

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行

付昆明, 左早荣, 仇付国

(北京建筑大学环境与能源工程学院, 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 通过 CANON 接种污泥, 以人工配制无机高氨氮废水为对象, 研究以陶粒为填料的 CANON 反应器启动与运行情况, 结果表明: ①陶粒可以作为 CANON 反应器合适填料, 温度通过水浴控制在 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, HRT 为 9 h、pH 控制在 7.00~8.08 之间, 经过 60 d 成功启动了 CANON 反应器, TN 的去除负荷达到 $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; ②在温度 30°C 时, 陶粒 CANON 反应器中临界 DO 范围在 $1.12 \sim 1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, CANON 反应器中短程硝化和厌氧氨氧化性能可维持稳定, 高于此范围时, 会出现 CANON 反应器中短程硝化不稳定现象; ③在温度 25°C , 控制 DO 在 $1.01 \sim 1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时, 尽管 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化值与 TN 变化值的比值 ($\delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \delta\text{TN}$) 略微偏离理论值 0.127, 为 0.150~0.204, 但 CANON 反应器脱氮性能趋于稳定, TN 去除率最高为 75.56%, TN 的去除负荷最高达到 $0.97 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 这意味着 CANON 工艺的适宜温度范围至少可以降低至 25°C 。

关键词: CANON 工艺; 陶粒; 短程硝化; 厌氧氨氧化; 稳定性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0995-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.025

Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier

FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo

(Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: A CANON reactor with haydite as the carrier was started by incubating sludge from another CANON reactor and using synthetic inorganic ammonia rich wastewater as the raw water. Both start-up and operation were studied. The result showed that haydite can be a suitable carrier for CANON reactor. With this carrier, start-up of CANON reactor can be completed in 60 days with total nitrogen removal load up to $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, when the reactor was equipped with a water jacket to maintain the water temperature at $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, and pH at 7.00-8.08, hydraulic retention time of 9 hours. The critical range of dissolve oxygen for CANON reactor was $1.12 \sim 1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and both characteristics of short-cut nitrification and ANAMMOX were stable. However, the CANON reactor can be instable if dissolve oxygen concentration increased above this range. Although the ratio of nitrate variation to total nitrogen variation ($\delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \delta\text{TN}$) was 0.150-0.204, which deviated a little from its theoretical value, 0.127. The performance of CANON reactor kept relatively stable. The total nitrogen removal efficiency was up to 75.56% while total nitrogen removal load was $0.97 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, which means the temperature for CANON reactor can be decreased to 25°C at least.

Key words: CANON process; haydite; short-cut nitrification; ANAMMOX; stability

全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 工艺, 是一种新型生物脱氮工艺, 该工艺主体只有一个反应器, 在生物膜或者污泥内通过溶解氧控制^[1]或温度控制^[2]同步实现亚硝酸化 (短程硝化) 与厌氧氨氧化, 从而达到脱氮的目的。CANON 工艺是目前脱氮工艺中最简捷的脱氮途径, 且具有不需要外加碳源、节省 57.5% 的曝气量^[3]和污泥产量少等优点^[4], CANON 工艺运行条件较为苛刻, 目前应用较少, 主要应用于污泥消化液^[5]和垃圾渗滤液^[6]等高氨氮废水的处理。氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 和厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 细菌是两种主要菌种而它们都是自养菌^[7], 倍增速度缓慢, 因此, 采用适当的填料

使其附着将有利于 CANON 反应器的启动与运行。

不同学者采用不同的填料对 CANON 工艺进行了研究, 作者曾采用海绵为填料来启动 CANON 反应^[8], TN 去除率可以达到 80%。海绵作为填料有比表面积大、微生物吸附能力强和存在 DO 梯度等优点, 但同时具有容易磨损、传质效率低等缺点, 当海绵孔径较小时, 微生物可能只附着在海绵表面, 无法深入到海绵内部; 廖德祥等^[9]在单级 SBR 生物膜中全程自养脱氮的研究中采用某悬浮塑料填料, TN

