

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓哈, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性

齐泮晴, 于德爽, 李津*, 管勇杰, 魏思佳

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 采用 ASBR 厌氧氨氧化反应器, 研究了 ANAMMOX 反应器在全海水盐度 (100% 海水比例) 下的抑制及恢复特性。结果表明受到盐度抑制后, ANAMMOX 反应器的容积氮去除负荷 (NRR) 在经过了对盐度响应的敏感期、过渡稳定期和恢复期后可以再次进入稳定期, 稳定期的 NRR 可达 $0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 与对照组 [10% 海水比例, NRR 为 $0.462 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] 接近。对修正的 Logistic 模型和修正的 Gompertz 模型做了改进, 拓展了模型的适应性。推荐使用再次修正的 Logistic 模型, 对受到全海水盐度抑制后的 NRR 恢复过程进行模拟。通过建立 ANAMMOX 反应器 NRR 恢复时间的预测公式, 得到了全海水盐度下 NRR 的倍增周期为 11.359 d。

关键词: 含海水污水; 盐度抑制; 厌氧氨氧化; 恢复特性; 恢复动力学

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1102-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201606169

Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater

QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin*, GUAN Yong-jie, WEI Si-jia

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: An anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) was operated to investigate the recovery performance of ANAMMOX reactor after the inhibition of 100% seawater concentration. The results showed that the nitrogen removal performance of ANAMMOX reactor suffered inhibition of high salinity concentration. However, it could enter a period of stable nitrogen removal efficiency again after an interim stable period and a recovery period. The nitrogen removal rate (NRR) could reach $0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, which was similar to the control group, containing 10% seawater and having a NRR of $0.462 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The modified Logistic model and modified Gompertz model were revised and their application field was broadened. The re-modified Logistic model was suggested to be used to simulate the NRR recovery process of ANAMMOX reactor that suffered inhibition of 100% seawater concentration. The doubling time of NRR was calculated to be 11.359 d using the prediction formula established for the recovery time of NRR.

Key words: sewage with seawater; saline inhibition; ANAMMOX; recovery performance; recovery kinetics

由于 ANAMMOX 菌对外界环境的高敏感性, 使其极易受到诸如盐度、基质浓度、低温等外界条件的抑制作用, 又由于 ANAMMOX 菌较长的倍增周期以及较低的细胞产率等因素的存在进一步强化了上述抑制作用, 同时也增加了 ANAMMOX 反应器脱氮效能恢复难度。盐度是影响 ANAMMOX 活性的一个重要因素, 高盐度会对 ANAMMOX 菌的活性造成显著的抑制作用。Windey 等^[1]的研究发现, 未经盐度驯化的淡水 ANAMMOX 菌在 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度下的活性与对照组相比下降了 95%。Liu 等^[2]报道了当盐度超过 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器的容积氮去除速率 (NRR) 会急速下降。快速的盐浓度变换也会对 ANAMMOX 活性造成显著影响。Yang 等^[3]发现当盐度由 $14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 突然增加到 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX 菌的活性受到盐度的完全抑制。Malovanyy 等^[4]使用 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐度梯度驯化策略, 发现 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度可导致 ANAMMOX 菌丧失活性。

鉴于盐度对 ANAMMOX 活性的强烈抑制作用, 了解 ANAMMOX 脱氮效能被显著抑制后的恢复规律将有助于推进 ANAMMOX 工艺的工业化应用进程。前期的研究表明: ANAMMOX 反应器长期在高海水比例下 (>40% 海水比例) 运行, 反应器对海水盐度的响应会表现出 3 个阶段, 即: 盐度抑制敏感期、盐度抑制过渡稳定期和盐度抑制恢复期^[5]。ANAMMOX 反应器在高盐度环境下表现的出脱氮性能下降可能与 ANAMMOX 菌处于盐度抑制的敏感期有关, 经过一段时间的驯化后即可恢复脱氮性能。目前, 对于 ANAMMOX 活性受到高盐度抑制后的恢复过程鲜有报道, 且多数研究者^[3,6,7]通常以去除抑制因素或者降低抑制因素的强度来使

收稿日期: 2016-06-24; 修订日期: 2016-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278258, 51478229); 山东省自然科学基金项目 (BS2015HZ007); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC61)

