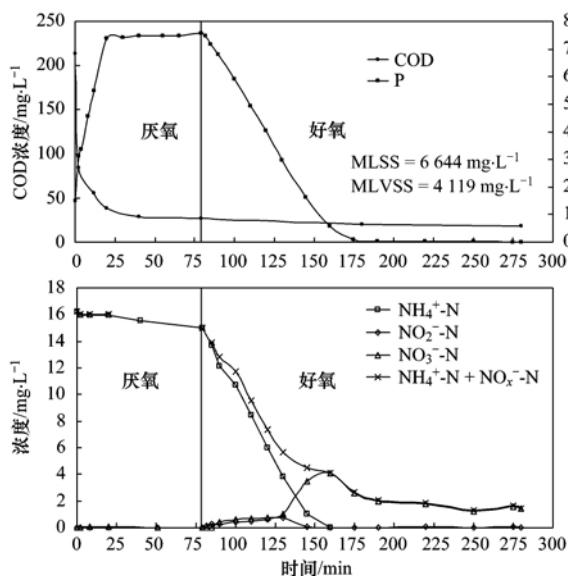


图 7 SBR 反应器内一个周期内各参数变化曲线

Fig. 7 Profiles of parameters during a typical cycle in SBR

由图 7 可以看出,厌氧段 2 min 内 COD 迅速由 $213.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $84.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 12 min 进一步降到 $55.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 到厌氧段结束, COD 仅为 $27.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 的最大降解速率高达 $584.24 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 远远高于 Yilmaz 等^[26] 培养的具有同步脱氮除磷颗粒污泥的 COD 的降解速率。结合图 3 (c) 分析, 颗粒污泥表面存在一定的孔隙, 将 COD 快速吸附在颗粒污泥表面或内部, 使主体溶液中 COD 浓度快速下降; 另外, 研究者也发现反硝化菌可过量吸附 CH_3COONa ^[27]。反应器中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 初始浓度为 $15.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 20 min 后达到 $73.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在随后的 60 min 内释磷缓慢进行, 厌氧末端 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达到 $75.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大释磷速率为 $34.67 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。好氧段 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 开始快速下降, 曝气 95 min 后降低到 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 曝气 110 min 后降低到 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 好氧段最大吸磷速率为 $15.59 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 释磷速率约为吸磷速率的 2.2 倍。

在整个厌氧阶段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 仅由 $16.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $14.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要用于细菌自身生长。曝气开始 10 min $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 快速下降, 最大硝化速率为 $4.60 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 曝气 65 min 时下降到 $1.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 80 min 时检测不到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$; 曝气开始 65 min 内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最高达到 $1.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 之后迅速上升, 曝气 80 min 最大达到 $4.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 曝气 95 min 时降低

到 $2.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 之后缓慢下降, 出水时降低为 $1.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大反硝化速率为 $1.43 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在整个过程中维持在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 没有发生 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累; 整个好氧阶段 N 的去除主要发生在曝气 80 min 内。这说明硝化菌将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的同时, 颗粒污泥内的反硝化菌同时将它们进一步反硝化, 反应器内存在同步硝化反硝化脱氮的现象。

在好氧阶段前 10 min 内 DO 在 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 此时系统内 NO_x^- 的含量在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下; 80 min 时 DO 维持达到 $2.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量达到最大, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量几乎为 0; 110 min 时 DO 达到 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在好氧末端达到 $6.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对应 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。由此看出, 曝气 80 min 内 DO 主要用来进行硝化和好氧吸磷, 导致 DO 较低; 曝气后期 DO 较高, 但系统仍然具有较好的脱氮效果, 其主要原因在于一定粒径的颗粒污泥(粒径在 1 mm 左右)内部存在的微缺氧环境起到了至关重要的作用。

反应器某一周期内硝化速率和反硝化速率均比静态试验所测得速率低, 其主要原因如下: 测定硝化速率时, 静态反应装置中 DO 充足, 高达 $8.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而反应器内大量的氧被 PAOs 好氧吸磷所利用使得其 DO 较低 ($2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下), 从而抑制了硝化反应; 静态试验测反硝化速率时, 使用的是充足的外碳源或胞内聚合物, 而反应器中进行反硝化时污泥中胞内聚合物在好氧开始阶段大部分被 PAOs 和同步硝化反硝化过程反硝化所利用, 胞内聚合物含量较低, 一定程度上抑制了反硝化反应。

2.5.2 N 平衡计算

在稳态系统中, 假定细胞合成所需要的 N 与剩余污泥带出的 N 相等^[28], 反应器出水仅含有 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 这样对反应器中 N 做如下计算。

进水氮总量 N_0 :

$$40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \times 10 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1} = 400 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$$

细胞合成的氮 N_c :

$$6600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \times 0.62 \times 0.13 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1} \times 12\% \\ = 63.8 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$$

出水 SS 中含的氮 N_{ss} :

$$30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \times 10 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1} \times 12\% = 36 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$$

出水中 NO_x^- 的氮 N_1 :

$$1.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \times 10 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1} = 14.1 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$$

反硝化去除的氮 N_d :

$$(4.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} - 1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times 20 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \\ = 53.6 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$$

式中, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为进水中 NH_4^+ -N 含量, 10 L 为反应器 1 d 的总进水量(反应器 1 d 运行 5 个周期, 每周进水 2 L), 4 L 为反应器的有效容积, $4.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为反应器内 NO_3^- -N 最高含量, $6600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为反应器 MLSS, MLVSS/MLSS 比值为 0.62, 12% 为微生物 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ 中氮的质量分数, 130 mL 为每天从反应器排出的污泥混合液量, $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为反应器出水 SS(以 MLVSS 形式存在), $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为出水中 NO_3^- -N 的含量(NO_2^- -N 的含量为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

根据 N 的物料平衡, 计算推出 N 通过同步硝化反硝化去除量 N_{nd} 约为 $232.5 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$. 反应器中 12.5% 的 N 通过出水去除, 13.4% 的 N 通过反硝化去除, 16% 的 N 用于细胞合成后通过剩余污泥的形式排出, 58.1% 的 N 通过同步硝化反硝化去除的, 可见同步硝化反硝化是去除 N 主要方式.

