

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

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

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体神累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性

郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影

(陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安 710021)

摘要: 利用 SBR 反应器模拟单级和多级 A/O 工艺, 在进水水质、水力停留时间(HRT)、泥龄(SRT)、温度、缺氧好氧时间比(A/O 比)均相同的条件下, 考察了两种脱氮系统中氮的去除效果及 N₂O 的释放情况。结果表明, 对于与城市污水水质相当的进水水质, 单级 A/O 工艺和多级 A/O 工艺对 COD、氨氮的去除率均在 95% 以上, 二者无明显区别, 但是前者对 TN 的去除效率高于后者, 二者的总氮去除率分别为 72.1% 和 52.2%。在氮素的转化过程中, 典型周期内(3 h)单级 A/O 工艺和多级 A/O 工艺中 N₂O 的产生量分别为 16.95 mg 和 3.59 mg, 其转化率(即 N₂O 的产量与 TN 的去除量之比)分别为 11.47% 和 4.11%, 且 N₂O 的产生和释放主要发生在好氧段(硝化阶段), 缺氧段(反硝化阶段)基本无 N₂O 释放。单级 A/O 工艺比多级 A/O 工艺更有利于硝化细菌(AOB、NOB)的生长, 在相同的运行条件下, 两工艺中 AOB 的优势菌种皆为 *Nitrosomonas*, 但前者的相对丰度高于后者; 单级 A/O 工艺中 NOB 的种类和相对丰度也明显多于多级 A/O 工艺。在实际运行中采用合适的 A/O 分区或供氧方式既可以较好地去除污水中氮素污染, 又可以减少 N₂O 的释放对大气造成二次污染。

关键词: 单级 A/O; 多级 A/O; 脱氮; 氧化亚氮(N₂O); 亚硝酸单胞菌属

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0647-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201603152

Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes

GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, ZHU Chao, PEI Li-ying

(School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The single-stage A/O and multi-stage A/O processes were simulated by sequencing batch reactors (SBRs) with alternate stirring and aeration. The removal efficiency of nitrogen and the release mechanism of N₂O were studied under the identical conditions of influent quality, hydraulic retention time (HRT), sludge retention time (SRT), temperature and anoxic/oxic (A/O) retention time ratio. Experimental results showed that COD or ammonia-nitrogen removal had no significant difference between the single-stage and the multi-stage A/O processes for the influent quality equivalent to municipal wastewater. However, TN removal efficiency of the former was better than the later with 72.1% and 52.2%, respectively. In the conversion of total nitrogen, during the typical cycle in the single-stage A/O and multi-stage A/O processes, the yields of N₂O were 16.95 mg and 3.59 mg, respectively. The conversion rate, which is the ratio of N₂O yield and TN removal, was respectively 11.47% and 4.11%. N₂O production and emission occurred mainly in aerobic (nitrification) phase while there was little N₂O emission in anoxic (denitrification) phase. Although the dominant species of AOB was both *Nitrosomonas* in the single-stage A/O and the multi-stage A/O processes under the same operating conditions, it was more conducive to the growth of nitrifying bacteria (AOB, NOB) in the single-stage A/O process with the greater abundance of *Nitrosomonas*. Meanwhile, the type and abundance of NOB in the single-stage A/O process were significantly more than in the multi-stage A/O process too. Therefore, it is more competitive to deal with the high-strengthening ammonia-nitrogen wastewater in the single-stage A/O process. In the actual operation of wastewater treatment, using appropriate partitions of A/O or oxygen-supplying modes can not only result in better nitrogen removal but also decrease the secondary pollution caused by N₂O to the atmosphere.

Key words: single-stage A/O; multi-stage A/O; nitrogen removal; nitrous oxide (N₂O); *Nitrosomonas*

随着对环境质量要求的提高, 氮污染控制日益严格, 生物脱氮技术不断得到了深入研究和广泛应用。有研究表明生物脱氮过程中氮转化的气态产物不仅仅是 N₂, 而且还有 N₂O 等气态产物^[1,2]。其中, N₂O 是一种强效温室气体, 其增暖效应是 CO₂ 的 270 倍左右, 而且在大气中的留存时间较长(平均寿命为 150 a)^[3,4]。因此, 近年来生物脱氮过程中 N₂O 的释放引起国内外学者的广泛关注, 废水生物脱氮过

程被认为是 N₂O 的一个重要的人为排放源。

目前关于废水脱氮中 N₂O 产生的研究主要是考察一些具体的影响因素, 如碳氮比、DO、pH 和曝气

收稿日期: 2016-03-20; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金项目(2016JM5079); 陕西省教育厅专项科研计划项目(14JK1096); 陕西科技大学博士科研启动基金项目(BJ13-08)

