

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化

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

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 城市污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 北京市城规技术服务中心, 北京 100045)

摘要: 在连续流反应器中接种成熟好氧颗粒污泥 (AGS) 处理低氨氮污水, 通过控制溶解氧 (DO) 和出水氨氮 (NH_4^+-N) 的浓度, 研究了控制 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ (R 值) 实现连续流好氧颗粒污泥系统短程硝化的可行性和不同温度 (30、20、10℃) 条件下实现短程硝化系统对 R 值的需求。结果表明, 通过比值控制, 连续流好氧颗粒污泥系统可以快速实现短程硝化; 在 30、20、10℃ 条件下, 系统实现短程硝化所需要的 R 值分别为 $0.50 (\pm 0.05)$ 、 $0.35 (\pm 0.03)$ 和 $0.20 (\pm 0.02)$ 。因此可知, 温度越低, 系统实现短程硝化所需要的氧抑制越强。采用荧光原位杂交 (fluorescence *in situ* hybridization, FISH) 实验表明, 通过比值控制, 氨氧化菌 (AOB) 得到一定的富集, 而亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的相对数量逐渐减少。基于比值控制和污水水质的特点, 选择短程硝化的方式有所不同, 低氨氮废水选择半量亚硝化, 而高氨氮污水则选择全量亚硝化。

关键词: 低温; 短程硝化; 好氧颗粒污泥; 连续流; 比值控制

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1713-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708067

Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control

LIANG Dong-bo¹, BIAN Wei¹, KAN Rui-zhe², WANG Wen-xiao¹, ZHAO Qing¹, SUN Yi-qi¹, LI Jun^{1*}

(1. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. City Planning Technology Service Center of Beijing, Beijing 100045, China)

Abstract: Mature aerobic granular sludge (AGS) was inoculated in a continuous-flow reactor to treat low ammonia sewage, and the feasibility of achieving partial nitrification in a continuous-flow aerobic sludge system and the demand for R value (the ratio of dissolved oxygen and ammonia nitrogen) when partial nitrification is achieved at different temperatures (30, 20, and 10℃) were investigated. The control strategy was designed to maintain a constant ratio between dissolved oxygen (DO) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N). The results revealed that stable nitrification in a continuous-flow aerobic sludge reactor could be achieved via ratio control, and the value of R were $0.50 (\pm 0.05)$, $0.35 (\pm 0.03)$, and $0.20 (\pm 0.02)$ at the temperatures 30, 20, and 10℃, respectively, from which it can be concluded that stronger oxygen-limiting conditions were required when the temperature was lower. The experiment of fluorescence *in situ* hybridization (FISH) revealed that ammonia oxidizing bacteria (AOB) have a certain concentration, and the relative number of nitrite oxidizing bacteria (NOB) gradually reduced through the ratio control strategy. Based on the ratio control strategy and the characteristics of wastewater quality, full nitrification of high ammonia wastewater may be allowed; however, for low ammonia wastewater, only partial nitrification is recommended.

Key words: low temperature; partial nitrification; aerobic granular sludge; continuous-flow; ratio control

短程硝化反硝化生物脱氮工艺与传统生物脱氮工艺相比, 具有曝气量小、碱度消耗少、反应时间短、节约反硝化所需碳源、污泥产率低等优点。因此短程硝化反硝化成为废水生物脱氮的一个研究热点, 并被认为是一种可持续的污水脱氮新技术^[1~3]。

好氧颗粒污泥是在特定的环境下自发形成微生物凝聚体, 具有结构紧密、沉降性能好、耐冲击负荷能力强等优点^[4~6]。AGS 特有的空间立体结构, 有利于微生物多样性的发展。由于 AGS 特有的结

构特征, DO 质量浓度在颗粒中形成了一定的浓度梯度, AGS 表面 DO 值较高, 生长了大量好氧微生物, 内部 DO 值较低为缺氧或厌氧微生物提供了生存条件。因此可以实现同步硝化反硝化^[7,8]。由 AOB 和 NOB 还有其他一些异养菌构成的亚硝化颗

收稿日期: 2017-08-09; 修订日期: 2017-09-14

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

作者简介: 梁东博 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为低温好氧颗粒污泥短程硝化, E-mail: bjutliangdongbo@163.com