收稿日期: 2013-07-24; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308025); 北京高等学校青年英才计划项目 (21271413105); 北京建筑大学校内基金项目 (101101402)

作者简介: 付昆明 (1981~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: fukunming@163.com

去除率可以达到 90%；作者也曾悬浮塑料填料(改性乙烯)来启动 CANON 反应^[3], TN 去除率达到 77.61%, 但经过 368 d 才最终启动成功, 总结认为塑料填料具有良好传质性、稳定性强和耐磨损等优点, 但是生物膜(尤其是 ANAMMOX 菌)不易滞留, 导致挂膜时间长等, 而且污泥很容易流失; 作者又尝试以火山岩为填料启动 CANON 工艺^[3], 常温下 TN 去除率达到 67.03%, 但火山岩填料容易堵塞, 并会导致曝气不均匀, 刘涛等^[10]采用火山岩填料也有同样的问题; Liu 等^[11]和日本 Furukawa 等^[12]都以无纺布为填料来研究 CANON 反应器, 由于无纺布填料具有流动性好, 分散塑化优良, 填充量高, 但同样面临堵塞的缺点; Vázquez-Padín 等^[13]在常温下以颗粒污泥启动 CANON 反应器; 唐林平等^[14]采用颗粒污泥来研究 CANON 工艺, TN 的去除率最高达到 75.3%. 颗粒污泥具有污泥浓度高、沉降性能强和传质效率高等优点, 但是反应条件不易控制, 总而言之, 在应用各种填料时各有利弊。

陶粒是一种非常常见的填料, 外壳坚硬, 表面有一层隔水保气的釉层, 内部具有微多孔陶质粒状物, 它具有良好的物理、化学和水力特性, 具有孔隙率高、比表面积大、吸附截污能力强等特点; 陶粒已经在常规的水处理中获得了广泛的应用, 但从目前的研究来看, 采用陶粒作为 CANON 工艺填料的研究鲜见, 因此, 本文采用陶粒作为 CANON 工艺的填料具有理论研究与工程应用的双重价值。

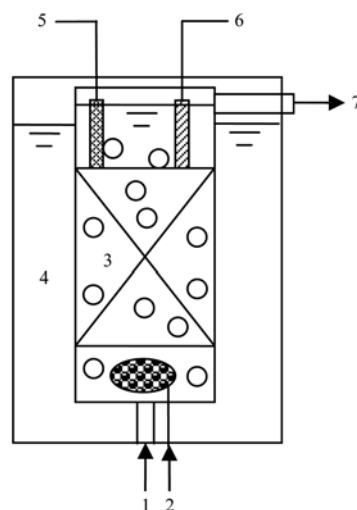
1 材料与方法

1.1 试验装置

反应器由有机玻璃制成, 总体积为 5.90 L, 废水由反应器底部进入后, 由上部出水口排出, 如图 1 所示。反应器内添加直径为 8~10 mm 陶粒填料, 堆积密度为 0.85~0.90 g·cm⁻³, 表观密度为 1.4~1.6 g·cm⁻³, 堆积孔隙率 ≥ 40%, 比表面积 ≥ 1 × 10⁴ cm²·g⁻¹, 填充率 85%, 水力停留时间为 9h, 曝气量通过转子流量计调节并计量反应器内的温度通过水浴夹套中的热水循环进行调节, 热水通过 XMT-102 型温度控制仪进行控制, 使反应器内的温度控制在 25~30℃, pH 控制在 7.00~8.08 之间, 反应器中控制碱度大于 1 500 mg·L⁻¹。

1.2 试验用水与接种污泥

试验用水采用人工配水, 进水量为 16 L·d⁻¹, 配水由自来水中添加适量的 NH₄Cl、NaHCO₃ 配置而成, NH₄⁺-N 浓度为 350~500 mg·L⁻¹, 由于自来