作者简介: 郭昌梓(1968~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制技术及废物资源化, E-mail: guochangzi@sust.edu.cn

速率等对 N_2O 产生量的影响^[5~8]. 但是关于不同 A/O 系统中 N_2O 的产生与释放的研究还鲜见报道. 而现行实际的污水脱氮工艺主要分为单级 A/O 工艺和多级 A/O 工艺两大类, 如 SBR、CASS、A/O、A²/O 等一般为单级 A/O 工艺, 而氧化沟、百乐卡(biloak)等为多级 A/O 工艺^[9~12]. 因此, 研究单级和多级 A/O 脱氮工艺中氮的去除效果及 N_2O 转化率的差异, 对于脱氮方法的实际应用、优化生物脱氮技术及有效去除氮污染具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究方法与试验装置

本研究中的单级 A/O 和多级 A/O 工艺均采用 SBR 反应器模拟运行. 本试验装置如图 1 所示, 由 1 号和 2 号反应器组成, 其有效容积均为 15 L, 它们的运行周期为 3 h, 其中反应 140 min, 沉淀 35 min, 排水 5 min. 1 号反应器为单级 A/O 工艺, 其反应时间包括缺氧 70 min(前 2 min 完成进水), 好氧 70 min. 2 号反应器为多级 A/O 工艺(模拟氧化沟工艺), 其运行方法是将 140 min 的反应时间等分为 5 个小周期, 每个小周期为一个小循环(相当于氧化沟的一个循环), 每个小周期进水一次, 曝气 4 次, 曝气时间间隔 6 min, 每次曝气 1 min. 该方法模拟氧化沟的平均循环比为 17, 一个循环时间为 28 min, 含有 4 个 A/O 分区^[13]. 因而, 2 号反应器的一个周期可以形成 20 个 A/O 分区. 1 号和 2 号反应器在一个周期内缺氧时间和好氧时间相同, 皆为 70 min. 两个反应器的运行参数为 HRT = 12 h、SRT = 30 d、MLSS = $(2\,300 \pm 100)$ mg·L⁻¹, 运行温度维持在 25℃ 左右.

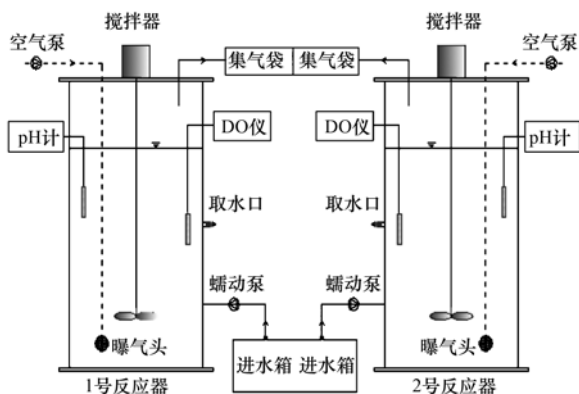


图 1 反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment devices

1.2 试验用水

试验用水采用人工配水, 水质主要组分类似城市污水, 水质组成成分为: 淀粉(以 COD 计) 300

mg·L⁻¹, NH_4Cl (以 N 计) 40 mg·L⁻¹, KH_2PO_4 (以 P 计) 6 mg·L⁻¹, $NaHCO_3$ 470 mg·L⁻¹(用来调节碱度), 微量元素溶液 1 mg·L⁻¹(废水), 微量元素溶液用蒸馏水配制, 其主要组分为: $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ 35 mg·L⁻¹; $NiCl \cdot 6H_2O$ 36 mg·L⁻¹; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 5 000 mg·L⁻¹; $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 6 000 mg·L⁻¹; $CoCl_2 \cdot 4H_2O$ 880 mg·L⁻¹; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 100 mg·L⁻¹; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 500 mg·L⁻¹.

1.3 污泥的培养与驯化

试验所用污泥取自西安市第五污水处理厂的曝气池中, 试验研究前在反应器中对所取的污泥利用人工配水进行几个污泥龄的培养驯化^[14].

1.4 分析项目及检测方法

运行稳定时, 两个 SBR 反应器整体密闭, 1 号反应器间隔 10 min 取一次水样和气样; 2 号反应器间隔 7 min 取一次水样和气样.

1.4.1 DO、pH 及水质参数的测定

DO、pH 分别采用 HANNA 溶解氧仪和雷磁 pH/ORP 测定仪测定. 试验测定的主要水质指标为 COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、TP, 同时对微生物进行镜检并定期测定污泥的 SV、MLSS、SVI 等指标, 以反映污泥性状. 各指标的检测方法依据文献^[15].

