

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺

卢健聪¹, 高大文^{1,2*}, 孙学影¹

(1. 东北林业大学环境科学系, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用“甲烷化+半亚硝化+厌氧氨氧化自养脱氮”新工艺, 实现了生活污水能源质回收及氮素低碳化去除。结果表明, 联合工艺出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \approx 0$, $\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均为 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解性 COD $< 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率高达 98%。其中采用升流式厌氧污泥固定床(UAFB)实现甲烷化, 能去除 80% 以上的进水溶解性 COD, 甲烷平均日产气量为 3.3 L , 产气量与 COD 去除量之间的关系为 $0.3 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$, 39.2% 的进水溶解性 COD 转化为 COD_{CH_4} , 只有 6.52% 转化为 COD_{VFAs} 。采用序批式反应器(SBR)实现半亚硝化, 亚硝化累积率达到 97%, 出水基本达到厌氧氨氧化进水基质配比 ($\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_2^- - \text{N} = 1 : 1.13$), 半亚硝化的主要作用是转化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 转化率为 36.59%。厌氧氨氧化(ANAMMOX)反应器氨氮去除量、亚硝态氮去除量和硝态氮生成量之比为 $1 : 1.18 : 1.25$, 总氮容积去除负荷为 $0.62 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 对氮素去除的贡献率为 56.91%, 为氮素脱除的主导工艺环节。新工艺通过厌氧产甲烷实现能源质回收, 并通过亚硝化-厌氧氨氧化实现自养脱氮, 为现有城市污水处理厂工艺改造提供了一种新的思路和技术。

关键词: 甲烷化; 半亚硝化; 厌氧氨氧化; CH_4 回收; 低碳; 生活污水; 新工艺

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1435-07

A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX

LU Jian-cong¹, GAO Da-wen^{1,2}, SUN Xue-ying¹

(1. Department of Environmental Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Using a innovative system consisted of methanogenesis, partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) reactors, simultaneous methane production and autotrophic nitrogen removal from domestic sewage was successfully achieved. The results showed that the effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of the combined treatment process was below the detection limit. The effluent $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were less than $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The effluent COD of the combined treatment process was $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and a COD removal rate of 98% was achieved. More than 80% COD was removed by the up-flow anaerobic sludge fixed bed (UAFB) and the anaerobic gas production was $3.3 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ with a methane yield of $0.3 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$. About 39.2% of influent COD was removed in form of methane and about 6.52% was transferred to VFAs. Partial nitrification with high nitrite accumulation efficiency of 97% was realized in a Sequencing Batch Reactor (SBR). Ammonium was partly oxidized to nitrite with an ammonium: nitrite ratio of $1 : 1.13$, which was suitable for the sub-sequent ANAMMOX reaction. In terms of N balance, the N conversion rate of SBR was 36.59% while the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) reactor, which was the major system in nitrogen removal, removed 56.91% of N. The TN removal rate of the ANAMMOX reactor was $0.62 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and the ratio of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal: $\text{NO}_2^- - \text{N}$ removal: $\text{NO}_3^- - \text{N}$ generation was $1 : 1.18 : 1.25$. The new process achieves energy recovery by reclaiming methane and autotrophic nitrogen removal by the partial nitrification-ANAMMOX process, and provides a new approach and technology for reforming of domestic wastewater treatment plants.

Key words: methanogenesis; partial nitrification; ANAMMOX; CH_4 reclaiming; low carbon; domestic sewage; new process

传统城市污水处理工艺通过好氧微生物代谢作用将污水中的有机物转化为二氧化碳。此工艺中好氧环境通过曝气作用来维持, 因此需要消耗大量的能量; 另一方面城市污水有机物含量丰富且总量大, 污水中有机物可通过厌氧发酵产甲烷作用, 将其转化为能源物质——甲烷^[1,2], 此工艺间接降低了污水厂通过厌氧发酵产甲烷作用产生的能量。后来人们通过缺氧条件下, 利用反硝化作用去除污水中的有机物。该工艺一定程度上降低了曝气能耗, 但