* 通信作者, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

粒污泥具有较高的稳定性而且能适应一些多变的环境条件,短程硝化生物脱氮技术与 AGS 相结合为获得稳定的短程硝化提供了新的途径。

到目前为止,许多有关 AGS 短程硝化的研究都是在实验室水平下用间歇式反应器(SBR)进行的,因为 SBR 反应器可以灵活地实现不同的控制条件,例如间歇的曝气与进水^[9-11]。但 SBR 反应器具有局限性,处理水量有限。对于大规模的污水处理厂来说,连续的运行模式是更有利的,因为它运行控制更加简单,反应所需的体积小,可以节省占地面积与基建投资。

国内外关于如何快速实现短程硝化的研究已经有很多,例如通过控制曝气时间^[12,13]、游离氨(FA)^[14]、温度^[15]、pH^[16]等。最近,比值(DO/TAN)控制成功应用于气提式生物膜反应器中并获得了稳定的短程硝化(氨氮几乎全部转化为亚硝酸盐氮)^[17]。

因此,本实验在连续流反应器内,接种在 SBR 中培养成熟的具有亚硝化功能的 AGS,研究在连续流好氧颗粒污泥工艺中应用比值控制实现短程硝化的可行性;并在可行的基础上,研究温度变化对比值控制的影响,同时利用荧光原位杂交技术对生物群落的演替进行了分析,以期为进一步推进 AGS 技术在实际工程上的应用提供一定的科学实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用装置为连续流好氧颗粒污泥反应器,如图 1 所示,反应器由有机玻璃板制成,立方体结构,主反应区有效容积为 0.8 L,沉淀容积为 1.4 L,沉淀区底部设有斜板,以收集沉淀的污泥。主反应区底部装有直径为 4 cm 的微孔曝气盘,为反应器提供溶解氧和循环动力;反应器置于控温槽中来维持恒定的温度。

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥为柱状 SBR 反应器中已经培养成熟的 AGS,平均粒径 3.0 mm,平均沉降速率 60 m·h⁻¹,接种后污泥浓度 MLSS 为 3 500 mg·L⁻¹,MLVSS/MLSS=0.7。实验用水为人工配制,模拟城镇生活污水, NH₄⁺-N(以 NH₄Cl 配制)质量浓度为 60 mg·L⁻¹,生化需氧量 COD(CH₃COONa)值为 300 mg·L⁻¹左右,磷 P(KH₂PO₄)为 4 mg·L⁻¹。根据反应器实际降解氨氮量,投加 NaHCO₃,维持反应器

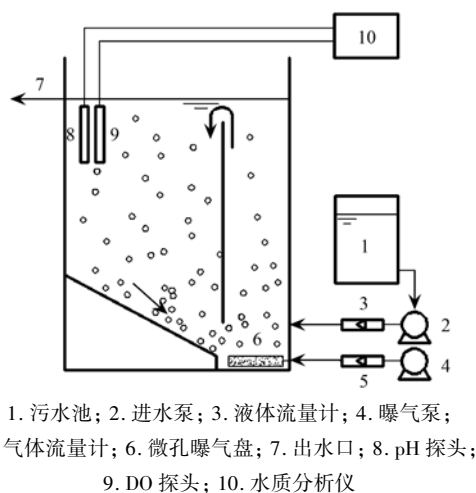


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

pH 在 7.8~8.2 之间。每 1 L 配水中添加 0.5 mL 微生物生理活动所必需的微量元素,其中微量元素成分为: FeCl₃·6H₂O 1 500 mg·L⁻¹、H₃BO₃ 150 mg·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 50 mg·L⁻¹、KI 150 mg·L⁻¹、MnCl₂·4H₂O 110 mg·L⁻¹、CoCl₂·6H₂O 150 mg·L⁻¹、Na₂MoO₄·2H₂O 60 mg·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 120 mg·L⁻¹。

1.3 实验方法

好氧颗粒污泥反应器连续运行,维持进水氨氮浓度为 60 mg·L⁻¹不变。每天定时测定 DO 和出水 NH₄⁺-N 的浓度,控制二者的比值。实验设置了不同的 R 值,探究 R 值的变化对连续流好氧颗粒污泥工艺短程硝化的影响。改变运行温度,考察不同温度下,系统实现短程硝化对 R 值的要求。实验分为 A~H 共 8 个阶段运行,具体运行情况详见表 1。