1.4.2 氧化亚氮(N_2O)的收集与测定

在密闭的反应器上部装有带抽气泵的采样袋, 将气体收集在采样袋中, 收集的样品在 24 h 内进行分析. N_2O 采用 GC-ECD(PE-600, 美国)进行测定, 所采用的色谱柱为 Poropak Q 柱, 载气为高纯氮气, 色谱条件为: 载气流速 30 mL·min⁻¹、进样口温度 50℃、柱温 50℃、检测器温度 360℃^[16].

1.4.3 微生物群落分析

用 SoilGen DNA Kit 提取污泥中菌种的总 DNA, 利用 PCR 技术对 DNA 扩增, 然后采用 Roche 454 第二代 GS FLX 测序平台对 1 号和 2 号反应器内污泥样品 DNA 进行高通量测序^[17,18]. 试验委托上海美吉生物技术有限公司进行. 最后根据测序结果利用 MEGAN 软件对两种工艺条件下的微生物群落结构进行对比, 做出进化分支树, 从而直观反映两种 A/O 系统的菌群结构.

2 结果与讨论

2.1 两种 A/O 系统中污染物去除及 DO 变化趋势

两种不同 A/O 系统稳定运行时 COD、氨氮、总氮、总磷的去除情况如图 2 所示.

从图 2 可以看出两种运行条件下 COD 的去除效率为 97.5%, 氨氮的去除效率为 99.2%, 效果相当, 但总氮和总磷的去除率差别较大. 1 号和 2 号反应器的总氮去除率分别为 72.1% 和 52.2%, 总磷去除率分别为 53.4%、25.2%. 这与 Guo 等^[19]关于氧化沟不同曝气模式氮的去除效果结论一致, 主要是因为 2 号反应器为多级 A/O 工艺, 交替频繁的缺氧、好氧使有机碳源在好氧段消耗得较多, 导致在缺氧段中, 反硝化细菌和聚磷菌能够利用的有机物较少, 因而在进水氮负荷相同的前提下单级 A/O 要比多级 A/O 的脱氮除磷效果好.

图 3 为系统稳定时两个反应器中溶解氧(DO)变化趋势图, 从中可以看出两个反应器的 A/O 分区达到了预期的设计, 好氧区和缺氧区的停留时间基本相同, 皆为 70 min 左右. 1 号反应器好氧段开始后随着曝气的进行, DO 浓度逐步上升且出现两个“平台”, 第一个平台表示氨氮氧化速率与供氧速率达到了平衡, 随着氨氮量的不断减少 DO 又开始快

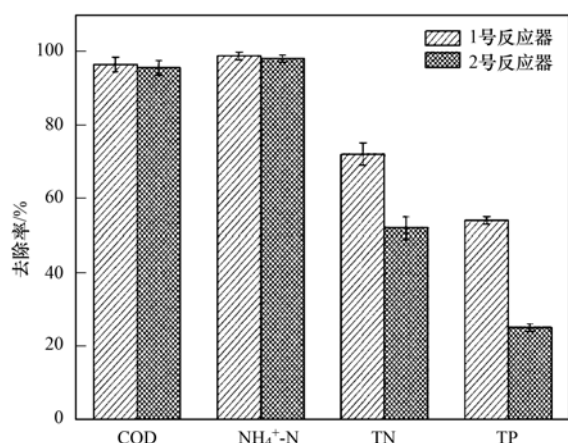


图 2 不同 A/O 条件下污染物去除效果

Fig. 2 Pollutant removal performance under different A/O conditions

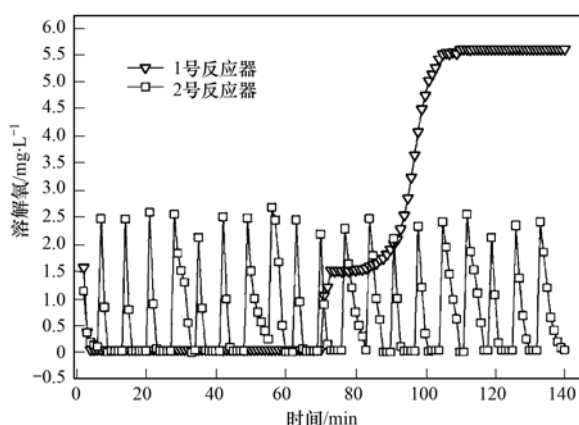


图 3 典型周期溶解氧变化趋势

Fig. 3 Time profiles of DO concentration in a typical cycle

速上升, 然后出现第二个平台即 DO 在系统内达到了相对饱和. 2 号反应器 DO 变化呈锯齿状, 没有“平台”出现, 这说明系统一直处在相对缺氧状态, 其峰值只有 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅为 1 号反应器 DO 峰值的一半左右, 但是两个反应器出水 COD 和氨氮值差别却不大. 通过考察比耗氧速率(SOUR, 以 MLSS 计)发现 1 号和 2 号反应器 SOUR 为 $24.71 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $28.64 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 这说明模拟多级 A/O 工艺的间歇短时曝气活性污泥系统对氧的利用率更高.

