

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

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

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO₂ 数据筛分及浓度特征研究 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O₃/H₂O₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢201、304和316L在模拟污水管道反应器中的腐蚀 鲍国栋, 左剑丞, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中Cu化学形态的影响 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和N₂O排放的关系 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤N₂O产生的不同过程及贡献 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田CH₄和N₂O排放及其全球增温潜势的影响 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米ZnO对玉米的生物效应 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素B₆对脱氯功能蓝藻降解2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鮓 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒MS2存活的影响 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对Pb(II)的吸附动力学与机制 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应:以COD减排为例 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究

李亚峰, 马晨曦*, 张驰

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 研究基质质量浓度、温度、pH 值、HRT 和 C/N 比对厌氧氨氧化脱氮性能的影响。试验水样采用污泥脱水液, 控制进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 为 1:1.32, 分别考察了在不同基质质量浓度、HRT、温度、pH 值和 C/N 比的情况下, UASBB 厌氧氨氧化反应器的脱氮性能。结果表明, 在进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 质量浓度分别为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $264 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、HRT = 24 h、温度为 30 ~ 35°C、pH 值为 7.5 ~ 8.5、C/N 比在 0.5 左右的条件下, 厌氧氨氧化反应器的脱氮效果最佳, NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 TN 平均去除率分别达到 75.72%、76.36% 和 70.19%, TN 平均容积负荷可达 $0.464 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, COD 平均去除率在 30% 左右。通过合理控制进水基质质量浓度和 HRT 能够有效地提高厌氧氨氧化反应器的脱氮性能。只有在适宜的温度和 pH 值范围内, 厌氧氨氧化菌才能表现出较高的活性。当进水添加有机物时, 厌氧氨氧化反应器中存在反硝化现象, 且随着有机物质量浓度的升高, 异养反硝化菌的竞争优势逐渐增强, 对厌氧氨氧化产生明显的抑制作用。

关键词: 厌氧氨氧化; UASBB; 污泥脱水液; 基质质量浓度; HRT; 温度; pH 值; C/N 比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3044-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.08.030

Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB

LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The effect of ammonia nitrogen concentration, temperature, pH, HRT and C/N ratio on ANAMMOX was studied. The reactor was fed with sludge liquor. The efficiency of nitrogen removal for the UASBB was researched under different ammonia nitrogen concentration, HRT, temperature, pH and C/N ratio when the influent $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ was controlled at 1:1.32. The results showed that the nitrogen removal rate for the ANAMMOX reactors was optimal when the influent NH_4^+-N and NO_2^--N concentrations were $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $264 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT was 24 h, temperature was in the range of 30-35°C, pH was at 7.5-8.5 and the C/N ratio was 0.5. The average removal rates of NH_4^+-N , NO_2^--N and TN were 75.72%, 76.36% and 70.19%, respectively, the average TN was $0.464 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ and the removal rate of COD was 30%. The efficiency of nitrogen removal for the ANAMMOX reactors could be enhanced by controlling ammonia nitrogen concentration and HRT. The efficiency of ANAMMOX bacteria was optimal when temperature and pH were suitable. The denitrification occurred in the ANAMMOX reactors when the influent contained organics. The inhibition of denitrification bacteria on the ANAMMOX increased with rising concentration of organics.

Key words: ANAMMOX; UASBB; sludge liquor; ammonia nitrogen mass concentration; HRT; temperature; pH; C/N ratio

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX) 是目前公认的最简捷和最经济有效的新型废水生物脱氮技术之一, 自 20 世纪 90 年代中期问世以来便受到广泛关注^[1,2]。与 A^2/O 、 A/O 、氧化沟、SBR 法等传统硝化-反硝化生物脱氮工艺相比, ANAMMOX 在节能降耗方面表现出如下突出的优势^[3~5]: ①处理效率高, 对实际低 C/N 比废水的最大氮去除速率高达 $9.5 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 实验室规模的 ANAMMOX 反应器的最高氮去除速率 (以 N 计) 可达 $76.5 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; ②无需额外投加有机碳源作电子供体, 可以降低 30% 左右的运行费用, 同时避免了二次污染问题; ③每氧化 1 mol NH_4^+-N 只需消耗 0.75 mol 氧, 动力消耗可降低约 62.5%; ④生物产酸量大为减少, 产碱量降为 0, 节省了投加