1.4 控制手段

Harremoës^[18]认为满足式(1)时,生物膜反应器会呈现氧抑制状态。

$$[DO] < \gamma_{O_2/NH_4^+} D_{NH_4^+} / D_{O_2} [NH_4^+] \quad (1)$$

式中, [DO] 和 [NH₄⁺] 为反应器中 DO 和 NH₄⁺ 质量浓度, D_{NH₄⁺} 和 D_{O₂} 为氨氮和氧气扩散系数, γ_{O₂/NH₄⁺} 为氨氮和氧气当量系数的比值。Bartroli 等^[19]的研究表明,在生物膜反应器中氧抑制是实现短程硝化的主要原因。而且 DO 和 NH₄⁺-N 均为 AOB 生长所必须的基质。因此实验通过控制 DO 和出水 NH₄⁺-N 的比值来实现连续流好氧颗粒污泥工艺的短程硝化。通过气体流量计改变曝气量来调控 DO, 通过蠕动泵改变反应器水力停留时间(HRT), 进而调控出水 NH₄⁺-N 浓度。用 R 表示 DO/NH₄⁺-N, R 值的改变

表 1 反应器运行工况					
Table 1 Operating conditions of the reactor					
阶段	温度/℃	DO/mg·L ⁻¹	出水NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	R	时间/d
A	30	8.0±0.2	10.0±0.5	0.80(±0.05)	10
B	30	7.5±0.2	15.0±0.5	0.50(±0.05)	20
C	30	8.0±0.2	10.0±0.5	0.80(±0.05)	20
D	30	7.5±0.2	15.0±0.5	0.50(±0.05)	20
E	20	7.5±0.2	15.0±0.5	0.50(±0.05)	20
F	20	7.0±0.2	20.0±0.5	0.35(±0.03)	20
G	10	7.0±0.2	20.0±1.0	0.35(±0.03)	30
H	10	5.0±0.2	25.0±1.0	0.20(±0.02)	40

既可以通过单独调整 DO 和NH₄⁺-N中的一个来实现,也可以同时调整 DO 和NH₄⁺-N. 但 R 值不变时, DO 和NH₄⁺-N的值并不是恒定不变的. 由于实验中很难精确控制 DO 和NH₄⁺-N, R 值会小幅度波动, 如图 2.

1.5 分析项目与方法
NH₄⁺-N的测定采用纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N采用麝香草酚分光光度法检测; DO、T 和 pH 的测定用 WTW 在线测定仪; MLSS 和 MLVSS 均