2.2 典型周期内氮素变化特征

图 4(a) 为 1 号反应器 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 在一个周期内的变化特征. 进水后 NH_4^+ -N 浓度迅速上升且在缺氧段基本保持不变, 在好氧段浓度快速下降. 而 NO_2^- -N 的变化趋势和氨氮正好相反即在缺氧段由于反硝化作用逐步降低, 在好氧段逐步上升最后达到一个相对稳定的浓度. 从图 4(a) 中还可看出在缺氧段和好氧段 NO_2^- -N 浓度变化均呈现先上升后降低现象: 缺氧段 NO_2^- -N 的积累是由于系统中硝酸盐的存在抑制了亚硝酸盐的还原, 导致硝酸盐还原速率大于亚硝酸盐还原速率; 而好氧段 NO_2^- -N 的积累可能是由于自由氨(FA)的存在所致, Aslan 等^[20]认为 FA 可以抑制氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO₂)的活性, 抑制 AOB 和 NOB 活性的阈值浓度分别为 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过分析发现, 好氧段前 15 min 的 FA 浓度均大于 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 大于 NOB 活性阈值, 从而造成了亚硝酸盐氮浓度的升高.

图 4(b) 反映了 2 号反应器一个周期内 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的变化. 由于模拟的氧化沟工艺的循环比(稀释比)为 17, 故每个小循环(相当于氧化沟的一个循环)开始时 NH_4^+ -N 浓度较低, 到小循环结束时氨氮基本消耗殆尽. 整个周期或系统内 FA 的浓度均在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 不存在 FA 对 NOB 的抑制. 而每个小循环内 NO_2^- -N 的短时积累可能也是由于系统中硝酸盐的存在抑制了亚硝酸盐的还原. NO_3^- -N 浓度在整个周期内逐渐升高, 在每个小循环内 NO_3^- -N 的去除主要集中在前半段时间, 后半段时间几乎没有去除, 这主要是由于在前半段时间碳源充足后半段时间碳源匮乏, 以至于反硝化碳源不足.

2.3 典型周期内两个反应器中 N_2O 的产生和释放规律

生物脱氮系统中产生的 N_2O 要么以气体形式被吹脱出来, 要么以溶解态形式暂时留存在污水中, 而

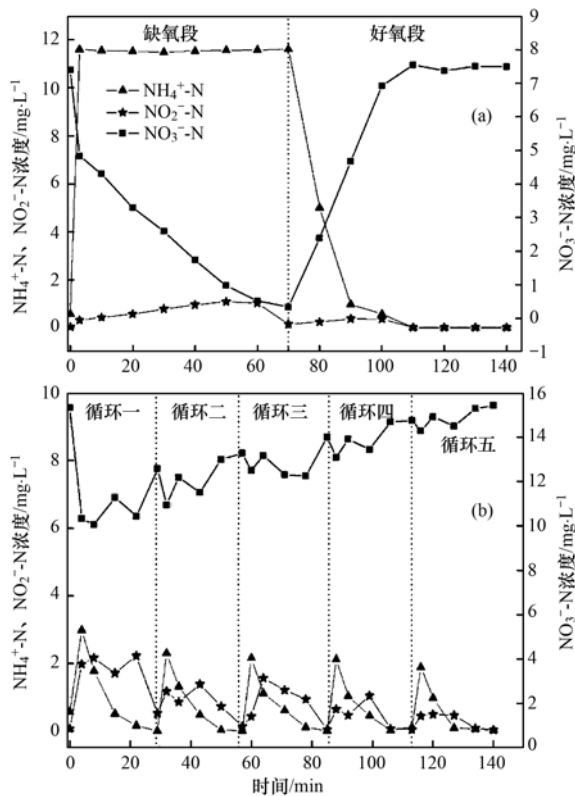


图4 典型周期内两反应器内 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度变化

Fig. 4 Time profiles of NH_4^+-N , NO_2^--N and NO_3^--N concentrations in a typical cycle under different A/O conditions

前者占 N_2O 释放总量的 99.5% 以上^[21]. 试验通过顶空法测定溶解态 N_2O 时,检测器没有出现响应,故本研究只考虑气态中的 N_2O .