中和试剂的费用; ⑤污泥产率系数仅为 0.08, 污泥产量可减少 90% 以上, 大量节约了污泥后续处理和处置的成本。

然而由于厌氧氨氧化菌生长极其缓慢、倍增时间较长 (比增殖速率仅为 0.03 h^{-1} , 即世代时间长达 11 d)、对环境条件的敏感度高 (严格厌氧、避光、毒性物质、有机物等)、体积小易流失, 导致启动

收稿日期: 2013-11-15; 修订日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108277); 住房和城乡建设部科技攻关项目 (2011-K7-8); 辽宁省教育厅项目 (L2012203); 格平绿色助学行动辽宁环境科研-123 工程资助项目; 辽宁省大学生创新创业训练计划项目 (201210153025)

作者简介: 李亚峰 (1960 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: yafengli88@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: 789654123zxcvbn@sina.com

ANAMMOX 过程的周期相当漫长,直接制约了该技术的工程化应用进程^[6,7]。近年来,国内外关于 ANAMMOX 的影响因素的研究已经取得了一定的进展,但所得出的结论相差较大^[8-14]。此外,试验水样多采用实验室配水,而对于处理实际低 C/N 比废水的研究还不够深入^[15-18]。针对这一现状,笔者以污泥脱水液作为处理对象,采用升流式厌氧污泥床(UASB)反应器,并在反应区放置组合式双环填料,将其改进成升流式厌氧生物膜(UASBB)反应器,使活性污泥法与生物膜法相结合,提高了 UASBB 反应器的生物截留能力,研究了基质质量浓度、HRT、温度、pH 值和 C/N 比对 ANAMMOX 脱氮性能的影响,以期 ANAMMOX 工艺的的稳定运行和实际工程应用提供参考依据和技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验用水与接种污泥

试验用水为沈阳北部污水处理厂污泥脱水液,

表 1 试验用水水质

Table 1 Quality examination of test water

COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	pH 值
30 ~ 120	60 ~ 250	80 ~ 350	4 ~ 6	7.5 ~ 8.5

表 2 接种污泥的理化特性

Table 2 Initial characteristics of the seeding sludge

pH 值	颜色	MLSS/g·L ⁻¹	MLVSS/g·L ⁻¹	MLVSS/MLSS
6.5 ~ 7.0	深褐色	0.416 2	0.312 2	0.75

并根据需要投加 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、KH₂PO₄、NaHCO₃、MgSO₄·7H₂O、CaCl₂·2H₂O 和自来水等进行调节,按需配置,以保证各污染因子达到所需质量浓度,试验用水水质见表 1。且每 L 水样中加微量元素营养液①和②各 1 mL。两种营养液的成分分别为:① EDTA 5.000 g·L⁻¹, FeSO₄ 5.000 g·L⁻¹; ② EDTA 15.000 g·L⁻¹, MnCl₂·4H₂O 0.990 g·L⁻¹, ZnSO₄·7H₂O 0.430 g·L⁻¹, CoD₂·6H₂O 0.240 g·L⁻¹, CuSO₄·5H₂O 0.250 g·L⁻¹, NaMoO₄·2H₂O 0.220 g·L⁻¹, NiCl₂·6H₂O 0.190 g·L⁻¹, H₃BO₄ 0.014 g·L⁻¹。接种污泥取自沈阳北部污水处理厂厌氧消化池,其部分理化特性见表 2。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,UASBB 反应器由有机玻璃制成,呈圆柱形。下部为反应区,内径 8 cm,高 80 cm,总容积 4 L,距底部 25 cm 以上部分挂有组合式双环填料。反应区外部设有水浴套管,由恒温热水循环系统控制温度。上部为沉淀区,直径 15 cm,高

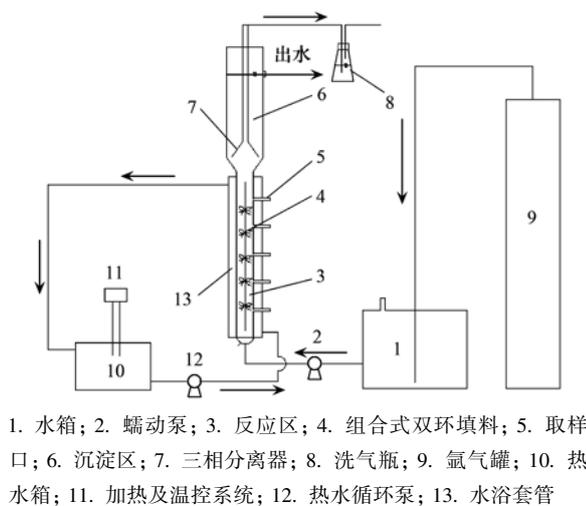


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

45 cm,总容积 8.1 L。沿柱高方向均匀设有 5 个取样口。反应器下部用黑布包裹,使 ANAMMOX 菌避

光生长。进水水箱每次配水后以高纯氩气脱氧 30 min,控制 DO 在 (0.2 ± 1) mg·L⁻¹ 左右,并加盖密封,为 ANAMMOX 菌创造良好的厌氧环境。反应器底部设有均匀布水系统,试验用水依靠蠕动泵连续泵入,出水为重力流,反应产生的气体经三相分离器后排出。