作者简介: 齐泮晴 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制方面, E-mail: qingfuns@outlook.com

* 通信作者, E-mail: ljlin0532@126.com

ANAMMOX 活性恢复, 几乎没有关于不改变抑制因素强度情况下的活性恢复过程的报道。因此, 本研究在前期研究的基础之上, 在全海水盐度(100% 海水比例) 下继续对反应器进行恢复, 分析了 ANAMMOX 反应器在盐度抑制后的 NRR 恢复过程, 并通过动力学模型指示了 ANAMMOX 反应器在高盐度条件下 NRR 的恢复规律, 这些规律对于了解 ANAMMOX 在盐度下的恢复机制具有重要帮助, 以为含海水污水的 ANAMMOX 处理提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用 ASBR 厌氧氨氧化反应器, 该反应器使用有机玻璃制作而成, 总体积为 8.0 L, 有效体积 7.0 L。人工配置的废水从反应器下部的进水口由蠕动泵泵入反应器内, 内置电动搅拌器, 整个反应器表面用黑布包裹, 防止光线对 ANAMMOX 活性污泥造成负面影响。反应器的外层有 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温水浴, 进水的 pH 控制在 7.4 ± 0.1 。反应器运行一个周期的时间为 10.5 h, 其中进水 2 min, 反应 10 h, 静置 25 min, 出水 3 min。

1.2 试验废水

试验使用海水(取自黄海青岛麦岛周边)配制的模拟废水, 配水具体组成成分为 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): KH_2PO_4 20, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 107, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 45, KHCO_3 1350, 微量元素浓缩液 I ($1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$): EDTA $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素 II ($1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$): EDTA $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $0.014 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $0.99 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.43 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0.19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.22 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $0.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 分别由 NH_4Cl 和 NaNO_2 按需提供, 其中进水 NH_4^+ -N 浓度为 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 NO_2^- -N 浓度为 $145 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。为了提供厌氧环境, 人工配制的模拟废水使用高纯氮气(纯度为 99.99%)吹脱 15 min。

1.3 分析项目和方法

NH_4^+ -N: 纳氏试剂法; NO_2^- -N: *N*-(1-萘基)乙二胺分光光度法; NO_3^- -N: 麝香草酚分光光度法; pH: pH/0xi 340i 便携式 pH 计(WTW, 德国); 紫外/可见分光光度计: UV-5200(上海元析仪器有限公司, 中国); 模型拟合: Origin Pro 9.2.0。

1.4 恢复动力学模型

修正的 Boltzmann 模型、修正的 Gompertz 模型以及修正的 Logistic 模型被 Jin 等^[7]用于模拟 ANAMMOX 菌受到苯酚及硫化物抑制后的恢复过程。修正的 Boltzmann 模型还可被用来指示 ANAMMOX 反应过程的潜力^[7]。修正的 Gompertz 模型被广泛应用于批次试验中发酵产氢过程中基质降解、菌体生长和产物生成等过程^[8]。修正的 Logistic 模型曾被 Wang 等^[8]用来描述批次试验中以葡萄糖为基质的产氢过程。

修正的 Boltzmann 模型:

$$\text{NRR} = \text{NRR}_{\max} + \frac{\text{NRR}_{\min} - \text{NRR}_{\max}}{1 + e^{(t-t_c)/t_d}} \quad (1)$$

修正的 Gompertz 模型:

$$\text{NRR} = \text{NRR}_{\max} \exp \left[- \exp \left(\frac{R_{\max} e}{\text{NRR}_{\max}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (2)$$

修正的 Logistic 模型:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NRR}_{\max}}{1 + \exp[4R_{\max}(\lambda - t)/\text{NRR}_{\max} + 2]} \quad (3)$$

式中, NRR 为容积氮去除负荷, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; $\text{NRR}_{\max}$ 为最大容积氮去除负荷, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; $R_{\max}$ 为每个运行周期 NRR 的最大恢复速率, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; λ 为恢复延迟时间, d; t 为运行时间, d; $\text{NRR}_{\min}$ 为最小容积氮去除负荷, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; t_c 为恢复时间中间值, 即恢复至 $\text{NRR}_{\min} + (\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min})/2$ 所需的时间, d; t_d 为恢复时间常数, d。