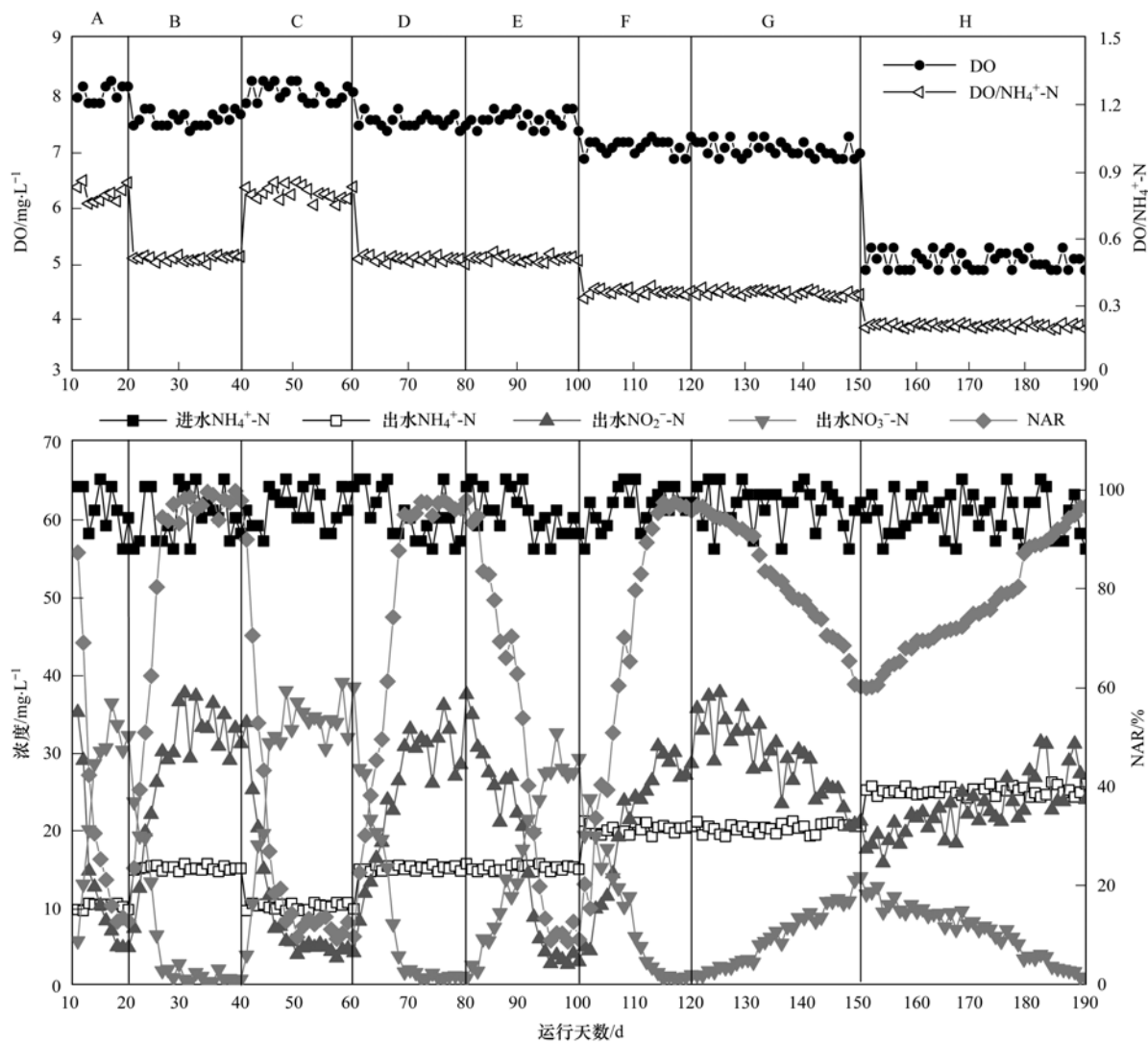


图 2 反应器运行工况
Fig. 2 Nitritation performance of the reactor

采用重量法; COD 质量浓度的测定采用 COD 快速测定仪. 亚氮积累率按式(2)计算:

$$\text{NAR} = \text{NO}_2^- \text{-N} / (\text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}) \quad (2)$$

式中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 均指由 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化而来的部分.

1.6 检测技术

采用 FISH 对好氧颗粒污泥中 AOB 和 NOB 群落关系进行分析, 具体方法见文献[20]. 采用 4% 多聚甲醛(PFA), 4℃ 条件下对污泥样品固定 2 h. 对固定后的污泥样品超声分散 4 min, 将样品滴加

在明胶包被过的载玻片上, 于空气中干燥后先后浸泡于 50%、80% 和 98% 的乙醇溶液中脱水, 每次 3 min. 将荧光标记的寡核苷酸探针溶解于杂交缓冲液中, 在 46℃ 下与污泥样品杂交 2 h. 荧光原位杂交所用的探针及对应杂交条件列于表 2, 杂交结束后, 采用 50 mL 脱缓冲液在 48℃ 下脱 15 min. 在干燥后的样品上滴加抗荧光衰减剂, 采用 FV 1200 激光共聚焦扫描显微镜对每个污泥样品拍摄照片, 随机选择 10 个视野拍摄, 用 Image plus-pro 6.0 软件对种群数量进行定量分析.