1. 进水; 2. 进气; 3. 填料; 4. 水浴夹套;
5. pH 探头; 6. DO 探头; 7. 出水

图 1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

水中存在几乎饱和的溶解氧, 在试验过程中也没有进行溶解氧的吹脱, 且大气中氧气会不断溶解到原水中, 造成原水中极少量 NH₄⁺-N 被氧化成 NO₂⁻-N, 其浓度为 0~10 mg·L⁻¹; 自来水中含有的 NO₃⁻-N 是进水中 NO₃⁻-N 的主要来源, 也有少部分 NO₃⁻-N 可能源于 NH₄⁺-N 的氧化, 其浓度为 4~10 mg·L⁻¹; 考虑到自来水中含有大量微量元素, 不再进行微量元素投加。

接种污泥采用作者首次启动 CANON 反应器的污泥^[8]将 600 mL CANON 污泥置于陶粒 CANON 反应器中, 浸泡 24 h, 使 CANON 污泥尽可能附着于陶粒上, 随后开始进水, 逐渐启动陶粒 CANON 反应器并运行。

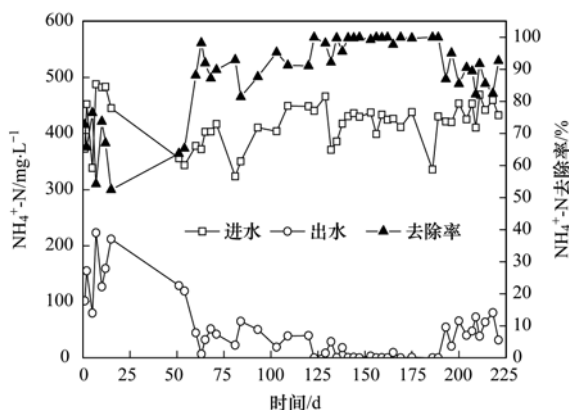
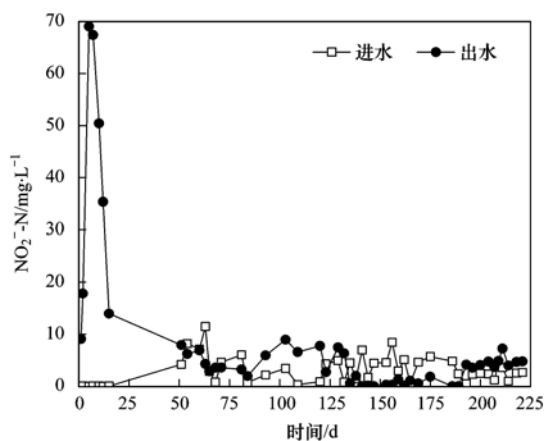
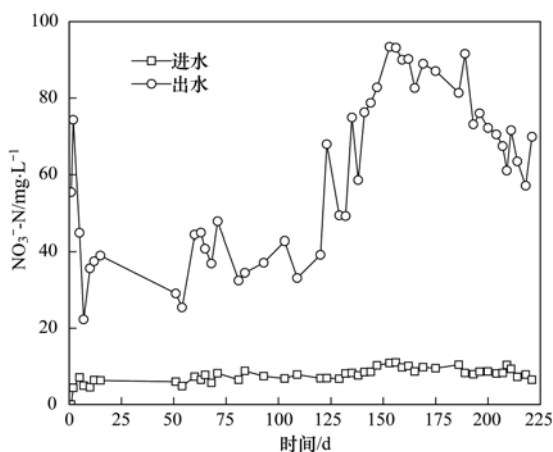
1.3 分析项目及检测方法

NH₄⁺-N: 纳氏试剂比色法^[15], NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[15], NO₃⁻-N: 紫外分光光度法^[15], pH 值: HI 931700 型 pH 计; 溶解氧: HI2400 型溶解氧仪; TN 通过紫外分光光度法, 或按下式计算: TN = NH₄⁺-N + NO₂⁻-N + NO₃⁻-N

2 结果与分析

反应器启动与运行过程中的 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN 的变化分别如图 2~图 5 所示