还是没有改变有机物产甲烷量^[3], 大量的能源不能被有效地回收和利用。

半亚硝化-厌氧氨氧化^[4,5]技术被认为是可持续污水处理技术, 应用半亚硝化-厌氧氨氧化处理城市污水, 可以减少污泥产量, 降低供氧能耗。厌氧氨氧

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177033)

作者简介: 卢健聪(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及环境微生物技术, E-mail: lujiancong@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: dawengao@gmail.com

化菌的发现,使自养脱氮成为可能^[6],应用厌氧氨氧化技术,可以将污水中的有机物尽可能多地用于产生能源性物质. 另一方面,某些研究表明有机物对厌氧氨氧化菌的活性有抑制作用^[7],并且进水过多的有机物会引起厌氧氨氧化菌与异养反硝化菌对于底物的竞争作用^[8]. 为了将厌氧氨氧化工艺更稳定地应用于城市污水处理工程,需要设置 COD 预处理工艺. 如果有适合的后处理方法相配合,厌氧生物处理技术可以成为分散型生活污水处理模式的重要手段^[9,10]. 因此,笔者提出将厌氧生物处理系统作为厌氧氨氧化的预处理工艺,预处理系统的设置不仅可以去除厌氧氨氧化的潜在抑制因子,还能将污水中的能源以气体形式回收并加以利用.

本研究拟采用“甲烷化+半亚硝化+厌氧氨氧化自养脱氮”工艺处理模拟城市污水,探讨厌氧反应器对有机物的转化途径,提高联合工艺能源性气体的产生效能和对污染物质的处理效能,旨在开发出一套新型低能耗、低污染的城市污水能源质回收与低碳污水处理技术相结合的集成工艺,为污水处

理工艺改造和优化提供了一种新的思路和技术.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由厌氧系统、半亚硝化系统和 ANAMMOX 系统这 3 部分组成,实物简化模型和反应流程如图 1 所示.

厌氧反应器反应主体为装有环形填料的 UAFB 反应器,有效容积为 6.9 L,填充率为 2/3,控制反应温度 36℃. 接种种泥为哈尔滨文昌污水处理厂二沉池回流污泥,接种量 3 L. 厌氧反应器为前处理部分,功能是去除污水中有机物为后面的半亚硝化系统提供了良好的水质条件,并从中回收能源性气体甲烷.

半亚硝化系统为 SBR 反应器,有效容积 3.6 L,反应温度 31℃. 接种泥取自实验室培养的短程硝化颗粒污泥,反应器 MLSS 3 500 ~ 4 000 mg·L⁻¹, SVI 35 ~ 50 mL·g⁻¹. 不控制反应器内溶解氧水平,调整 HRT 2 ~ 3 h, SRT 约为 35 d.

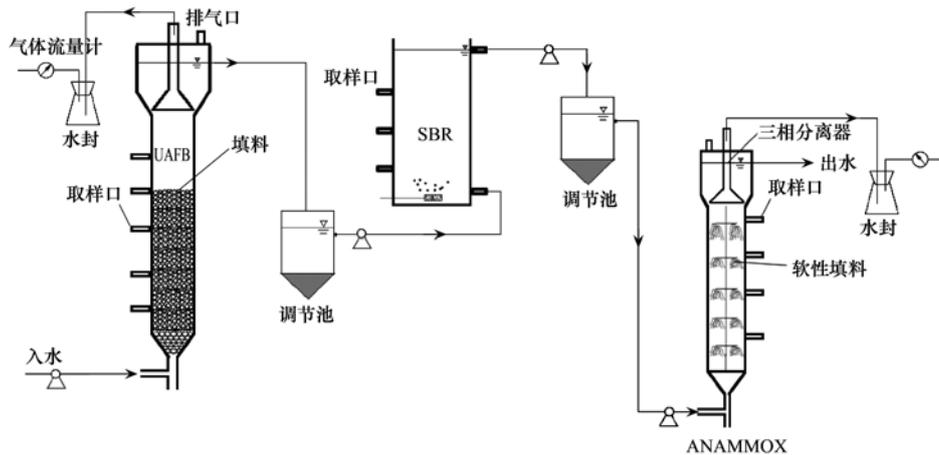


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Diagram of experimental system