表 2 荧光原位杂交所用的探针及对应杂交条件

Table 2 Probes used for FISH and the corresponding hybridization conditions

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

2 结果与讨论

2.1 连续流好氧颗粒污泥反应器运行工况

接种从 SBR 反应器中培养成熟的 AGS 后, 将反应器置于 30℃ 的条件下, HRT 为 8 h, 连续运行. 在反应器启动阶段, AGS 的硝化性能略微降低, 原因是 AGS 从 SBR 反应器接种到连续流反应器后, 进水方式有了很大的变化. 但 AGS 很快(5~7 d)适应了连续的进水方式, 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 稳定在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, COD 的去除率达到 80%, NAR 达到 90% 以上. 说明 AGS 可以很快地适应进水方式的改变. 稳定运行 10 d 后, 反应器开始应用比值控制. 有研究表明通过数学模型模拟, 在生物膜系统中, $R < 0.8$ 时, 反应器可以实现短程硝化^[21]. Bartrolí 等^[19]的研究表明, 在连续流反应器中, 当 R 值从 0.17 提高到 0.35, 短程硝化破坏. 因此在实验开始阶段, R 值选取 0.8 对短程硝化进行破坏.

在连续流好氧颗粒污泥反应器运行过程中定期测定反应器进出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度的变化, 其结果如图 2 所示. A 阶段, 应用比值控制调整 R 值为 0.8 后, 出水硝氮的浓度提高, 达到 $32.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 短程硝化迅速被破坏, 最小 NAR 为 12.69%. 随后, B 阶段调整 R 值为 0.5, 5 d 后出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度降低至 $6.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率为 75% 左右, NAR 提高至 80.32%, 短程硝化得到恢复. 为了确定比值控制

实现连续流好氧颗粒污泥反应器实现短程硝化的稳定性, 排出偶然因素的影响, C、D 阶段的运行工况重复 A、B 阶段. 当 $R = 0.8$ 时(A、C 阶段), 短程硝化破坏, $R = 0.5$ 时(B、D 阶段)短程硝化恢复, 且效果显著, 即利用比值控制可以快速实现 AGS 在连续流反应器中的短程硝化. 为了探究不同温度下连续流好氧颗粒污泥工艺实现短程硝化对 R 值的要求, E 阶段, 将温度由 30℃ 降低至 20℃, 维持 R 值为 0.5, 短程硝化被破坏. F 阶段, 降低 R 值到 0.35, 短程硝化逐渐恢复. G 阶段, 继续降低温度到 10℃, 维持 R 值为 0.35, 短程硝化被破坏, 但破坏缓慢, NAR 最低为 59.95%. F 阶段, 降低 R 值到 0.20, 短程硝化恢复. 这说明不同温度下连续流好氧颗粒污泥系统对实现短程硝化所需要的 R 值不同.

本实验中, DO 控制在很高的水平(5~8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 短程硝化依然可以实现, 如 B、D、F、H 这 4 个阶段, 在经过一段稳定的比值控制运行后, 其 NAR 均可以达到 95% 以上. 而之前的许多研究表明, 短程硝化的实现需要维持较低的 DO 浓度. 但即使 DO 的值降低, 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度降低, 短程硝化也会被破坏, 如 C 阶段. 因此, 单单的追求低的 DO 浓度, 并不能保证短程硝化的实现, 短程硝化所需要的氧抑制条件, 还与出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度有关. 在实际工程中, 大多短程硝化的实现都是通过调节 DO 值, 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度目前还很难控

制,需要在线监测设备与自动控制等的进一步发展,这也是比值控制在实际应用过程中亟待解决的问题.

2.2 温度对比值控制实现短程硝化的影响

AOB 与 NOB 生长的最适宜温度各不相同,因此温度是短程硝化启动和稳定运行的重要影响因素,为了探究温度对连续流好氧颗粒污泥工艺比值控制实现短程硝化的影响,选取 30℃ (阶段 A ~ D)、20℃ (阶段 E ~ F)、10℃ (阶段 G ~ H) 这 3 个温度进行实验. 以不同阶段反应器进出水 NH_4^+ -N 浓度、 NO_3^- -N 浓度和 NO_2^- -N 浓度的变化为主要参数进行判断,如图 2.