本试验采用的组合式双环填料由宜兴市南泰水处理填料厂生产,如图 2 所示。其基本结构



图 2 组合式双环填料

Fig. 2 The combination wad

是以双圈大塑料环为骨架,负载着紧固的涤纶丝,内圈是雪花状塑料枝条. 填料单元直径 150 mm,纤维束长度 160 mm,片距 80 mm,密度 1.02,抗拉强度 $6.8 \sim 7.1 \text{ g} \cdot \text{单丝}^{-1}$,伸长率 4%. 该组合填料具有疏水性,不但机械性能和化学性能优良,抗生物降解,而且吸附能力和截留作用较强,可以有效地防止系统内菌种的大量流失,同时降低出水中悬浮物的含量.

试验前,该反应器在进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度为 $30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})/\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 控制在 1.32 左右的条件下,经过 120 d 的连续运行,成功启动了 ANAMMOX 过程并稳定运行半年, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 平均去除率均维持在 50% 以上,去除的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 及生成的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 三者之间的比值约为 1:1.54:0.3,与 Strous 等^[19] 的报道接近. 在组合填料表面通过肉眼可以观察到污泥附着生长,并形成一层致密的红褐色生物膜. 通过 2 000 倍 SEM 扫描电镜观察发现,在驯化成熟的 ANAMMOX 颗粒污泥中,ANAMMOX 菌多呈不规则的椭球状和短杆状,形态清晰可辨,结构密实紧凑,如图 3 所示. UASBB 反应器中的生物量主要集中在反应区下部,上部组合填料挂膜量相对较少,从反应器下部取样口取样测定,其中 SS 为 $20.54 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS 为 $10.68 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS/SS 为 0.52.

1.3 分析方法

本试验的各项指标均按照文献[20]中规定的方法进行检测分析,见表 3.

2 结果与分析

2.1 基质质量浓度的影响

控制温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, HRT = 24 h, pH 值为

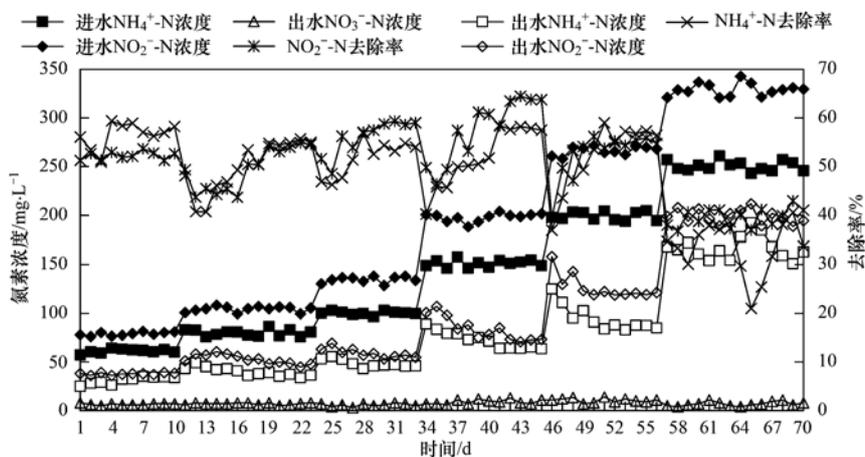


图 4 基质质量浓度对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除效果的影响

Fig. 4 Influence of ammonia nitrogen mass concentration on $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$ removal effects