ANAMMOX 系统同样采用 UAFB 型式,反应器内设有悬挂式软性填料,有效容积约 1.6 L. ANAMMOX 反应器的接种污泥取自实验室具有较强 ANAMMOX 处理能力 SBBR 反应器^[11]. 控制反应温度为(35 ± 1)℃.

1.2 试验原水

采用模拟生活污水,模拟废水组成(g·L⁻¹):葡萄糖 0.26, CH₃COONa 0.13, NH₄Cl 0.14, 尿素 0.03, NaHCO₃ 0.33, KH₂PO₄ 0.04, MgSO₄·7H₂O 0.05, CaCl₂ 0.01, 微量元素溶液 0.3 mL·L⁻¹. 微量元素溶液组成(g·L⁻¹): ZnSO₄·7H₂O 0.24, MnCl₂·

2H₂O 0.24, FeSO₄·7H₂O 3, CuSO₄·5H₂O 0.06, CoCl₂·6H₂O 0.3, (NH₄)₆Mo₇O₂₄ 0.36, 其中 N 和 COD 的浓度分别约为 45 mg·L⁻¹和 350 mg·L⁻¹. 在启动阶段,各反应系统独立运行,分别采取单独进水的形式,并根据不同试验阶段变换进水基质.

1.3 分析项目和检测方法

试验中测定的指标主要有 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS、VFAs 等,其检测方法采用国家环保总局颁布的标准方法^[12]. pH 采用 pH 测定仪(德国 WTW); DO 采用 DO 测定仪(德国 WTW).

UAFB 产生的气体总量由湿式气体流量计检测,产生气体的组分及含量利用山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司生产的 SP-6801T 型气相色谱仪检测。

2 结果与讨论

2.1 启动与运行

2.1.1 厌氧反应器

厌氧反应器的独立运行阶段经历了 3 个阶段。进出水 COD 变化与 COD 去除率如图 2 所示。为了快速富集产甲烷菌,阶段一和阶段二分别采用逐步提升进水有机浓度和降低 HRT 的策略以提升容积负荷,阶段三降低进水有机浓度同时降低 HRT,最终使进水 COD 浓度接近城市污水浓度范围。由图中可以看出,阶段一经过约 1 个星期运行,COD 去除率达到 88.6%,随后几天去除率稍有波动,最后渐渐达到稳定,容积负荷从 $0.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 逐渐提升到 $2.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,期间去除率变化不大,保持在 80% ~ 90% 之间,受进水 COD 波动影响较小。第 60 ~ 81 d 为反应阶段二,保持进水 COD 在 $2200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,HRT 在第 60 d 和 66 d 分别降到 15 h 和 11 h,对应的容积负荷提升到 $3.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $4.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,期间去除率保持在 77% ~ 88% 之间。从第 82 d 开始进入反应阶段三,有机负荷经历了 3 次调整,从 $5.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ (82 ~ 90 d) 降到了 $4.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ (91 ~ 99 d),从第 100 d 开始,有机负荷降低为 $2.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。Ho 等^[13] 利用 AnMBR 在 HRT 为 12 h 条件下处理 COD 浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟城市污水,COD 去除率保持在 85% 以上。本研究阶段三在 HRT 为 4 h 条件下,同样获得 85% 以上的 COD 去除率。