在 CANON 工艺中, 由于 ANAMMOX 菌以 NO₂⁻-N 为电子受体氧化 NH₄⁺-N^[16], 所以必须首先进行短程硝化, 在只进行硝化时, 亚硝酸化率 [NO₂⁻-N/(NO₃⁻-N + NO₂⁻-N)] 是衡量短程硝化效果

图2 CANON 反应器中的 NH_4^+-N 的变化Fig. 2 Variations of NH_4^+-N in CANON reactor图3 CANON 反应器中的 NO_2^--N 的变化Fig. 3 Variations of NO_2^--N in CANON reactor图4 CANON 反应器中的 NO_3^--N 的变化Fig. 4 Variations of NO_3^--N in CANON reactor

的重要指标;其中 NO_2^--N 是变化的,而由于没有 TN 损失, $(\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N})$ 可认为是常量,因此 $\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N})$ 反映了亚硝化率

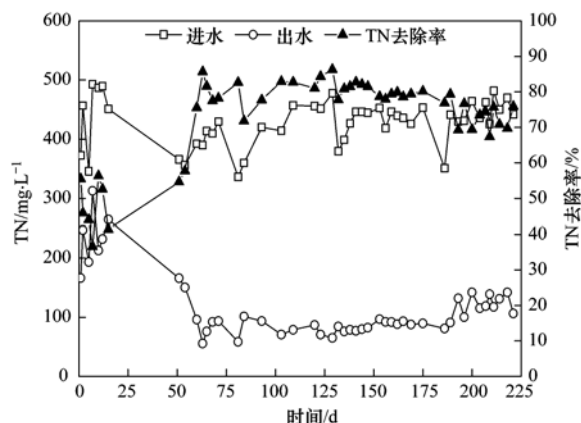
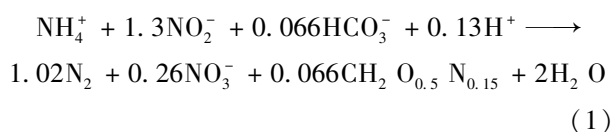


图5 CANON 反应器中的 TN 的变化

Fig. 5 Variations of TN in CANON reactor

度,但在 CANON 工艺中,无法采用亚硝化率来衡量,因为在 CANON 工艺中:存在 TN 损失,即 $(\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N})$ 是变化的.为衡量 CANON 反应器中的短程硝化效果,必须寻找新的参数.

作者注意到,在厌氧氨氧化的反应方程中[式(1)]^[17], NO_3^--N 与 N_2 的比例为0.26:1.02,其理论变化的比值 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN} = 0.26/(1.02 \times 2) = 0.127$.



在本试验中,由于采用无机高氨氮废水为原水, TN 损失可认为全部由 ANAMMOX 反应导致[式(1)],若不存在 NOB 或者 NOB 效果不显著, $\delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 也几乎全部源于 ANAMMOX 反应[式(1)],即 ANAMMOX 会维持稳定,因此 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 也会维持稳定.此时,NOB 与 AOB 相比不占优势,比值 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 与0.127接近;一旦短程硝化被破坏,NOB 开始显著作用,不仅 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 快速增大, δTN 也会因 NOB 与 ANAMMOX 细菌竞争 NO_2^--N 而减少,因此比值 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 必然迅速增大,偏离0.127.所以可以通过研判 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 与0.127的差值来判断 CANON 工艺中短程硝化的稳定性.如果差值显著大于0,表明短程硝化不完全,差值越大,短程硝化效果越差.需要说明的是,由于微生物自身降解等原因,非常少量的反硝化作用依然会存在,这会使得比值 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 在正常情况下,略小于理论值0.127.反应器启动与运行过程中 $\delta\text{NO}_3^--\text{N}/\delta\text{TN}$ 的变化如图6所示.