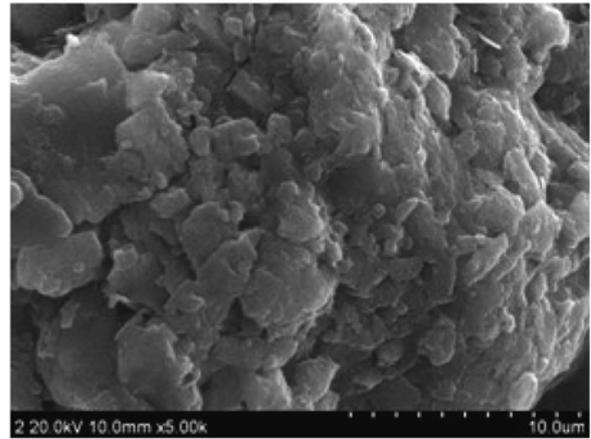


图 3 微生物扫描电镜照片

Fig. 3 SEM micrograph of the microorganisms

表 3 水质检测项目及分析方法

Table 3 Examination items of water quality and test methods	
检测项目	分析方法或仪器
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	紫外分光光度法
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	N-(1-萘基)-乙二胺光度法
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	纳氏试剂分光光度法
TN	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	钼锑抗分光光度法
COD	快速密闭催化消解法
MLSS、MLVSS、SS、VSS	标准重量法
pH 值	PHS-29A 型酸度计
DO	HACH sension 8 型溶解氧测定仪

7.5 ~ 8.5, 初始进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度依次为 60、80、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 之后以 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的质量浓度梯度逐步提高, 同时保证 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})/\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 始终在 1.32 左右, 每个工况稳定运行 7 d 后进行下一浓度值的试验, 直至出水水质明显恶化后停止试验. 试验结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 5 可以看出, 在整个试验阶段, 随着进水基质质量浓度逐渐提高, TN 平均容积负荷由

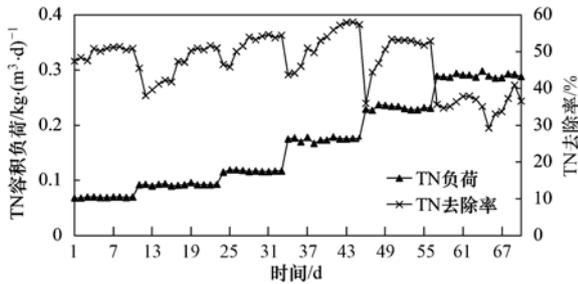


图5 基质质量浓度对 TN 负荷及 TN 去除率的影响

Fig. 5 Effect of ammonia nitrogen mass concentration on TN load and removal rate

$0.069 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 升高到 $0.290 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 当进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 每次提高进水基质质量浓度后, 经过短暂的适应期 (3 ~ 6 d), ANAMMOX 反应器的脱氮效果基本能够恢复到上一阶段的水平, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 TN 平均去除率分别达到 52.44%、53.47% 和 49.82%. 这可能是由于高基质质量浓度促进了 ANAMMOX 菌的大量富集, 使得菌种的活性得到进一步提高. 张树德等^[15]研究表明, 适当提高 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度在一定程度上有利于提高 ANAMMOX 的反应速率, 这与本试验结论基本一致.

当进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 TN 去除效果均大幅下降, 平均去除率分别只有 33.44%、39.47% 和 35.74%, 且在两周的调试运行过程中未见明显恢复. Dapena-Mora 等^[6]研究表明, ANAMMOX 菌对 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的敏感度要高于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. 由于 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 本身就是生物毒性物质, 高质量浓度的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 会对 ANAMMOX 菌产生较强的毒害作用, 干扰其正常生理代谢. 据 Strous 等^[16]的报道, 当进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度超过 $280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX 会受到明显的抑制. 而在本试验的最后一个阶段, 进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度已经高达 $329 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 早已超出了最适进水基质质量浓度范围, 因此 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的抑制作用可能是导致 ANAMMOX 反应器的脱氮效果严重恶化的主要原因.

2.2 HRT 的影响

控制进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度分别在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 温度为 $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$, pH 值为 7.5 ~ 8.5. 依次调节 HRT 分别至 48、36、24、12 和 6 h, 每个工况运行 14 d. 试验结果如图 6 和图 7 所示.