2 结果与讨论

2.1 全海水盐度抑制后的恢复

本实验室前期的试验结果表明: 反应器的脱氮能力在全海水盐度(100% 海水比例)下运行的前两天几乎没有受到盐度提升的影响, 但在随后的 5 d 时间内, 反应器内没有任何营养基质添加, 导致 ANAMMOX 菌没有能量来源而完全暴露在高盐度环境下, 当反应器再次正常运行后, 反应器的 NRR 由 $0.43 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 骤降至 $0.18 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。这一结果表明: 在无能量来源时, 盐度会对 ANAMMOX 菌产生强烈的抑制作用。Kimura 等^[9]的研究认为, 在无机碳源浓度(IC)不足的情况下, ANAMMOX 活性会随着进水 IC 的降低而恶化。另外, 在高盐度环境下, 微生物自身通过调节渗透压完

成盐度适应,而调节渗透压的方式主要有“salt-in”策略和“compatible solute”策略^[10,11],这两种方法都需要消耗大量的能量^[10],因此在没有无机碳源和氮源的情况下,ANAMMOX 菌的新陈代谢受阻,以至于难以实施以上两个策略,进而导致其细胞内结构遭到一定程度的破坏^[12,13],由此便造成了上述脱氮能力骤降的现象.同时,这一结果也暗示 ANAMMOX 活性在盐度响应的敏感期极易受到外界环境的干扰,在实际运行过程中应该避免此类状况的发生. ANAMMOX 反应器在盐度响应敏感期出现的 NRR 下降可能与 ANAMMOX 菌在盐度提升后出现的活性降低或者活性消失有关.另外,反应器内淡水属微生物菌与耐盐属微生物数量上的不平衡也是造成盐度提升后反应器性能下降的原因^[1].盐度响应敏感期的出现表明:经过盐度驯化后的 ANAMMOX 菌具有一定的抗盐度冲击的能力,然而盐度的长期影响要大于短期影响^[14].

在 NRR 骤降之后,反应器的脱氮能力既没有立

即恢复也没有继续恶化,而是呈现出一个相对稳定的状态(图 1 中第 304 ~ 340 个周期).较长的延迟期可能与 ANAMMOX 菌修复受损的细胞结构有关.在本阶段, NH_4^+ -N 的平均去除率为 44.7%, NO_2^- -N 的平均去除率为 38.0%,容积氮进水负荷(NLR)和 NRR 的平均值分别为 $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.20 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. ANAMMOX 反应的计量比(NH_4^+ -N 去除量: NO_2^- -N 去除量: NO_3^- -N 生成量)为 $1: (1.15 \pm 0.32): (0.18 \pm 0.08)$.自 341 个周期,ANAMMOX 菌的活性开始逐渐恢复,在经历了 57 个周期的恢复后,在第 398 个运行周期, NH_4^+ -N 的去除率已达 100%, NO_2^- -N 的去除率为 96.13%,NRR 为 $0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.这一阶段 ANAMMOX 反应的计量比为 $1: (1.32 \pm 0.21): (0.15 \pm 0.06)$.随后,反应器的运行再次进入了稳定期, NH_4^+ -N 的平均去除率为 98.02%, NO_2^- -N 的平均去除率为 97.02%,NLR 和 NRR 的平均值分别为 $0.57 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,这一脱氮能力与对照组[10%