2.1 接种启动阶段

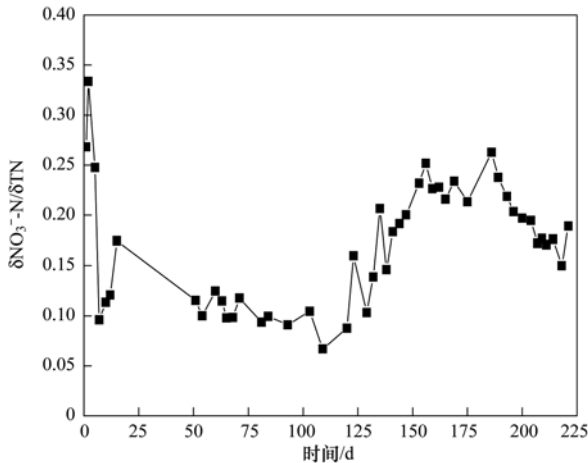


图 6 CANON 反应器中 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ 的变化

Fig. 6 Variations of $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ in CANON reactor

CANON 反应器通过接种 CANON 污泥启动,接种污泥量为 600 mL,直接在好氧条件下启动,温度保持在 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,在整个启动过程中,以无机高氮废水为进水,曝气量维持在 $1.8 \sim 3.6 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 条件下,CANON 反应器启动第 1 d, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 去除率均即达到 50% 以上,出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 分别为 $9.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $55.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明接种的 CANON 污泥活性良好.运行到第 2 d, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率达到 65.72%,TN 的去除率也有所下降,原因可能是部分污泥被冲刷出去所致.出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 达到 $17.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 达到 $74.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,增加的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 来源可能有 2 方面:① ANAMMOX 菌产生的,通过 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN} = 0.127$ 可以计算出其理论值为 $26.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;② NOB 菌氧化 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 所产生的,其值为 $74.30 - 26.23 = 48.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

显然,短程硝化效果出现恶化其原因在于,在启动初期,相对过量的曝气导致 ANAMMOX 受到抑制,而系统中少量存在的 NOB 发挥作用,导致 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 被大量氧化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,而没有参与 ANAMMOX 反应;至第 7 d,出水中的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 达到突跃为 $67.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 的去除率降到 36.59%,表明生物膜厚度较薄,ANAMMOX 细菌可能受到 DO 的影响,与 AOB 相比 ANAMMOX 更敏感^[18],容易受到 DO 的影响,导致 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 大量积累, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度也降低; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率为 54.32%,TN 去除率为 36.59%,都略有下降,这是由于进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度升高导致.在前 7 d 之间(第 7 d 除外),TN 的去除率均大于 45%,说明接种 ANAMMOX 细菌性能良好,

但 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ 值都远大于 0.127,说明在刚刚接种 CANON 污泥的反应器中的短程硝化效果也不稳定.

7 ~ 15 d 之间,在曝气量都维持一定范围下, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 的去除率均有所下降,出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 也快速下降到 $13.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 有所上升,且 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ 值都小于 0.127;说明 AOB 保持较好稳定性和 ANAMMOX 细菌在竞争中逐渐获得优势.15 ~ 60 d, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 的去除率都快速上升,至 60 d, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 的去除率分别达到 88.18% 和 75.57%,出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为 $6.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 $44.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其经过计算由 ANAMMOX 细菌所产生的理论 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 值为 $37.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 $7.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,几乎没有 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 被氧化,此时 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN} = 0.125$;说明 ANAMMOX 细菌的活性增强,且 CANON 反应器中主要由 AOB 和 ANAMMOX 两种细菌起作用.