从图 5(a) 中可以发现,1 号反应器中 N_2O 主要产生在好氧段的氨氧化阶段,缺氧反硝化阶段释放不明显. 缺氧段 N_2O 释放速率($v_{\text{N}_2\text{O}}$)和浓度($c_{\text{N}_2\text{O}}$)的小幅增加可能是由于进水夹带的 DO 以及上周期残留的 DO 使得缺氧反硝化段前期有少量分子氧存在,而氧气对 N_2O 还原酶有抑制作用. 在好氧段随着氨氮不断被氧化, N_2O 释放速率和浓度变化为先上升再下降,随着氨氮消耗,在好氧段后期 N_2O 释放速率和浓度又重新趋于零. 在好氧段 N_2O 释放速率($v_{\text{N}_2\text{O}}$,以 MLSS 计,下同)和浓度($c_{\text{N}_2\text{O}}$)的峰值出现在 100 min 左右,分别为 $5 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $7.38 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,此时氨氮浓度为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,基本消耗殆尽,此后 N_2O 释放速率和浓度迅速下降.

图 5(b) 为 2 号反应器中 N_2O 的释放情况,在每个小循环内 $v_{\text{N}_2\text{O}}$ 和 $c_{\text{N}_2\text{O}}$ 均出现一个峰值而且都出现在氨氮浓度较大时的缺氧曝气段, $v_{\text{N}_2\text{O}}$ 的最大峰值约为 $1.8 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$. 在各个小循环内 $v_{\text{N}_2\text{O}}$ 的变化

趋势和 1 号反应器一样,即随着氨氮浓度的降低而逐渐降低.