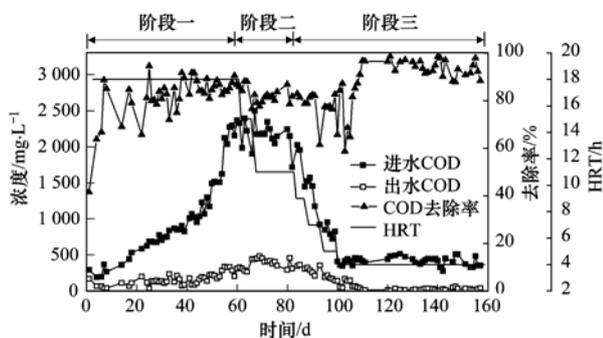


图 2 UAFB 进出水 COD 变化与 COD 去除率

Fig. 2 Variations of COD and COD removal efficiency in UAFB

2.1.2 亚硝化反应器

亚硝化反应器的目的是将 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 部分氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ (约 50%), 提供 ANAMMOX 的合适进水基

质^[14]。试验阶段反应器 DO 在 $0.5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,HRT 为 2 ~ 3 h。温度高于 30°C 时,亚硝化菌生长速度高于硝化菌,能使硝化反应控制在亚硝化阶段^[15],因此本试验采取高温 (31°C) 的策略启动,反应到第 5 d 开始, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 逐渐累积,如图 3 中所示,反应进入第 23 d,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相当 ($\text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{NO}_2^- \text{-N} = 1 : 1.33$),符合 ANAMMOX 进水基质要求。整个反应阶段出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 较低,亚硝化累积率达到 94%,此时亚硝化菌在体系中已形成优势菌种。反应器启动过程中,体系 MLSS 为 $3500 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 为 $35 \sim 50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

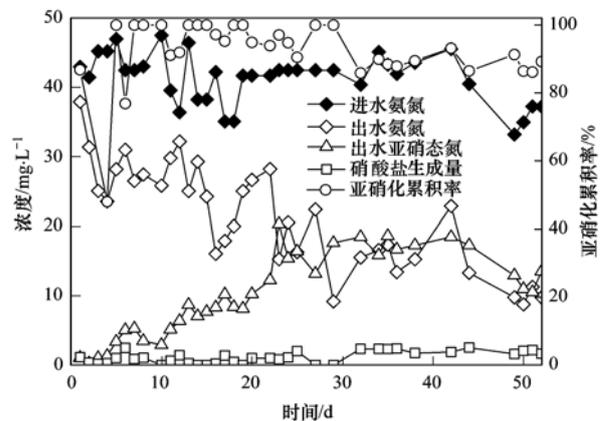


图 3 SBR 中无机氮的转化及亚硝态氮累积率的变化

Fig. 3 Translation of inorganic nitrogen and variation of nitrite accumulation rate in SBR

2.1.3 厌氧氨氧化反应器

ANAMMOX 反应器采用低负荷低氨氮的策略启动,启动初期 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度范围均为 $25 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。如图 4 所示,经历了 15 d 的启动,反应器逐渐稳定,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 分别为 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮去除率达到 84.5%。为了提高厌氧氨氧化反应器的处理能力,ANAMMOX 反应器启动成功后,通过提高进水基质浓度(阶段一)和降低 HRT(阶段二)的方法来快速富集厌氧氨氧化菌。

阶段一,当进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为 $170 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 仍然检测不到,说明 ANAMMOX 反应并没有由于高进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度而受到抑制,但进水 NO_2^- 为 $195 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率均有所降低,但仍然达到 93.5% 和 86.4%。阶段二保持进水氨氮和亚硝态氮不变,逐步降低 HRT 以提高进水总氮负荷。图中可以看出,当 HRT 由 24 h 降低到 3 h,氨氮去除率在变换 HRT 后略有波动,随后又回到