7 ~ 60 d 之间,TN 平均去除率为 53.55%, $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ (除 15 d 外) 值都小于 0.127,它的平均值为 0.112,方差仅为 0.002;说明陶粒 CANON 反应器中短程硝化效果良好,TN 去除率稳步提高,反应器中的生物膜逐渐变红,吻合 ANAMMOX 菌的特征^[19],同时 TN 去除率达到 75.57%,TN 去除负荷达到 $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,虽然负荷低于作者在 35°C 下启动的海绵 CANON 反应器的 TN 去除负荷 $1.22 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[3],但高于日本 Furukawa 等^[12] 采用无纺布做填料,直接在好氧条件下启动反应器的 TN 去除负荷 $0.48 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 Liu 等^[11] 以无纺布为填料来研究 CANON 反应器的 TN 去除负荷 $0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,也大于 Vázquez-Padín 等^[13] 采用颗粒污泥运行 CANON 反应器的 TN 去除负荷为 $0.45 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 反应器中 $\delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \delta\text{TN}$ 值为 0.125,与 CANON 反应理论比值 0.127^[20] 非常接近,且 TN 的去除能力有所增强;同时证明反应器中存在基本稳定的短程硝化,ANAMMOX 性能良好,标志着反应器启动成功.

2.2 运行阶段

初期阶段(61 ~ 132 d),控制 DO 水平在 $1.48 \sim 1.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,从图 3 可以看出,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 比较高且波动较大,由于 ANAMMOX 细菌与 AOB 相比,ANAMMOX 细菌倍增时间长,在相同时间内,反应器中 ANAMMOX 细菌生物量有限,同时 DO 是在一定范围下,使得 AOB 和 ANAMMOX 活性也波动,

导致 NH_4^+ -N和TN的去除率也波动变化,但去除效果依然较好, NH_4^+ -N和TN平均去除率分别为92.37%、81.30%(图2和5),且出水中 NO_3^- -N趋于稳定,由于出水中 NO_3^- -N几乎全部来源ANAMMOX反应(如图4); δNO_3^- -N/ δTN 都比0.127低,如图6所示,说明在该阶段下CANON反应器中短程硝化和ANAMMOX的性能较稳定,即反应器运行性能也保持稳定,稳定后反应器中生物量为 $17\,537.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在第84 d时,当DO降到 $1.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N去除率下降到81.44%,出水中 NO_2^- -N值略有下降,出水 NO_3^- -N基本不变,TN去除率下降到71.81%, δNO_3^- -N/ δTN 值为0.099;第123 d时,DO提到 $1.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N去除率增大到100%,出水中 NO_2^- -N值略有下降,出水 NO_3^- -N达到 $67.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN去除率增大到84.36%, δNO_3^- -N/ δTN 值为0.160,说明此时反应器中临界DO值(CANON反应器极限DO值,高于此值,TN去除率不再随DO的提高而增高).在 $1.12\sim 1.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,且DO低于临界DO时,随着DO的提高,CANON反应器中TN去除率增大;当DO大于临界DO时,反应器中TN去除率维持稳定,但短程硝化的稳定性受到影响.

中期阶段(133~189 d),提高曝气量,控制DO水平在 $2.15\sim 4.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,图6显示,133 d, δNO_3^- -N/ δTN 值开始大于0.127,且快速上升,从0.139升到0.263,说明CANON反应器中短程硝化不稳定,即反应器中存在NOB;由于DO提高,导致一部分 NO_2^- -N被AOB氧化,使图4中 NO_3^- -N快速上升;但图2中 NH_4^+ -N去除率几乎达到100%,且图5中TN去除率保持在78%~83%之间,说明了AOB菌对氧的亲合力要强于NOB^[18],TN的去除率在高DO情况下尽管较高,但出水 NO_2^- -N非常低,甚至低于进水(图3), δNO_3^- -N/ δTN 的逐步增加,都表明系统趋于不稳定.例如135 d时,当DO增大到 $3.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,尽管TN的去除率有所上升,但 NH_4^+ -N去除率不升反降, δNO_3^- -N/ δTN 值从0.139上升到0.207,出水 NO_2^- -N从 $6.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 NO_3^- -N值由 $49.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速增大至 $74.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而138 d DO恢复到 $1.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N去除率与TN去除率甚至超过此前指标,说明了当反应器中DO小于临界DO时,随着DO的提高有利于CANON反应器TN的去除,当