可以看出,当 B、D 阶段温度为 30℃ 时,控制 R 为 0.5,短程硝化实现;当 E 阶段温度下降 10℃, R 值维持 0.5,短程硝化破坏;F 阶段 R 值调节至 0.35 时,短程硝化性能恢复. 同样地,10℃ 条件下, G 阶段维持 R 为 0.35 短程硝化破坏, H 阶段调节 R 值为 0.20,短程硝化恢复. 由此得出,温度越低实现短程硝化所需要的氧抑制就越强. Bao 等^[22]和 de Kreuk 等^[23]认为与常温条件下培养的 AGS 和普通活性污泥工艺相比,低温条件下培养成熟的 AGS 仍可以实现短程硝化. 这是因为低温条件下 AGS 内部存在温度梯度和溶解氧质量浓度梯度等,在其内部微环境下的微生物因为具有适宜的生长条件而对污染物质有较高的代谢能力. 此外, AGS 为了补偿低温条件对其生长代谢的抑制,产生冷活性酶、冷激蛋白等^[24],这些物质也会加速其对底物的

利用.

一般认为 AGS 的分层结构(外层生长 AOB, 内层生长 NOB)是其实现短程硝化的前提,因为如果 NOB 生长在 AGS 的表面,那么 NOB 可以有充足的氧来利用将 NO_2^- -N 氧化成 NO_3^- -N,破坏短程硝化. 出水 NH_4^+ -N 浓度的提高,使 AOB 有更高的氨氧化速率,从而加速了 AGS 表面氧气的消耗,而且出水 NH_4^+ -N 浓度的提高为 AOB 提供了更多的基质,使其生长速率加快,有利于 AGS 表面变得更紧密,这都使可进入 AGS 内部能被 NOB 利用的氧气变得更少,抑制 NOB 生长. 所以调小 R 值,可以使氧抑制变得更强,从而实现短程硝化.

由图 2 中可以看出, G、H 阶段,短程硝化破坏(NAR 最低为 59.95%)与恢复的速度很慢,短程硝化短时间难以被破坏,分析其原因是低温不同程度地抑制了 AOB 和 NOB 的活性,使得生化反应变得缓慢,而 AOB 更能适应低温的环境, NOB 受到很强的抑制.

2.3 FISH 结果对比

采用荧光原位杂交(FISH)技术对 C、D、F、H 这 4 个阶段典型污泥硝化菌群中的 AOB 和 NOB 的相对比例进行检测. 所有样品均取自各阶段运行的最后一天,典型结果分别如图 3 所示. 以可见光污泥总面积表征总菌,用 AOB 占可见光污泥总面积的比例表征 AOB 的相对数量, NOB 占可见光污泥总面积的比例表征 NOB 的相对数量,其中红色表示 AOB,紫色表示 NOB.

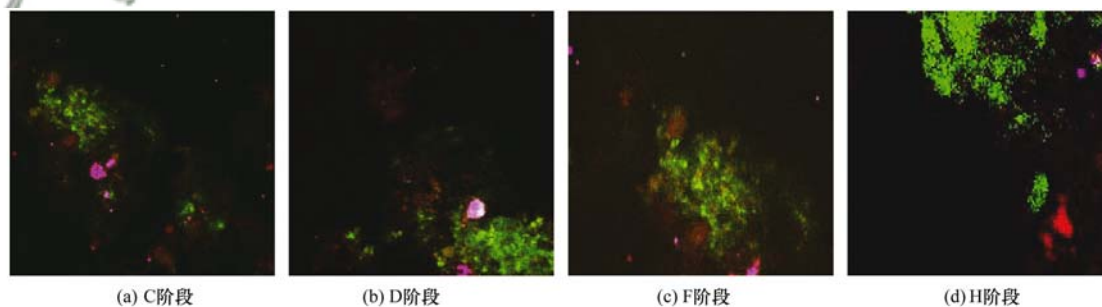


图3 FISH 检测结果

Fig. 3 Results of FISH analysis

C 阶段末期短程硝化被破坏,出水 NO_3^- -N 的浓度在 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,此时测得 AOB 约占总菌数的 13.16%, NOB 占 2.53%; D 阶段短程硝化逐渐恢复,此阶段末期出水 NO_3^- -N 的浓度仅仅为 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,此时测得 AOB 约占总菌数的 13.68%, NOB 占 2.14%; F 阶段末期出水 NO_3^- -N 的浓度也仅仅为 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,此时测得 AOB

约占总菌数的 14.33%, NOB 占 2.05%; H 阶段末期短程硝化实现后,出水 NO_3^- -N 的浓度小于 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时测得 AOB 约占总菌数的 14.21%, NOB 占 1.69%.