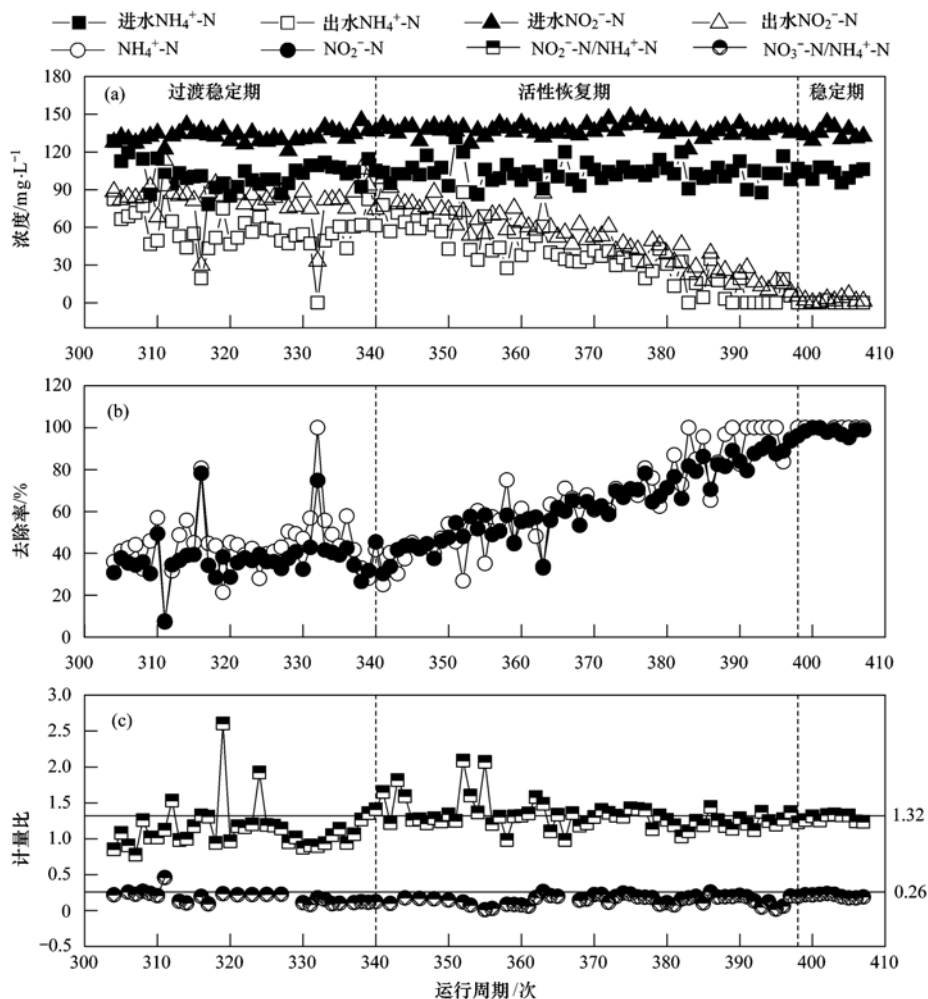


图 1 厌氧氨氧化反应器在 100% 海水比例下的恢复过程

Fig. 1 Recovery process of ANAMMOX reactor at 100% proportion of seawater

海水比例, NLR 为 $0.543 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, NRR 为 $0.462 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的脱氮能力接近^[5]. 本阶段 ANAMMOX 反应的计量比为 $1: (1.29 \pm 0.04): (0.21 \pm 0.02)$.

ANAMMOX 反应的计量比与 ANAMMOX 反应器的稳定性有直接关系, 可以作为监测反应器运行的一个重要参数^[15]. 有研究指出 ANAMMOX 反应的计量比通常受到传质阻力和其他异类菌群的影响^[16]. 在本试验中计量比由过渡稳定期的大幅波动逐渐恢复至稳定期的相对稳定的状态. 过渡稳定期计量比的大幅波动似乎暗示着 ANAMMOX 新陈代谢的紊乱^[17], 但这一结果仍然要好于 50% 海水比例时的表现, 表明本阶段 ANAMMOX 菌耐盐能力较 50% 海水比例阶段有了较大的提升. 50% 海水比例时, ANAMMOX 反应在过渡稳定期的计量比为 $1: (1.43 \pm 0.31): (0.21 \pm 0.05)$, 也具有较大波动, 但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除量与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除量明显高于 ANAMMOX 反应的理论值, 暗示系统内可能发生反硝化反应. 而在 100% 海水比例下的过渡稳定期, 计量比多数情况下明显小于 1.32 [图 1(c)], 由这一

结果可推断: 在这一阶段 ANAMMOX 菌发生了菌体自溶, 致使培养基中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高, 但反硝化作用微弱, 从而导致了计量比明显小于 1.32^[6]. 这也进一步表明了 ANAMMOX 菌在无能量来源时, 盐度会对其产生强烈的抑制作用.