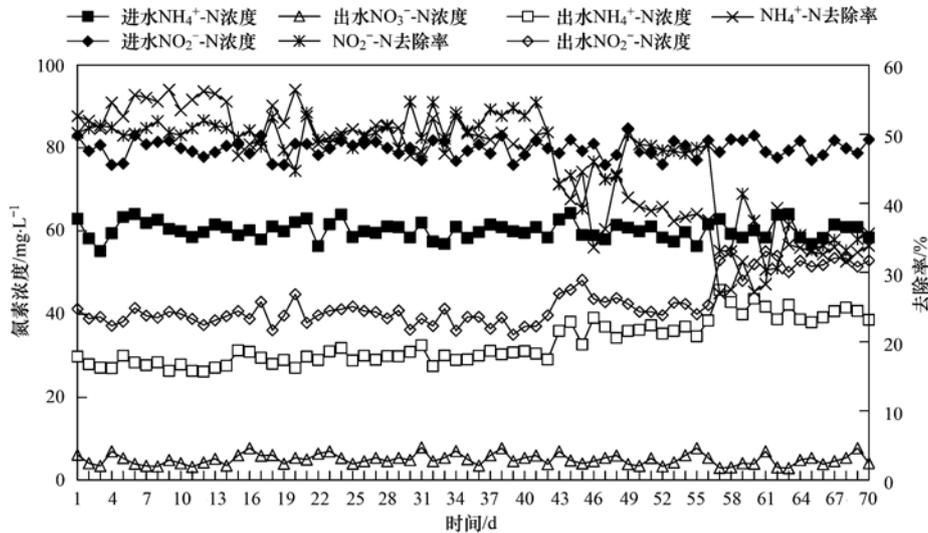


图6 HRT 对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除效果的影响

Fig. 6 Influence of HRT on $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$ removal effects

由图 6 和图 7 可以看出, 在 HRT 从 48 h 减小到 24 h 的过程中, TN 平均容积负荷由 $0.072 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 升高到 $0.139 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 TN 平均去除率均稳定在 50% 左右. 当 HRT 小于 24 h 时, 随着 HRT 的缩短, 尽管 TN 平均容积负荷进一步大幅提高, 但 ANAMMOX 反应器的

脱氮效果开始明显变差. 当 HRT = 6 h 时, 出水水质严重恶化, 且连续运行 14 d 并未得到改善, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 平均出水质量浓度分别高达 $40.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $52.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 平均去除率仅为 30.72%.

随着 HRT 的缩短, ANAMMOX 菌没有足够的时

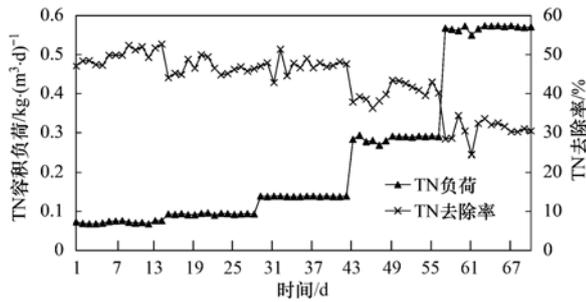


图7 HRT对TN负荷及TN去除率的影响

Fig. 7 Effect of HRT on TN load and removal rate

间对氮素进行氧化降解。同时,HRT过短会造成出水中菌种的流失量显著增加,由于ANAMMOX菌细胞产率极低 $[m(\text{VSS})/m(\text{NH}_4^+-\text{N})=0.11\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}]^{[17]}$,其增殖速率无法及时补充其流失量。此外,在HRT过短的情况下,ANAMMOX反应器中出现短流现象,这也是导致ANAMMOX的脱氮效果大幅下降的重要原因之一^[18]。因此,为了保证ANAMMOX反应器高效运行,同时获得尽量高的氮素去除率,应将HRT控制在24 h左右。游少鸿等^[4]研究发现,当温度为 $(35\pm 1)^\circ\text{C}$ 时,ASBR厌氧氨氧化反应器的最佳HRT为12 h,该结果较作者的试验结果略偏低,这可能是因为在较高温度条件下,ANAMMOX的反应速率偏高,从而缩短了最佳HRT。

2.3 温度的影响

控制进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 质量浓度分别在 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,HRT=24 h,pH值为7.5~8.5。依次调节温度分别至15、20、25、30、35和 40°C 。试验结果如图8所示。

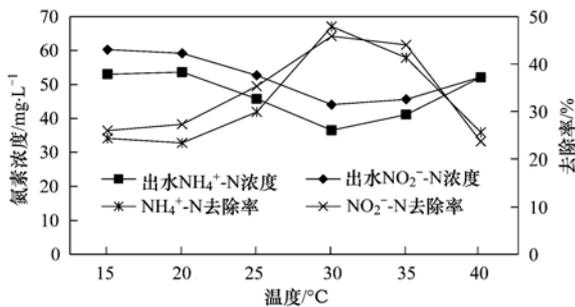


图8 温度对ANAMMOX的影响

Fig. 8 Effect of temperature on ANAMMOX

由图8可以看出,当温度低于 20°C 时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率均在30%以下。当温度在25~ 30°C 范围内时,随着温度的升高,ANAMMOX反应器的脱氮效果显著提高。当温度为 30°C 时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率分别可达47.94%和45.90%。当温

度为 35°C 时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率有所下降,但降幅不明显。而当温度升高到 40°C 时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率分别只有25.62%和23.71%。