DO超过临界DO时,TN去除率能够维持稳定;而出水中的 NO_3^- -N值增大,是由于AOB氧化 NH_4^+ -N过多,导致ANAMMOX利用 NH_4^+ -N底物量有限,使TN去除率维持稳定,同时过多的 NO_2^- -N在NOB作用下氧化 NO_3^- -N所致.这也印证了Hao等^[21]应用数学模型来模拟CANON工艺时所得结论——当DO小于临界DO时,随着DO的提高有利于CANON反应器TN的去除,DO超过临界DO值的一定范围时,TN的去除率维持稳定,但过多的DO会影响ANAMMOX细菌活性,导致TN去除率不稳定;与作者提出的极限曝气量的概念相似^[3],当曝气量小于极限曝气量时,提高曝气量有利于CANON反应器的TN去除率当曝气量超过极限曝气量时,提高曝气量是否有利于CANON反应器的TN去除率取决于采用何种填料.

后期阶段(190~221 d)时,DO维持在 $1.01\sim 1.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间和温度降低至 $25^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 情况下,如图3显示,出水 NO_2^- -N突然升高到 $4.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后保持稳定,平均为 $4.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 NO_3^- -N也突然下降,从 $91.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $73.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后从第193 d的 $73.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐降低至 $61.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最后上下波动趋于稳定(图4).出水 NO_2^- -N突然增大,而 NO_3^- -N开始下降,是由于DO降到 $1.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,NOB受到DO影响,氧化 NO_2^- -N能力受到限制所致;之后出水 NO_2^- -N保持稳定, NO_3^- -N下降缓慢,最后趋于稳定,是由于温度影响,温度下降到 25°C 时,NOB细菌易生长^[22],但它也受到底物(DO和 NO_2^- -N)限制,同时AOB细菌与ANAMMOX细菌也受到影响,它们的活性都有所下降^[22,23],如图2和图5所示, NH_4^+ -N和TN去除率都有所下降,最后在上下波动且趋于稳定,平均去除率分别为88.24%和72.29%;同图6显示结果一样, δNO_3^- -N/ δTN 先是快速下降,从0.263下降到0.204,然后缓慢下降,最后趋于稳定,且略大于0.127;说明在 25°C 下,CANON反应器临界DO在 $1.01\sim 1.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,且去除效果较好因此可以把温度扩展至 25°C .

事实上,已经有学者在常温下研究CANON工艺,如Vázquez-Padín等^[13]采用颗粒污泥启动CANON反应器,在常温下($18\sim 24^\circ\text{C}$),TN的最高去除负荷为 $0.45\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.图6显示,运行后期阶段 δNO_3^- -N/ δTN 值经过了一个月才逐渐稳定,是由于温度影响,温度降到 25°C 时,NOB细菌易生

长^[22],使 CANON 反应器中存在 NOB 细菌,将会氧化 NO_2^- -N,同时也会与 ANAMMOX 细菌竞争,导致 TN 去除率下降,出水 NO_3^- -N 增大,使 δNO_3^- -N/ δTN 偏大,偏离 0.127,但偏离不大,且逐渐趋于稳定,是由于 NOB 也受到 DO 的影响,在较低 DO 情况下,NOB 氧化能力有限,导致在低温下 CANON 反应器中临界 DO 下降。

在整个运行期间,系统经历了 3 个阶段,①稳定运行阶段,此时 δNO_3^- -N/ δTN 基本保持稳定,且都比理论值小(除 123 d 外),平均值为 0.098;②短程硝化趋向于破坏阶段,此时 δNO_3^- -N/ δTN 先是直线上升,然后趋于稳定,稳定值为 0.224,都比理论值大且偏离理论值较大;③短程硝化重新趋于稳定阶段,此时 δNO_3^- -N/ δTN 先是直线下降,降到 0.172 后,趋于稳定,略大于 0.127 运行过程中, TN 的最高去除为 86.34%,最高 TN 去除负荷达到 $1.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,TN 的平均去除率为 76.70% 本试验中,TN 去除率难以进一步提高的原因在于:①受到 CANON 工艺的理论限制^[24];②受到基质(NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N)传递的限制^[25];③受到现实环境等因素的影响,如曝气量的波动性和气体流量计自身的缺点等影响若能建立自动控制反应器中底物的系统,并通过投加有机碳源进行进一步反硝化,将有助于进一步提高 TN 去除率。