2.2 盐度抑制恢复动力学

分别运用修正的 Boltzmann 模型、修正的 Gompertz 模型以及修正的 Logistic 模型对受到 100% 海水比例盐度抑制后 ANAMMOX 反应器的 NRR 恢复过程进行拟合, 结果如图 2 所示. 从中可知, 3 个模型都具有较高的相关系数 R^2 , 但是修正的 Gompertz 模型以及修正的 Logistic 模型得到的参数不具有实际意义. 因此, 可以认为修正的 Boltzmann 模型相比修正的 Gompertz 模型以及修正的 Logistic 模型更适合拟合 NRR 的恢复过程. 修正的 Boltzmann 模型得到 $\text{NRR}_{\max}$ 与真实值的相对误差为 $10.75\% \pm 2.64\%$, NRR 恢复至 $\text{NRR}_{\min} + (\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min})/2$ 所需的时间 t_c 为 73.368 个运行周期, 表明要使 NRR 恢复至 $\text{NRR}_{\min} + (\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min})/2$ 需要一个较长的恢复时间.

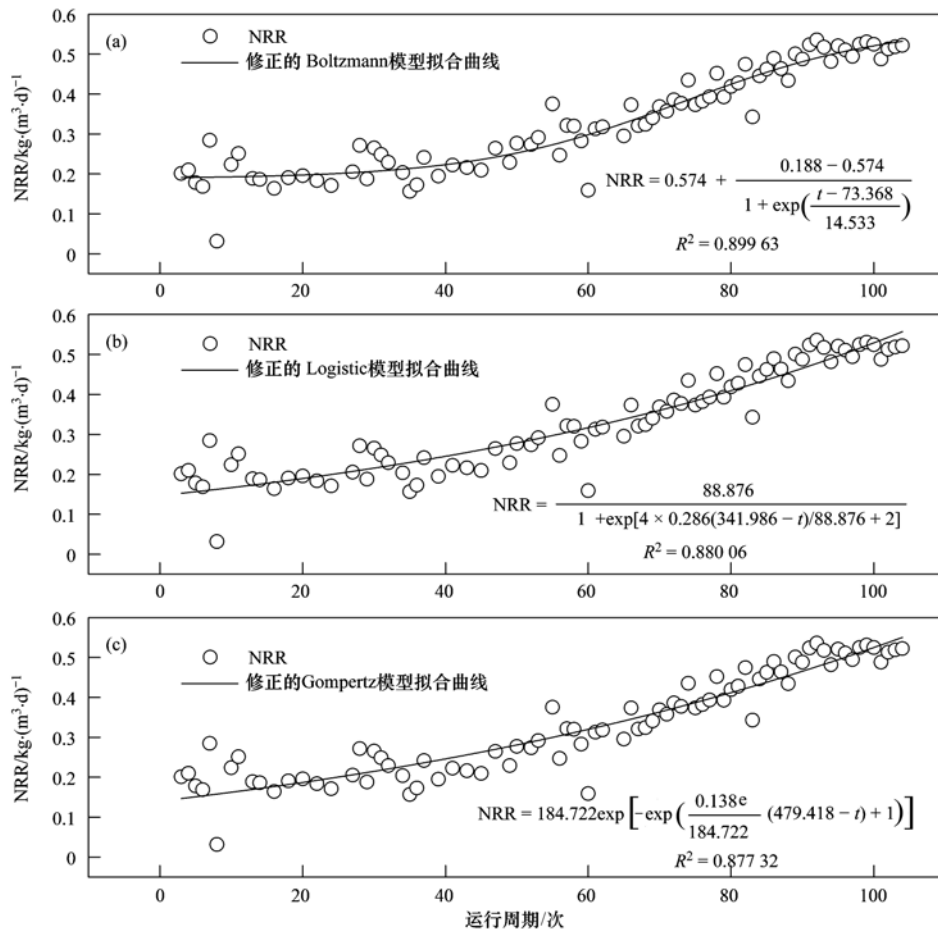


图2 ANAMMOX 反应器盐度抑制恢复动力学拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of the recovery process of ANAMMOX reactor

修正的 Logistic 模型和修正的 Gompertz 模型通常被用于模拟生化反应产物的生成过程. 在本研究中,修正的 Logistic 模型和修正的 Gompertz 模型得到的参数与实际相差较大可能与模型中缺少 NRR 最小参数值有关. 本研究对这两个模型做了适当的改进后[如式(4)、(5)所示],发现其可以很好地用来拟合受到全海水盐度抑制后的 ANAMMOX 反应器的 NRR 恢复过程. 对这两个模型的改进主要依据为函数图像的坐标平移变换,这一改进在一定程度上拓展了这两个模型在本研究中的适用性.