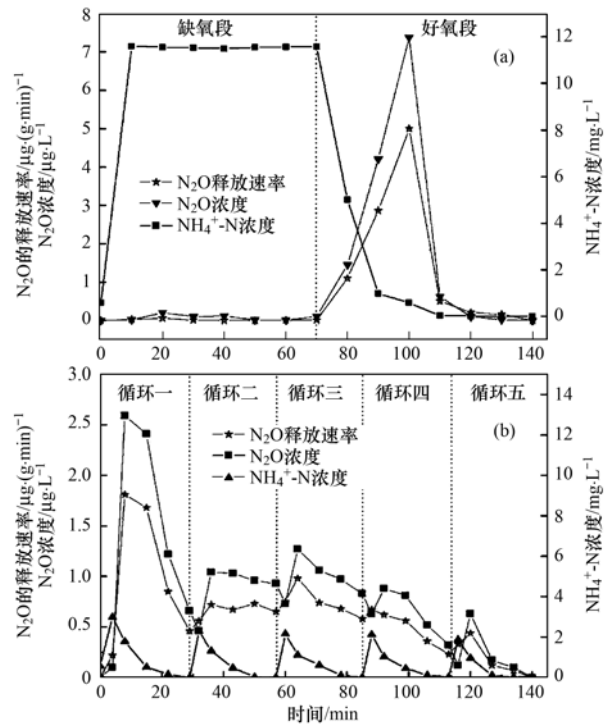


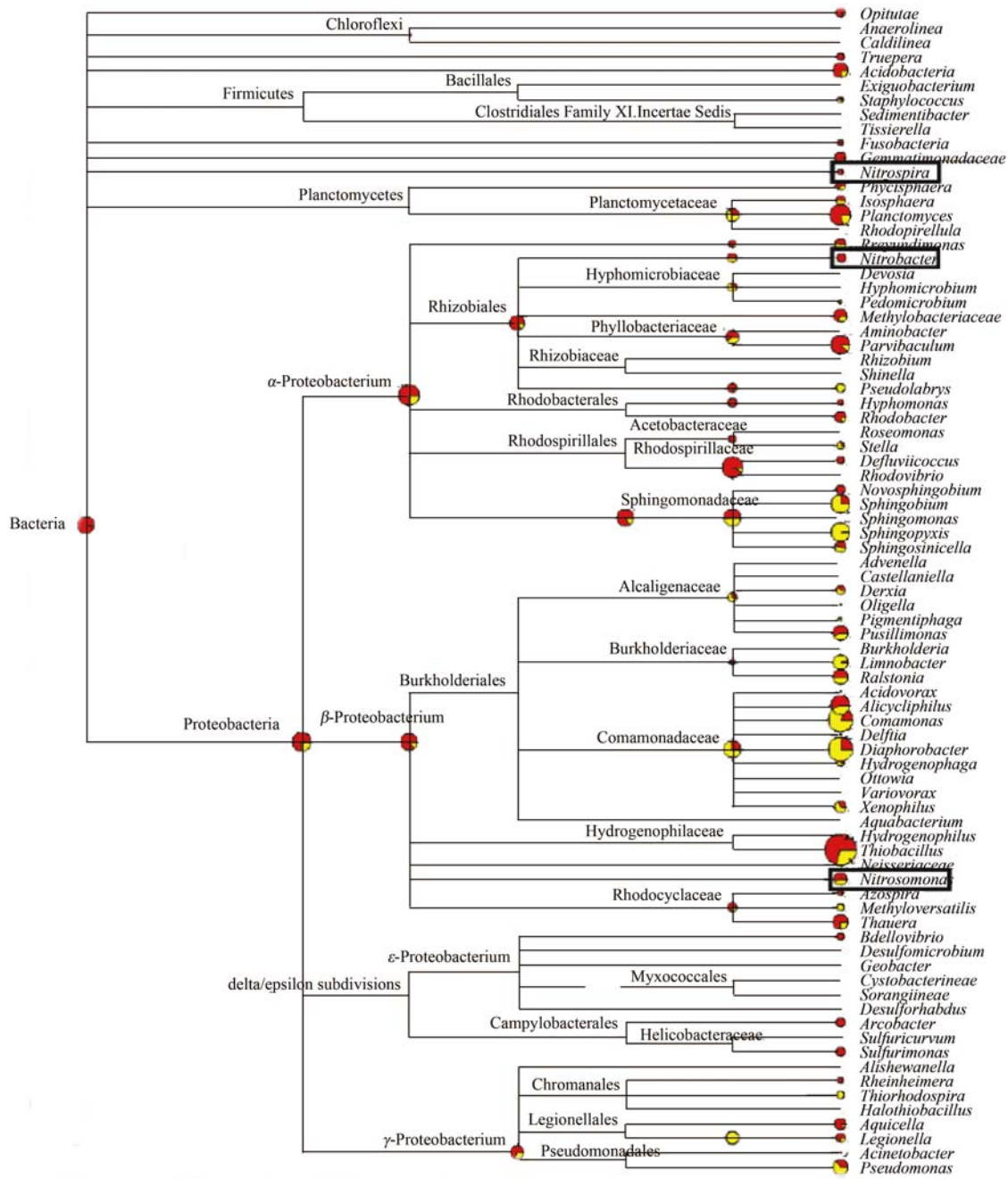
图5 典型周期内 N_2O 产生释放变化

Fig. 5 Time profiles of N_2O production and release in a typical cycle under different A/O conditions

通过氮平衡分析分别考察了一个完整周期内两个反应器中 N_2O 产生量和转化率(见表 1 和表 2). 1 号和 2 号反应器中 N_2O 产生量分别为 16.59 mg 和 3.95 mg,其转化率(即 N_2O 的产生量与 TN 的去除量之比,下同)分别为 11.47% 和 4.11%. 由此可见,在同样的运行条件下单级 A/O 系统 N_2O 的产生量是多级 A/O 系统的 4.2 倍. Hu 等^[22]的研究表明在硝化过程中 COD/N 对 N_2O 的产生有重要影响,当 COD/N 由 7.5 增加到 14.5 时, N_2O 的转化率从 6% 降低到 1.3%,同时他们分析得到这是由于在高碳氮比条件下 AOB 中的亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)的丰度大幅减少造成的.

2.4 两种 A/O 工艺条件下微生物群落特征

利用 PCR-T-RFLP 及高通量测序技术对两个反应器中活性污泥样品进行分析,其微生物群落结构如图 6 所示. 其中,彩色图饼的大小表示微生物种群在各个样品中的相对含量. 图 6 表明:1 号反应器和 2 号反应器中 AOB 的优势菌种皆为 *Nitrosomonas*,但前者的相对丰度高于后者,同时在 1 号反应器中 NOB 优势菌种为 *Nitrobacter* 和



红色：1 号反应器,黄色：2 号反应器

图 6 两种反应器中微生物的进化分支对比

Fig. 6 Evolution branches of the microorganisms in two reactors

表 1 1 号反应器N₂O产生量和转化率

Table 1 N₂O production and conversion rate of No. 1 reactor

项目	超始 TN 量/mg	结束 TN 量/mg	TN 去除量/mg	N ₂ O产生量/mg	N ₂ O转化率/%
缺氧段	251. 25	181. 5	69. 75	0. 53	0. 75
好氧段	181. 5	112. 8	68. 7	15. 35	22. 35
整个周期			138. 45	16. 59	11. 47

Nitrospira 两个菌属,2 号反应器却没有发现. 说明在 2 号反应器中,NO₂⁻ 产生量少,使 2 号反应器中 NO₂⁻ 积累少,不易于 NOB 产生,同时也不利于 AOB 的反硝化

(nitrifier's denitrification, ND),因而,2 号反应器释放的 N₂O 少^[23]. 根据 2.2 的分析也可看出,2 号反应器中的 NO₂⁻-N 波动大,存留时间短,故 NO₂⁻ 积累少.