3 结论

(1)陶粒可以作为 CANON 反应器合适填料,通过接种 CANON 污泥,经过 60 d 成功启动 CANON 反应器, TN 的最高去除率为 75.57%,TN 的去除负荷达到 $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2)陶粒 CANON 反应器中临界 DO 范围在 $1.12 \sim 1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,高于此范围,会出现短程硝化不稳定现象。

(3)温度 25°C , DO 在 $1.01 \sim 1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,尽管 δNO_3^- -N/ δTN 为 $0.150 \sim 0.204$,但 CANON 反应器脱氮性能趋于稳定, TN 去除率最高为 75.56%, TN 的去除负荷最高达到 $0.97 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] Mulder A, Van Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, **16**(3): 177-184.
- [2] Van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Start up of reactor for anoxic ammonium oxidation experiences from the first full scale ANAMMOX reactor in Rotterdam [DB/OL]. <http://www.elsevier.com/locate/waters> 2007-04.
- [3] 付昆明. 全程自养脱氮(CANON)反应器的启动及其脱氮性能[D]. 北京:北京工业大学, 2010.
- [4] 郑平, 胡宝兰. 生物脱氮技术的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 1997, **19**(4): 25-28.
- [5] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [6] Qiao S, Kawakubo Y, Cheng Y J, *et al.* Anammox process for synthetic and practical wastewater treatment using a novel kind of biomass carriers[J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(6): 1335-1341.
- [7] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H, *et al.* Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, **400**(6743): 446-449.
- [8] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [9] 廖德祥, 李小明, 曾光明, 等. 单级 SBR 生物膜中全程自养脱氮的研究[J]. *中国环境学报*, 2005, **25**(2): 222-225.
- [10] 刘涛, 李冬, 曾辉平, 等. 常温下 CANON 反应器中功能微生物的沿程分布[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, **44**(10): 22-27.
- [11] Liu S T, Yang F L, Gong Z, *et al.* Assessment of the positive effect of salinity on the nitrogen removal performance and microbial composition during the start-up of CANON Process[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **80**(2): 339-348.
- [12] Furukawa K, Lieu P K, Tokitoh H, *et al.* Development of single-stage nitrogen removal using Anammox and partial nitrification (SNAP) and its treatment performances[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(6): 83-91.
- [13] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, *et al.* Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an air pulsing SBR [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **116**(1): 336-341.
- [14] 唐林平, 廖德祥, 李小明, 等. 全程自养脱氮颗粒污泥培养及动力学研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 411-415.
- [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.
- [16] Van de Graaf A A, Mulder A, de Bruijn P, *et al.* Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(4): 1246-125.
- [17] 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 ammoniumoxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [18] Third K A, Paxman J, Schmid M, *et al.* Treatment of nitrogen-rich wastewater using partial nitrification and anammox in the CANON process[J]. *Water Science and Technology*, 2005, **52**

- (4): 47-54.
- [19] 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]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [20] Strous M, Kuenen J G, Jetten M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [21] Hao X D, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C. Sensitivity analysis of a biofilm model describing a one-stage completely autotrophic nitrogen removal (CANON) process [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2002, **77**(3): 266-277.
- [22] 郝晓地. 可持续污水: 废物处理技术[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2006.
- [23] 郑平, 胡宝兰. 厌氧氨氧化菌混培物生长及代谢动力学研究[J]. *生物工程学报*, 2001, **17**(2): 193-198.
- [24] Sliekers A O, Derwort N, Gomez J, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [25] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 对连续流 CANON 反应器运行性能的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(7): 1038-1044.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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