再次修正的 Gompertz 模型:

$$\text{NRR} = (\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min}) \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{R_{\max} e}{\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] + \text{NRR}_{\min} \quad (4)$$

再次修正的 Logistic 模型:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min}}{1 + \exp \left[\frac{4R_{\max}(\lambda - t)}{\text{NRR}_{\max} - \text{NRR}_{\min}} + 2 \right]} + \text{NRR}_{\min} \quad (5)$$

在对修正的 Logistic 模型和修正的 Gompertz 模型改进之后的拟合效果如图 3 所示. 从中可知,二者均具有较高的 R^2 并得到了有效的参数值. 再次修正的 Logistic 模型得到的 $\text{NRR}_{\max}$ 和 $\text{NRR}_{\min}$ 与修正的 Boltzmann 模型得到的结果一致,分别为 0.574

$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.188 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 其中 $\text{NRR}_{\max}$ 略大于稳定期的 NRR 平均值 [$0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$],表明反应器的脱氮能力还有进一步提升的潜力. 而再次修正的 Gompertz 模型得到的 $\text{NRR}_{\max}$ 为 $0.667 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,与稳定期试验得到的真实值的相对误差为 $23.20\% \pm 2.26\%$,远大于再次修正的 Logistic 模型和修正的 Boltzmann 模型得到的相对误差. 由此可知,再次修正的 Logistic 模型和修正的 Boltzmann 模型均适合对 ANAMMOX 反应器 NRR 受到全海水盐度抑制后的恢复过程进行模拟,但由于再次修正的 Logistic 模型可以得到整个恢复过程的延迟时间,这对于了解整个恢复过程更具有意义,因此推荐使用再次修正的 Logistic 模型对 ANAMMOX 反应器 NRR 受到全海水盐度抑制后的恢复过程进行模拟.

再次修正的 Logistic 模型得到 NRR 恢复延迟时间 λ 为 44.201 个周期,与图 1 中定义的过渡稳定期的持续时间 (36 个周期) 接近. 将再次修正的 Logistic 模型得到的 NRR 恢复延迟时间换算成 ANAMMOX 反应时间约为 18.417 d,这一值略长于文献 [18] 报道的 ANAMMOX 菌 (*Candidatus scalindua*) 在海水下的倍增周期 (14.4 d). 大约 1 个 ANAMMOX 菌倍增周期的延迟期暗示全海水盐度抑制后的 ANAMMOX 菌需要较长的时间来修复受损的细胞结构.