表 2 2 号反应器N₂O产生量和转化率

Table 2 N₂O production and conversion rate of No. 2 reactor

项目	超始 TN 量/mg	结束 TN 量/mg	TN 去除量/mg	N ₂ O 产生量/mg	N ₂ O 转化率/%
循环一	184. 91	156. 84	28. 07	0. 85	3. 03
循环二	187. 06	171. 23	15. 93	0. 79	4. 96
循环三	206. 92	189. 54	17. 38	0. 80	4. 60
循环四	228. 06	212. 61	15. 45	0. 77	4. 98
循环五	251. 51	232. 35	19. 16	0. 74	3. 86
整个周期			96. 19	3. 95	4. 11

相反,在 1 号反应器中,检测出 NOB 中的优势菌种为 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira*,所以说明在 1 号反应器中 NO₂⁻ 的产生量比 2 号反应器多,为 NOB 获得基质提供了条件. 根据 2.2 节可知,在 1 号反应器的好氧区中存在一定的 NO₂⁻-N 积累,利于 NOB 的产生,因为 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 具有较小的半饱和常数^[24,25],对基质的亲和力大,争夺基质能力强,所以成为优势菌. 上述菌落分析结果也说明了在 1 号反应器中 NO₂⁻ 的产生量比 2 号反应器多,为 NOB 获得基质提供了条件. 同时,也正因为如此,也有利于 1 号反应器中的 AOB 进行反硝化,从而,产生较多的 N₂O. 而有研究表明^[26~28]: AOB 的反硝化是 N₂O 释放的重要途径,且主要源于 AOB 中的 *Nitrosomonas* 菌属. *Nitrosomonas* 菌属在好氧状态下可以同时进行硝化和反硝化反应. Shrestha 等^[29]以纯培养的 *Nitrosomonas europaea* 为研究对象,发现在有氧存在的条件下,大概有 7% 的氨氮被转化为 N₂O. 本试验中,1 号反应器中的 *Nitrosomonas* 的数量高于 2 号反应器,故产生 N₂O 的量多.

从上面分析可知,单级 A/O 工艺更有利于硝化细菌(AOB、NOB)的生长,但同时也产生更多的 N₂O 温室气体. 而多级 A/O 工艺由于较为频繁的缺氧-好氧变化,抑制了硝化细菌的生长,在一定的氨氮负荷下,并没有影响其硝化效果,但是对于高的氨氮负荷,则不宜采用多级 A/O 工艺(如氧化沟工艺),但其产生的 N₂O 量少.

3 结论

(1)对于人工模拟城市污水水质,在相同的运行条件下,单级 A/O 和多级 A/O 工艺对 COD、氨氮的去除率没有显著差别,但是单级 A/O 工艺的总氮的去除率优于多级 A/O 工艺. 对于 HRT = 12 h、SRT = 30 d、运行温度为 25℃ 左右时,前者总氮去除率为 72%,出水 TN = 7.79 mg·L⁻¹,后者总氮去除率为 52%,出水 TN = 15.58 mg·L⁻¹.

(2)单级 A/O 工艺在整个运行周期内产生的

N₂O 的量约为多级 A/O 工艺的 4.2 倍,单级 A/O 和多级 A/O 工艺中 N₂O 的转化率分别为 11.47% 和 4.11%. 且 N₂O 主要是在硝化阶段由 AOB 中的 *Nitrosomonas* 菌属产生的.

(3)单级 A/O 工艺比多级 A/O 工艺更有利于硝化细菌(AOB、NOB)的生长. 在相同的运行条件下,两工艺中 AOB 的优势菌种皆为 *Nitrosomonas*,但是单级 A/O 工艺中 *Nitrosomonas* 的相对丰度较高;单级 A/O 工艺中 NOB 的优势菌种为 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 两个菌属,其相对丰度明显高于多级 A/O 工艺.

参考文献:

[1] 耿军军,王亚宜,张兆祥,等. 污水生物脱氮革新工艺中强温室气体 N₂O 的产生及微观机理[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1729-1738.
Geng J J, Wang Y Y, Zhang Z X, et al. N₂O production and mechanism in recently developed biological nitrogen removal processes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(9): 1729-1738.

[2] 张静蓉,王淑莹,尚会来,等. 污水短程硝化反硝化和同步硝化反硝化生物脱氮中 N₂O 释放量及控制策略[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3624-2629.
Zhang J R, Wang S Y, Shang H L, et al. N₂O emission and control in shortcut nitrification and denitrification and simultaneous nitrification and denitrification biological nitrogen removal systems[J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3624-2629.

[3] Khalil M A K, Rasmussen R A, Shearer M J. Atmospheric nitrous oxide: patterns of global change during recent decades and centuries[J]. Chemosphere, 2002, 47(8): 807-821.

[4] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[5] 闫旭,李琦路,韩云平,等. pH 对污水好氧处理过程 N₂O 产生的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3240-3246.
Yan X, Li Q L, Han Y P, et al. Effect of pH value on N₂O production in aerobic wastewater treatment process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3240-3246.