在整个运行过程中, NOB 始终以健康的状态存在,因为一旦运行条件不足以抑制 NOB 活性时,出水中 NO_3^- -N 浓度会立即上升,如图 2. 比值控制可

以使连续流好氧颗粒污泥系统在 NOB 存在的情况下短时间内实现短程硝化, 这个结果不同于以淘洗掉 NOB 为实现短程硝化前提的活性污泥法^[25]. 从 C 阶段到 D 阶段, 系统从全程硝化变为短程硝化并稳定一段时间. 从结果可以看到 AOB 的相对数量逐渐增加, 而 NOB 的相对数量逐渐减少, 说明通过比值控制, AOB 成为优势菌种, 如果使 NOB 长时间处在的抑制条件, 可能 NOB 将会被淘汰出去.

2.4 全量亚硝化与半量亚硝化的选择

全量亚硝化与半量亚硝化作为脱氮的前置工艺, 它们的选择取决于后续处理是接反硝化工艺还是厌氧氨氧化工艺. 全量亚硝化要求氨氮去除率接近 100%, 而半量亚硝化则大约 57%.

用连续流好氧颗粒污泥反应器处理高氨氮的污水, 全量亚硝化与半量亚硝化的工艺均可以被采用. 通过本实验的研究结果可以看出全量亚硝化是更好的选择. 高氨氮污水中氨氮的含量很高, 一般为 $500 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 如果要求氨氮的去除率为 95%, 则出水中氨氮的浓度还高于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由实验得, 在 10°C 条件下, 实现短程硝化所需的 R 值为 0.20, DO 将只需要控制在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而一般情况下污水的温度均超过 10°C , 实现短程所需要的 R 值则大于 0.20, 因此控制 DO 值可以超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 用连续流好氧颗粒污泥工艺处理高氨氮的污水即使在低温环境也很容易以比值控制的方式实现.

然而, 全量亚硝化并不适用于处理低氨氮的污水. 处理低氨氮污水经常用半量亚硝化化工艺^[26], 污水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度通常在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 因此在亚硝化接好氧的工艺时是不经济的. 如果亚硝化出水中的氨氮浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即使在 30°C 时, 短程硝化所需要的 R 值为 0.5, 此时需要控制的 DO 浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 对于 AGS 来说, 首先低溶解氧会使硝化速率降低, 硝化反应整体时间会变长, 从而增大反应器体积, 使基建投资提高, 并且低溶解氧状态下, 活性污泥易解体 and 发生丝状菌膨胀^[27]. 其次, 因为出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 控制在一个很低的水平, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的波动会使比值变化很大, 不利于控制, 更不利于维持稳定的短程硝化. 因此, 半量亚硝化更适合处理低氨氮的污水. 正如前边所讨论的, 在 20°C 以上, 半量亚硝化所要求的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度可高达 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这时可以控制 DO 浓度在 $7.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甚至在 10°C 在出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 也可以控制在 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可

以保证 AGS 稳定所需要的曝气量. 即使在低温条件下, 半量亚硝化也可以实现, 如 G 阶段, 与厌氧氨氧化工艺相结合, 则只需对厌氧氨氧化工艺进行控温, 可以节省能耗. 但是, 将短程硝化与厌氧氨氧化应用到低氨氮污水的处理当中, 首先要解决的问题是如何控制半量亚硝化的反应终点.

3 结论

(1) 在连续流好氧颗粒污泥工艺中, 可以利用 $\text{DO}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比值控制短程硝化实现, 即使高溶解氧条件下, 通过调控出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度也可以实现短程硝化.

(2) 在 30°C 、 20°C 和 10°C 时, 分别在 R 为 0.5、0.35 和 0.20 时实现了短程硝化, 且随着温度降低, R 值变小. 在不同温度下实现连续流好氧颗粒污泥反应器短程硝化是可行的; 氧抑制可弥补温度下降对短程硝化的不利影响, 温度越低, 实现短程硝化所需氧抑制越强.

(3) 比值控制可以在没有淘洗掉 NOB 的情况下在短时间内实现短程硝化.

(4) 全量亚硝化工艺更适合处理高氨氮负荷的污水, 而半量亚硝化适合处理低氨氮负荷的污水.