由再次修正的 Logistic 模型可建立恢复时间 t

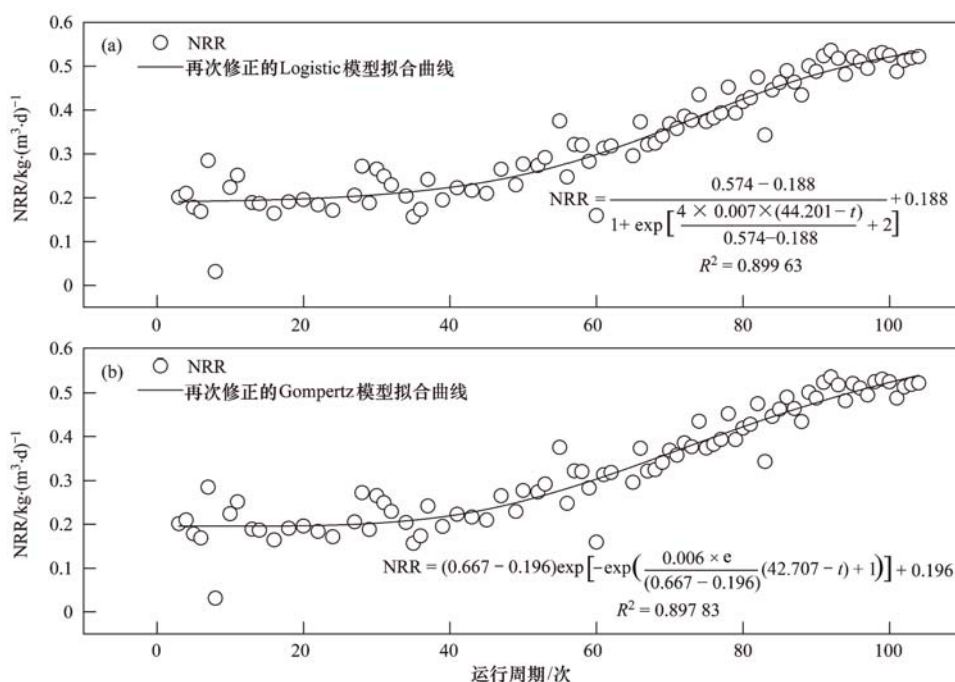


图 3 再次修正的 Logistic 和 Gompertz 模型拟合曲线

Fig. 3 Curves of re-modified Logistic model and re-modified Gompertz model

的预测公式, 如式(6)所示. 同时将再次修正的 Logistic 模型得到的参数值代入式(6)即可得本研究中对于恢复时间 t 的预测公式, 如式(7)所示. 运用式(7)可计算出 ANAMMOX 反应器的 NRR 恢复至 2 倍 NRR_{min} 时所需的时间为 71.462 个运行周期, 将这一时间减去延迟时间即可得到活性恢复期的

$$t = \lambda - \frac{\left[\left(\ln \frac{NRR_{max} - NRR_{min}}{NRR - NRR_{min}} - 1 \right) - 2 \right] \times (NRR_{max} - NRR_{min})}{4 \times R_{max}} \quad (6)$$

$$t = 44.201 - \frac{\left[\left(\ln \frac{0.386}{NRR - 0.188} - 1 \right) - 2 \right] \times 0.386}{4 \times 0.007} \quad (7)$$

再次修正的 Logistic 模型得到海水盐度抑制后每个运行周期 NRR 的最大恢复速率为 $0.007 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. ANAMMOX 反应器的 NRR 在海水盐度抑制后的缓慢恢复过程可能与 ANAMMOX 菌在盐度条件下的代谢受阻有关, 代谢的缓慢最终导致了 ANAMMOX 菌更长的倍增周期和更低的细胞产率. 有研究认为, ANAMMOX 菌的倍增周期可达 $3 \sim 14.4 \text{ d}$ ^[20~25], 远长于多数的自养细菌, 而盐度对 ANAMMOX 细胞产率也具有显著的影响^[18]. 种群演变以及淡水菌耐盐能力的提升可能对 NRR 的恢复发挥了重要作用.

3 结论

(1) 受到盐度抑制后, ANAMMOX 反应器的 NRR 在经过了对盐度响应的敏感期、过渡稳定期和恢复期后可以再次进入稳定期, 稳定期的 NRR 可达 $0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 与对照组 (10% 海水比例) 接近.

(2) 改进了修正的 Logistic 模型和修正的 Gompertz 模型, 拓展了模型的适应性. 推荐使用再次修正的 Logistic 模型, 对受到高海水盐度抑制后的 ANAMMOX 反应器 NRR 的恢复过程进行模拟.

(3) 利用再次修正的 Logistic 模型, 建立了 ANAMMOX 反应器 NRR 恢复时间的预测公式, 得到了 ANAMMOX 反应器在全海水盐度下 NRR 的倍增周期为 11.359 d.

参考文献:

- [1] Windey K, De Bo I, Verstraete W. Oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification (OLAND) in a rotating biological contactor treating high-salinity wastewater[J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4512-4520.
- [2] Liu C L, Yamamoto T, Nishiyama T, et al. Effect of salt concentration in anammox treatment using non woven biomass carrier[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2009, **107**

NRR 倍增周期为 27.261 个运行周期 (反应时间约 11.359 d). 由此可推断, 本研究中 ANAMMOX 菌的倍增周期约为 11.359 d, 这一值与文献[19,20]报道的 ANAMMOX 倍增周期 (10~12 d) 接近, 但低于 Awata 等^[21]报道的 ANAMMOX 菌 (*Candidatus scalindua*) 在海水下的倍增周期 (14.4 d).

(5): 519-523.