ANAMMOX菌是一种嗜温型细菌,当温度低于 30°C 时,低温使得菌种的细胞膜呈凝胶状而阻碍了营养物质的跨膜运输,最终细胞因“饥饿”而造成酶促反应的活性降低,ANAMMOX不能高效进行^[21]。随着温度升高,一方面酶促反应加速,另一方面生化反应酶活性的丧失也相应加速,当温度为30~ 35°C 时,两种倾向趋于平衡,菌种的活性最大。当温度高于 35°C 时,高温使得菌种细胞内的温度敏感组分变性,甚至会导致细胞溶解,菌体失活。相关文献表明^[16,22],ANAMMOX的活化能约为 $70\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,而普通废水生物处理过程的活化能通常在 $8.4\sim 83.7\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,因此ANAMMOX能够顺利进行的最适温度要高于一般生物脱氮工艺。综上所述,ANAMMOX反应的最适温度范围为30~ 35°C 。

2.4 pH值的影响

控制进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 质量浓度分别在 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,温度为 $(30\pm 1)^\circ\text{C}$,HRT=24 h。以盐酸和氢氧化钠溶液依次调节pH值分别为6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5和9.0。试验结果如图9所示。

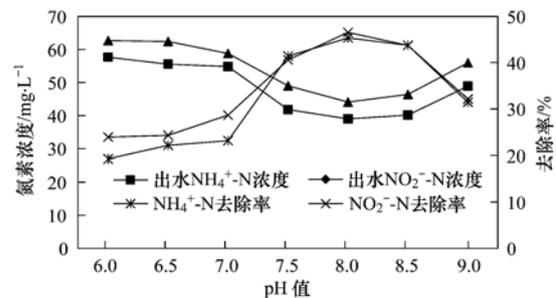


图9 pH值对ANAMMOX的影响

Fig. 9 Effect of pH on ANAMMOX

由图9可以看出,当pH值小于7.0时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 平均去除率仅为20%左右。当pH值在7.5~8.0范围内时,随着pH值的升高,ANAMMOX反应器的脱氮效果显著提高。当pH值为8.0时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率分别达到45.36%和46.54%。当pH值为8.5时,ANAMMOX反应器的脱氮效果略有下降。而当pH提高到9.0时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率分别降低了12.93%和14.38%,降幅比较明显。

van de Graaf等^[23]研究认为,ANAMMOX的反应机制在于中间产物羟胺的生成与转化,而pH值

对羟胺的生成影响较大,因此 pH 值过高或过低均不利于 ANAMMOX 的顺利进行. 一方面 pH 值通过破坏 ANAMMOX 菌细胞内的电解平衡,从而直接影响菌种的活性,甚至能否存活. 另一方面,pH 值通过影响氨和亚硝酸盐两种反应基质的存在形式,进而影响其解离产物游离氨 (FA) 浓度和游离亚硝酸 (FNA) 浓度. 依据 Mosquera-Corral 等^[24]的理论,FA 和 FNA 对 ANAMMOX 菌的抑制作用分别是 pH 值过高和 pH 值过低条件下 ANAMMOX 反应器的脱氮性能降低的主要原因. 综上所述,ANAMMOX 反应的最适 pH 值范围为 7.5 ~ 8.5.

2.5 C/N 比的影响

控制进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度分别在 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, HRT = 24 h, pH 值为 7.5 ~ 8.5. 以葡萄糖作为有机碳源,控制 $m(\text{COD})/m(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 依次为 0、0.5、1.0、1.5 和 2.0. 试验结果如图 10 和图 11 所示.