参考文献:

- [1] Turk O, Mavinic D S. Maintaining nitrite build-up in a system acclimated to free ammonia [J]. *Water Research*, 1989, **23** (11): 1383-1388.
- [2] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Long-term effect of dissolved oxygen on partial nitrification performance and microbial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (11): 2796-2802.
- [3] Turk O, Mavinic D S. Benefits of using selective inhibition to remove nitrogen from highly nitrogenous wastes [J]. *Environmental Technology Letters*, 1987, **8**(1-12): 419-426.
- [4] Liu Y, Yang S F, Xu H, *et al.* Biosorption kinetics of cadmium (II) on aerobic granular sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2003, **38**(7): 997-1001.
- [5] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究 [J]. *环境科学*, 1999, **20**(2): 39-41.
Zhu J R, Liu C X. Cultivation and physic-chemical characteristics of granular activated sludge in alternation of anaerobic/aerobic process [J]. *Environmental Science*, 1999, **20**(2): 39-41.
- [6] 杨麒, 李小明, 曾光明, 等. SBR 系统中同步硝化反硝化好氧颗粒污泥的培养 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 94-98.
Yang Q, Li X M, Zeng G M, *et al.* Cultivation of aerobic granular sludge for simultaneous nitrification and denitrification in SBR system [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(4): 94-98.
- [7] Liu Y Q, Tay J H. Characteristics and stability of aerobic granules cultivated with different starvation time [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **75**(1): 205-210.

- [8] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, **91**(1): 168-175.
- [9] Winkler M K H, Kleerebezem R, Kuenen J G, *et al.* Segregation of biomass in cyclic anaerobic/aerobic granular sludge allows the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria at low temperatures [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7330-7337.
- [10] Third K A, Sliekers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2001, **24**(4): 588-596.
- [11] Zhang J B, Zhou J, Han Y, *et al.* Start-up and bacterial communities of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) for treatment of high strength ammonia wastewater [J]. Bioresource Technology, 2014, **169**: 652-657.
- [12] Gao D W, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Shortcut nitrification-denitrification by real-time control strategies [J]. Bioresource Technology, 2008, **100**(7): 2298-2300.
- [13] 彭永臻, 杨岸明, 李凌云, 等. 短程硝化最优曝气时间控制与硝化种群调控 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, **45**(2): 101-105.
Peng Y Z, Yang A M, Li L Y, *et al.* Optimal control of aeration duration and nitrifying population regulation for partial nitrification [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, **45**(2): 101-105.
- [14] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. Water Research, 2007, **41**(4): 826-834.
- [15] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, *et al.* Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration [J]. Bioresource Technology, 2012, **126**: 283-289.
- [16] Zhang C S, Zhang S Q, Zhang L Q, *et al.* Effects of constant pH and unsteady pH at different free ammonia concentrations on shortcut nitrification for landfill leachate treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(8): 3707-3713.
- [17] Fabregat A, Bengoa C, Font J, *et al.* Reduction, modification and valorisation of sludge (REMOVALS) [M]. London: IWA Publishing, 2011. 54.
- [18] Harremoes P. Criteria for nitrification in fixed film reactors [J]. Water Science and Technology, 1982, **14**(1-2): 167-187.
- [19] Bartolí A, Pérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(23): 8930-8935.
- [20] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. Journal of Bacteriology, 1990, **172**(2): 762-770.
- [21] Pérez J, Costa E, Kreft J U. Conditions for partial nitrification in biofilm reactors and a kinetic explanation [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, **103**(2): 282-295.
- [22] Bao R L, Yu S L, Shi W X, *et al.* Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(2-3): 1334-1340.
- [23] de Kreuk M K, Pronk M, van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures [J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4476-4484.
- [24] Gerday C, Aittaleb M, Arpigny J L, *et al.* Psychrophilic enzymes: a thermodynamic challenge [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure and Molecular Enzymology, 1997, **1342**(2): 119-131.
- [25] Jubany I, Lafuente J, Baeza J A, *et al.* Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on oxygen uptake rate measurements [J]. Water Research, 2009, **43**(11): 2761-2772.
- [26] Laurent M, Falås P, Robin O, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures [J]. Water Research, 2016, **101**: 628-639.
- [27] Laanbroek H J, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* grown in mixed continuous cultures [J]. Archives of Microbiology, 1993, **159**(5): 453-459.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)