- [3] Yang J C, Zhang L, Hira D, et al. Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2367-2372.
- [4] Malovanyy A, Plaza E, Trela J, et al. Ammonium removal by partial nitrification and anammox processes from wastewater with increased salinity [J]. Environmental Technology, 2015, **36**(5): 595-604.
- [5] 齐洋晴, 于德爽, 李津, 等. 盐度对厌氧氨氧化工艺处理含海水污水脱氮特性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1392-1399.
- Qi P Q, Yu D S, Li J, et al. Effects of salinity on nitrogen removal of treating sewage with seawater by anammox process [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1392-1399.
- [6] Yang G F, Zhang Q Q, Jin R C. Changes in the nitrogen removal performance and the properties of granular sludge in an anammox system under oxytetracycline (OTC) stress [J]. Bioresource Technology, 2013, **129**: 65-71.
- [7] Jin R C, Zhang Q Q, Yang G F, et al. Evaluating the recovery performance of the anammox process following inhibition by phenol and sulfide [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 162-170.
- [8] Wang J L, Wan W. Kinetic models for fermentative hydrogen production: a review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, **34**(8): 3313-3323.
- [9] Kimura Y, Isaka K, Kazama F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (anammox) activity [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(6): 4390-4394.
- [10] Oren A. Bioenergetic aspects of halophilism [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 1999, **63**(2): 334-348.
- [11] Schubert T, Maskow T, Benndorf D, et al. Continuous synthesis and excretion of the compatible solute ectoine by a transgenic, nonhalophilic bacterium [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(10): 3343-3347.
- [12] Pietri R, Román-Morales E, López-Garriga J. Hydrogen sulfide and heme proteins: knowledge and mysteries [J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2011, **15**(2): 393-404.
- [13] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 盐度对膜-生物反应器污泥表观硝化速率的抑制机理 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 371-377.
- Li B, Wang Z W, An Y, et al. Inhibition mechanisms of apparent nitrification rate in membrane bio-reactor with salinity

- [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 371-377.
- [14] Moussa M S, Sumanasekera D U, Ibrahim S H, *et al.* Long term effects of salt on activity, population structure and floc characteristics in enriched bacterial cultures of nitrifiers [J]. Water Research, 2006, **40**(7): 1377-1388.
- [15] Zhang Y L, Niu Q G, Ma H Y, *et al.* Long-term operation performance and variation of substrate tolerance ability in an anammox attached film expanded bed (AAFEb) reactor [J]. Bioresource Technology, 2016, **211**: 31-40.
- [16] Lotti T, Kleerebezem R, Hu Z, *et al.* Pilot-scale evaluation of anammox-based mainstream nitrogen removal from municipal wastewater [J]. Environmental Technology, 2015, **36**(9): 1167-1177.
- [17] Kimura Y, Isaka K, Kazama F, *et al.* Effects of nitrite inhibition on anaerobic ammonium oxidation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(1): 359-365.
- [18] Awata T, Kindaichi T, Ozaki N, *et al.* Biomass yield efficiency of the marine anammox bacterium, "*Candidatus scalindua* sp.," is affected by salinity [J]. Microbes and Environments, 2015, **30**(1): 86-91.
- [19] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation; experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [20] 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.
- [21] Awata T, Oshiki M, Kindaichi T, *et al.* Physiological characterization of an anaerobic ammonium-oxidizing bacterium belonging to the "*Candidatus scalindua*" group [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(13): 4145-4148.
- [22] Oshiki M, Shimokawa M, Fujii N, *et al.* Physiological characteristics of the anaerobic ammonium-oxidizing bacterium '*Candidatus brocadia sinica*' [J]. Microbiology, 2011, **157**(6): 1706-1713.
- [23] Van De Vossenberg J, Rattray J E, Geerts W, *et al.* Enrichment and characterization of marine anammox bacteria associated with global nitrogen gas production [J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(11): 3120-3129.
- [24] Tsushima I, Kindaichi T, Okabe S. Quantification of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in enrichment cultures by real-time PCR [J]. Water Research, 2007, **41**(4): 785-794.
- [25] Yasuda T, Waki M, Yoshinaga I, *et al.* Evidence of exponential growth of an anammox population in an anaerobic batch culture [J]. Microbes and Environments, 2011, **26**(3): 266-269.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)