85% ~ 99%。反应第 63 d 和第 76 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 出水骤增是由于温控器出现故障。阶段三保持总氮负荷不变,进一步降低 HRT 的同时降低进水基质浓度。在 3 个阶段的试验中可以看出,HRT 和进水基质浓度变化并没有对 ANAMMOX 反应器脱氮性能产生不良影响。研究表明水中的溶解氧对厌氧氨氧化菌有一定抑制作用^[6,16],而本试验并未对进水进行脱氧处理,随着 HRT 的降低(最低低至 26 min),进水携带的溶解氧并未对 ANAMMOX 菌产生明显抑制作用。这是由于生物膜外层主要是一些好氧菌和异养菌,厌氧氨氧化菌则处于生物膜内层,进入反应器的少量溶解氧,首先被外部的好氧菌消耗, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 通过扩散转移到内层。亚硝化菌等好氧菌既减少了溶解氧对 ANAMMOX 菌的影响,同时为 ANAMMOX 提供了亚硝酸盐氮等底物^[17-20],二者实现互利共生。氨氮去除量、亚硝态氮去除量和硝态氮生成量之比为 1:1.18:1.25,非常接近理论值^[21]。

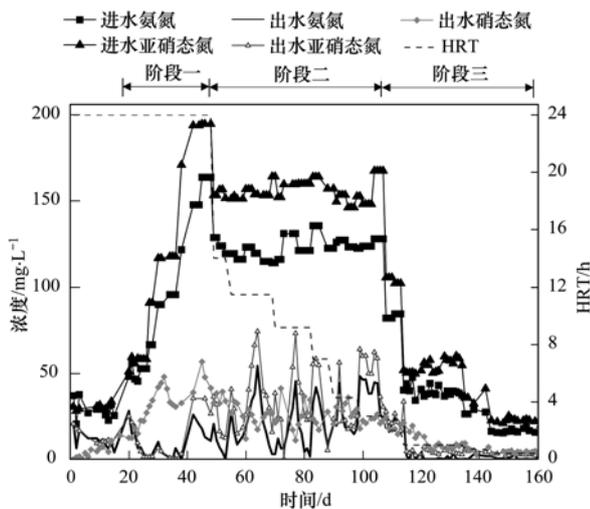


图4 ANAMMOX 系统中无机氮的去除特征

Fig. 4 Removal of inorganic nitrogen in ANAMMOX

2.2 联合工艺处理模拟生活污水效能的研究

2.2.1 联合工艺对 COD 的去除效果

联合工艺各单元对有机物均存在不同程度的利用。图 5 所示为联合工艺运行时期各阶段 COD 的去除情况。UAFB 能去除 80% 以上的进水溶解性 COD,这一方面能最大限度地把进水溶解性 COD 转化为能源气体 CH_4 ,实现能源的最大化回收,另一方面又能消除有机物对厌氧氨氧化菌的潜在抑制作用。另有 18% 约 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 COD 进入后续工艺,作为反硝化菌或异养菌的有机碳源,被进一步去除。联合工艺出水溶解性 COD $< 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总去除率高达 98%。

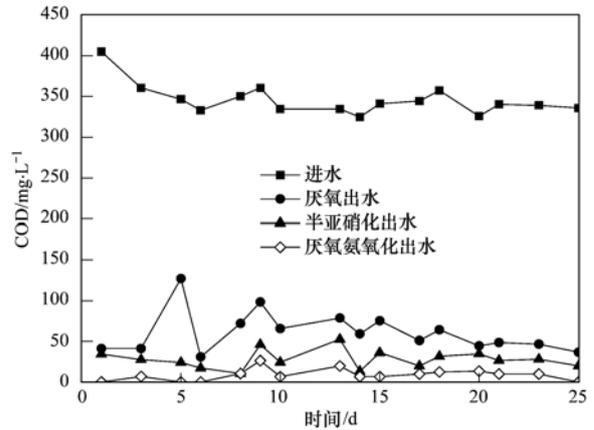


图5 联合工艺各阶段 COD 变化情况

Fig. 5 Variation of COD at different stages in the combined process

2.2.2 联合工艺对氮素的去除效果

由图 6 可见,通过对 HRT、温度等因素的综合调控,SBR 反应器的出水基本达到 ANAMMOX 进水基质配比($\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_2^-\text{-N} = 1:1.13$),并且亚硝化累积率达到 97%。第 15 d 前后由于曝气时间不足,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 过量。因此调控合理的曝气时间使出水达到 ANAMMOX 进水基质配比显得尤为重要。而值得注意的是,在 UAFB 中氨化细菌的作用下,约有 $9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有机氮被转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,提高了联合工艺对 TN 的脱除效率。