本试验中培养的同步脱 N 除磷颗粒污泥对 COD 去除率在 93% 以上, 对 N 去除率在 90% 左右, 对 P 的去除率在 95% 左右, 出水 N 和 P 浓度均达到《污水综合排放标准》一级 A 标准, 具有很好的同步脱氮除磷效果.

3 结论

(1) 颗粒污泥反应器在曝气量为 $12 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 条件下, N 去除率在 90% 左右, 具有较好的同步脱氮除磷效果.

(2) 颗粒污泥静态反应最大硝化速率为 $14.13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大反硝化速率为 $34.89 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大聚磷反硝化速率为 $13.11 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 具有较强的硝化、反硝化能力.

(3) 反应器中污泥的最大硝化速率为 $4.60 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 最大反硝化速率为 $1.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 同步硝化反硝化去除的 N 约为 $232.5 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 占 N 去除总量的 54.3%, 反应器中 N 主要通过同步硝化反硝化去除.

参考文献:

- [1] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 内循环对 A^2/O -曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 193-198.
- [2] Ma Y, Peng Y Z, Wang X L. Improving nutrient removal of the AAO process by an influent bypass flow by denitrifying phosphorus removal [J]. Desalination, 2009, **246**(1-3): 534-544.
- [3] 张杰, 臧景红, 杨宏, 等. A^2/O 工艺的固有缺欠和对策研究 [J]. 给水排水, 2003, **29**(3): 22-26.
- [4] 彭永臻, 王晓莲, 王淑莹. A^2/O 脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(8): 1053-1057.
- [5] 李伟民, 刘杰, 王涛, 等. A^2/O 工艺的旁路化学除磷及污泥减量研究 [J]. 中国给水排水, 2010, **26**(17): 16-18, 22.
- [6] 侯红娟, 王洪洋, 周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响 [J]. 中国给水排水, 2005, **21**(12): 19-23.
- [7] 马俊, 张永祥, 刘亮, 等. A^2/O 工艺脱氮效果研究 [J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, **22**(1): 28-31.
- [8] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] Peng D C, Nicolas B, Jean-Philippe D, *et al.* Aerobic granular sludge-A case report [J]. Water Research, 1999, **33**(3): 890-893.
- [10] 涂响, 苏本生, 孔云华, 等. 城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2118-2123.
- [11] 高景峰, 陈冉妮, 苏凯, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥形成与反应机制的研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 1021-1029.
- [12] Tsuneda S, Nagano T, Hoshima T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor [J]. Water Research, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [13] 张朝升, 章文菁, 方茜, 等. DO 对好氧颗粒污泥短程同步硝化反硝化脱氮的影响 [J]. 环境工程学报, 2009, **3**(3): 413-416.
- [14] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **90**(6): 761-769.
- [15] Kernn-Jespersen J P, Henze M, Ttrube R. Biological phosphorus release and uptake under alternating anaerobic and anoxic conditions in a fixed-film reactor [J]. Water Research, 1994, **28**(5): 1253-1255.
- [16] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. Water Research, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [17] Bassin J P, Kleerebezem R, Dezotti M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures [J]. Water Research, 2012, **46**(12): 3805-3816.
- [18] 林金奎, 张可方, 方茜, 等. DO 对同步硝化反硝化协同除磷的影响 [J]. 化工环保, 2009, **29**(2): 109-120.
- [19] 胡林林, 王建龙, 文湘华, 等. SBR 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化 [J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 74-77.
- [20] Münch E V, Lant P, Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors [J]. Water Research, 1996, **30**(2): 277-284.
- [21] 周律, 钱易. SBR 中好氧颗粒污泥及其脱氮功能的研究进展 [J]. 中国给水排水, 2009, **25**(2): 21-26.
- [22] 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.
- [23] 魏翔, 伍永钢, 朱文斌, 等. 硝化颗粒污泥的培养及其硝化性能研究 [J]. 中国给水排水, 2010, **26**(9): 100-103.
- [24] 姜体胜, 杨琦, 尚海涛, 等. 温度和 pH 值对活性污泥法脱氮除磷的影响 [J]. 环境工程学报, 2007, **1**(9): 10-14.
- [25] 李相昆, 张杰, 黄荣新, 等. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷特性研究 [J]. 中国给水排水, 2006, **22**(3): 35-39.
- [26] Yilmaz G, Lemaire R, Keller J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **100**(3): 529-541.
- [27] 曹相生, 钱栋, 孟雪征. 乙酸钠为碳源时的污水反硝化规律研究 [J]. 中国给水排水, 2011, **27**(21): 76-79.
- [28] 王川, 聂会元, 金龙, 等. 溶解氧和污泥粒径分布对城市污水 SND 影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, **32**(3): 145-148, 154.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字 (含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明 (在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站 (www.hjkx.ac.cn) 进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果 (包括主要数据) 和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作 (引文即可) 和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg (毫克), m (米), h (小时) 等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者 (外文也要姓列名前). 论文名 [J]. 期刊名, 年, 卷 (期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名 [A]. 见 (In): 编者. 文集名 [C]. 出版地: 出版社 (单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名 [D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名 [R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行