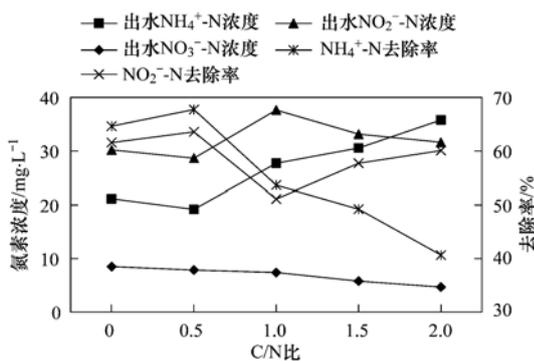


图 10 C/N 比对 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除效果的影响

Fig. 10 Effect of C/N ratio on NH_4^+ -N and NO_2^- -N removal

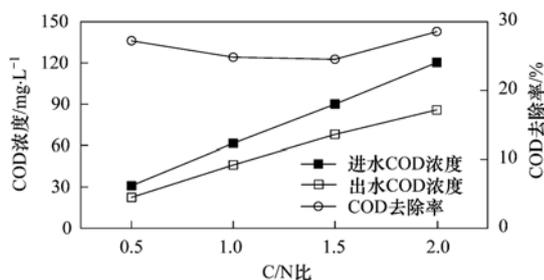


图 11 C/N 比对 COD 去除效果的影响

Fig. 11 Effect of C/N ratio on COD removal

由图 10 和图 11 可以看出,在未添加有机物的情况下, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率分别为 64.60% 和 61.54%. 当 C/N 比为 0.5 时, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率分别有所提高. 但当 C/N 比为 1.0 时, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除效果开始明显下降. 当 C/N 比大于 1.5

时, NO_2^- -N 去除率呈升高趋势, NH_4^+ -N 去除率则进一步大幅下降. 当 C/N 比为 2.0 时, NO_2^- -N 去除率达到 60.08%, 而 NH_4^+ -N 去除率仅为 48.39%. 整个试验阶段,随着 C/N 比的提高, COD 去除率变化幅度较小,始终稳定在 25% ~ 27% 之间.

当 C/N 比小于 0.5 时,低质量浓度的有机物并未对 ANAMMOX 菌的活性产生影响. Guven 等^[14]研究认为,适量质量浓度的葡萄糖可以促进 ANAMMOX 菌的增殖,从而提高 ANAMMOX 的反应速率. 当 C/N 比大于 1.0 时,ANAMMOX 反应器的脱氮性能显著降低, NH_4^+ -N 去除量/ NO_2^- -N 去除量之比偏离 1:1.32 而减小, NH_4^+ -N 去除量/ NO_3^- -N 生成量之比偏离 1:0.26 而增大. 分析氮素的转化情况,认为此时由于有机物的大量存在发生了以 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 为电子受体的异养反硝化反应, COD 去除量的增加和 NO_3^- -N 生成量的减少也充分证明了反硝化菌的大量增殖成为优势种群,反硝化作用明显加强.

一方面,一定质量浓度有机物的存在会引起自养 ANAMMOX 菌和异养反硝化菌之间对电子受体 NO_2^- -N 的竞争^[25]. 由于 ANAMMOX 和反硝化反应的吉布斯自由能分别为 $-335 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $-472 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,反硝化过程更容易发生,同时反硝化菌的生长速率远大于 ANAMMOX 菌. 因此,随着 C/N 比的不断升高,在争夺反应基质的过程中,反硝化菌的优势逐渐增强. 另一方面,反硝化过程因产碱引起反应体系的 pH 值升高,超出 ANAMMOX 菌生长代谢的最适 pH 值范围,菌种的活性受到明显的抑制^[26]. 综上所述,为了获得最佳脱氮效果,应将 C/N 比控制在 0.5 左右.

3 最优工况下 ANAMMOX 反应器的稳定运行

控制进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度分别在 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $264 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,温度为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$, HRT = 24 h, pH 值为 7.5 ~ 8.5. 以葡萄糖作为有机碳源,控制 C/N 比为 0.5. ANAMMOX 反应器在最优工况下稳定运行 14 d,试验结果如图 12 所示.

由图 12 可以看出,在最优运行工况下, ANAMMOX 反应器能够实现高效稳定进行, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 TN 平均去除率分别达到 75.72%、76.36% 和 70.19%, COD 平均去除率在 30% 左右, TN 平均容积负荷为 $0.464 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

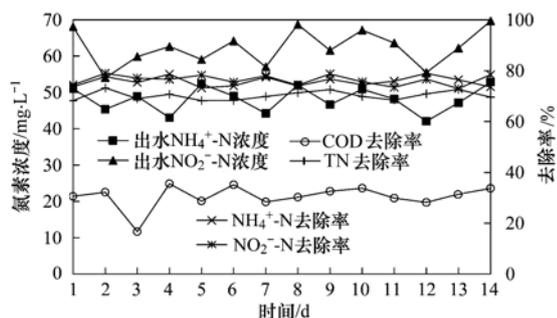


图 12 最优工况下稳定运行的 ANAMMOX 效果

Fig. 12 Nitrogen removal effect of ANAMMOX under optimal working conditions

4 结论

(1) 通过逐渐提高进水基质质量浓度, 可以显著提高 ANAMMOX 反应器的 TN 容积负荷, 但 NO_2^- -N 质量浓度过高会对 ANAMMOX 菌产生毒害作用, 使其生理活性降低. 当进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度分别为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $264 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX 反应器的脱氮性能比较理想.