[6] 刘秀红,彭轶,马涛,等. DO 浓度对生活污水硝化过程中 N₂O 产生量的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 660-664.
Liu X H, Peng Y, Ma T, et al. Effects of DO concentration on

- N_2O production during nitrification for treating domestic wastewater[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(3): 660-664.
- [7] Hu Z, Zhang J, Li S P, *et al.* Effect of aeration rate on the emission of N_2O in anoxic-aerobic sequencing batch reactors(A/O SBRs)[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **109**(5): 487-491.
- [8] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- Zhang T T, Zhang J, Yang F, *et al.* Effect of temperature on pollutant removal and nitrous oxide emission of wastewater nitrogen removal system[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- [9] 叶建锋. 废水生物脱氮处理新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Ye J F. New technologies of biological nitrogen removal in wastewater[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [10] 王晓慧. 城市污水处理厂中氨氧化菌及细菌群落结构与功能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- Wang X H. The community structures and functions of ammonia oxidizing bacteria and bacteria in wastewater treatment plant[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [11] 侯金良, 康勇. 城市污水生物脱氮除磷技术的研究进展[J]. *化工进展*, 2007, **26**(3): 366-370.
- Hou J L, Kang Y. Research progress of biological removal of nitrogen and phosphorus in municipal sewage[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, **26**(3): 366-370.
- [12] 刘艳臣. Carrousel 氧化沟单沟脱氮优化条件及其控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- Liu Y C. Study on the optimum operational condition and control strategy of the removal of nitrogen in the carrousel oxidation ditch[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [13] 郭昌梓, 陈雪梅. 一种氧化沟工艺的模拟方法[P]. 中国专利: CN102815790B, 2013-09-11.
- Guo C Z, Chen X M. Simulation device and method for oxidation ditch technique[P]. China Patent: CN102815790B, 2013-09-11.
- [14] 郭昌梓, 彭党聪, 陈雪梅, 等. 氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 910-915.
- Guo C Z, Peng D C, Chen X M, *et al.* Optimization and comparison of nitrogen and phosphorus removal by different aeration modes in oxidation ditch[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 910-915.
- [15] 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. 243-284, 368-370.
- State Environmental Protection Administration. Determination methods for examination of water and wastewater (4th ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 243-284, 368-370.
- [16] Hu Z, Zhang J, Xie H J, *et al.* Effect of anoxic-aerobic phase fraction on N_2O emission in a sequencing batch reactor under low temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(9): 5486-5491.
- [17] Blackwood C B, Marsh T, Kim S H, *et al.* Terminal restriction fragment length polymorphism data analysis for quantitative comparison of microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(2): 926-932.
- [18] Binladen J, Gilbert M T P, Bollback J P, *et al.* The use of coded PCR primers enables high-throughput sequencing of multiple homolog amplification products by 454 parallel sequencing[J]. *PLoS One*, 2007, **2**(2): e197.
- [19] Guo C Z, Fu W, Chen X M, *et al.* Nitrogen-removal performance and community structure of nitrifying bacteria under different aeration modes in an oxidation ditch [J]. *Water Research*, 2013, **47**(11): 3845-3853.
- [20] Aslan S, Miller L, Dahab M. Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(2): 659-664.
- [21] Wang Y Y, Lin X M, Zhou D, *et al.* Nitric oxide and nitrous oxide emissions from a full-scale activated sludge anaerobic/anoxic/oxic process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **289**: 330-340.
- [22] Hu Z, Zhang J, Xie H J, *et al.* Minimization of nitrous oxide emission from anoxic-oxic biological nitrogen removal process: effect of influent COD/ NH_4^+ ratio and feeding strategy [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2013, **115**(3): 272-278.
- [23] Peng L, Li Y W, Ni B J. Nitrous oxide production in completely autotrophic nitrogen removal biofilm process: a simulation study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **287**: 217-224.
- [24] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics[J]. *Water Research*, 2006, **40**(5): 887-894.
- [25] Coskuner G, Curtis T P. *In situ* characterization of nitrifiers in an activated sludge plant: detection of *Nitrobacter* spp. [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2002, **93**(3): 431-437.
- [26] Hu Z, Zhang J, Xie H J, *et al.* Identifying sources of nitrous oxide emission in anoxic/aerobic sequencing batch reactors (A/O SBRs) acclimated in different aeration rates[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2011, **49**(2): 237-245.
- [27] Terada A, Sugawara S, Yamamoto T, *et al.* Physiological characteristics of predominant ammonia-oxidizing bacteria enriched from bioreactors with different influent supply regimes [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, **79**: 153-161.
- [28] Wunderlin P, Mohn J, Joss A, *et al.* Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions [J]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1027-1037.
- [29] Shrestha N K, Hadano S, Kamachi T, *et al.* Dinitrogen production from ammonia by *Nitrosomonas europaea* [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2002, **237**(1-2): 33-39.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172