(2) HRT 过短会导致 ANAMMOX 反应不能彻底进行, 对氮素的去除效果较差. HRT 过高又会造成 TN 负荷较低. 当 HRT 为 24 h 左右时, ANAMMOX 反应器的脱氮性能最佳.

(3) 在较低的温度范围内, 随着温度的升高, ANAMMOX 菌的活性提高. 但超过一定的温度范围, ANAMMOX 菌的生长繁殖受到严重抑制, ANAMMOX 反应器的脱氮效果大幅降低. ANAMMOX 反应的最适温度范围为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$.

(4) pH 值一方面通过对 ANAMMOX 菌活性的影响, 另一方面通过对游离氨 (FA) 浓度和游离亚硝酸 (FNA) 浓度的影响, 进而影响 ANAMMOX 反应器的脱氮效果. ANAMMOX 反应的最适 pH 值范围为 $7.5 \sim 8.5$.

(5) 较低的 C/N 比不会对 ANAMMOX 菌的活性产生明显的抑制作用. 但随着 C/N 比的升高, 异养反硝化菌大量繁殖, 对 ANAMMOX 菌产生基质竞争优势, 造成 ANAMMOX 反应的活性降低. 当 C/N 比为 0.5 左右时, ANAMMOX 反应器可以获得理想的脱氮效果.

参考文献:

- [1] 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 等. 高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3544-3551.
- [2] Jetten M S M, van Niftrik L, Strous M, *et al.* Biochemistry and molecular biology of Anammox bacteria[J]. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 2009, **44**(2-3): 65-84.
- [3] Volcke E I P, Loccufer M, Noldus E J L, *et al.* Operation of a SHARON nitrification reactor: practical implications from a theoretical study[J]. *Water Science and Technology*, 2007, **56**(6): 145-154.
- [4] 游少鸿, 李小霞, 解庆林, 等. 厌氧氨氧化影响因素实验研究[J]. 工业水处理, 2009, **29**(10): 27-29.
- [5] 胡华望, 李冬, 张杰. 低浓度基质下厌氧氨氧化反应器的启动及其运行性能[J]. 给水排水, 2009, **35**(10): 34-38.
- [6] Dapena-Mora A, Fernández I, Campos J L, *et al.* Evaluation of activity and inhibition effects on Anammox process by batch tests based on the nitrogen gas production[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **40**(4): 859-865.
- [7] 刘金苓, 钟玉鸣, 王丽娇, 等. 厌氧氨氧化微生物的吸附、包埋固定化效果初探[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(3): 470-476.
- [8] 田智勇, 李冬, 张杰. 厌氧氨氧化过程中 COD 及 pH 与基质浓度之间的关系[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3342-3346.
- [9] 付丽霞, 吴立波, 张怡然, 等. 低含量氨氮污水厌氧氨氧化影响因素研究[J]. 水处理技术, 2010, **36**(4): 50-55.
- [10] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge[J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [11] 李小霞, 陆燕勤, 杨小平, 等. UASB 反应器中厌氧氨氧化菌的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(12): 2788-2792.
- [12] 李亚峰, 张晓宁, 陈文通, 等. 碳源对厌氧氨氧化脱氮性能影响的试验研究[J]. 环境工程, 2013, **31**(1): 35-38, 116.
- [13] van der Star W R L, Miclea A I, van Dongen U G J M, *et al.* The membrane bioreactor: a novel tool to grow ANAMMOX bacteria as free cells[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(2): 286-294.
- [14] Guven D, Dapena A, Kartal B, *et al.* Propionate oxidation by and methanol inhibition of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(2): 1066-1071.
- [15] 张树德, 李捷, 杨宏, 等. 亚硝酸盐对厌氧氨氧化的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(5): 324-326.
- [16] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [17] 魏琛, 陆天友, 钟仁超, 等. HRT 及氮素负荷对厌氧氨氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 749-755.
- [18] 蒋军, 吴立波, 付丽霞, 等. 容积负荷对厌氧氨氧化反应器运行影响的研究[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(2): 283-287.
- [19] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium oxidizing microorganisms[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [20] 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.
- [21] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1288-1292.

- [22] Dosta J, Fernández I, Vázquez-Padín J R, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on the Anammox process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 688-693.
- [23] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [24] Mosquera-Corral A, González F, Campos J L, *et al.* Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(9): 3109-3118.
- [25] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯, 等. 常温低基质下 pH 值和有机物对厌氧氨氧化的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(13): 38-42.
- [26] 赖杨岚, 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化的协同作用特性研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(13): 6-10.

欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-nui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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