联合运行期间,ANAMMOX 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大部分时间处于检测下限以外, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 也长期处于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,如上所述,进水基质配比是影响 ANAMMOX 脱氮效果的主要因素。出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比值与独立运行阶段时间为 0.25,均非常接近理论比值^[21]。ANAMMOX 系统的 TN 容积负荷和容积去除负荷分别为 $0.75 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.62 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,优于处理同类污水的效能^[22-24]。

2.2.3 UAFB 产气效能分析

联合工艺产气能力为本试验重点考察的运行效能之一。图 7 所示为 UAFB 产生消化气体的情况,UAFB 的产气量随着容积去除负荷的变化产生一定的波动,说明产气量与反应器去除 COD 的能力有直接关系。试验期间日处理废水 38.9 L ,进水 COD 和出水 COD 平均值分别为 $345.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $61.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 5),沼气平均日产气量为 3.3 L ,COD 去除量与消化气体的生成量之间的关系为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$ 。沼气的发热量约为 $20\,800 \sim 23\,600 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$,可发电 $1.6 \sim 2.0 (\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{m}^{-3}$,按照 $1.6 (\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{m}^{-3}$

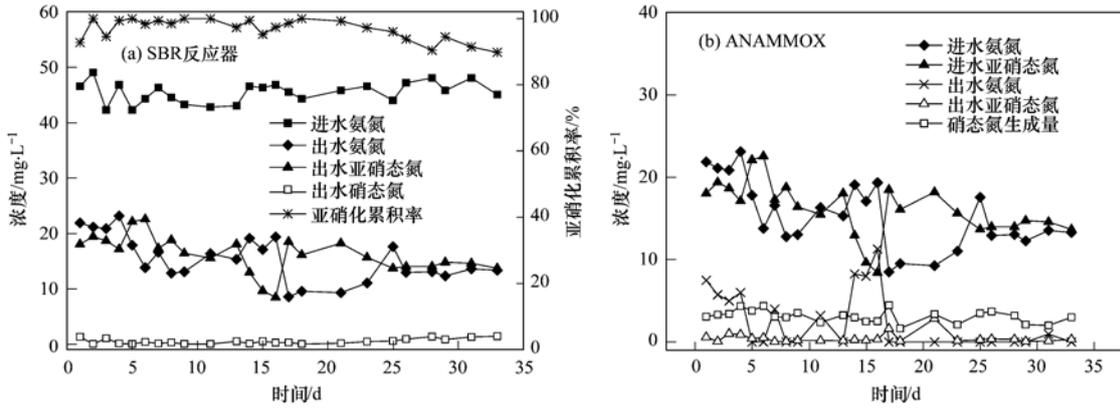


图 6 联合工艺对无机氮的去除特性

Fig. 6 Removal of inorganic nitrogen in the combined process

的沼气发电量来计算^[25],联合工艺每去除 1 kg COD 可发电 0.498 kW·h,按照哈尔滨普通工业用电电价 0.747 元·(kW·h)⁻¹ 计算,联合工艺每去除 1 kg COD,产值为 0.37 元. KIM 等^[26]利用两段式厌氧流化床膜生物反应器处理低浓度废水的研究中得出,当进水 COD 浓度为 513 mg·L⁻¹,厌氧反应器的 HRT 为 2.0~2.8 h,膜反应器的 HRT 为 2.2 h 时,系统 COD 总去除率为 99%,系统总体消耗的能量只占产生的甲烷能量的 30%.

我国对污水处理厂节能方面的研究较薄弱,杨凌波等^[27]对我国 559 座城镇污水厂 2006 年能耗情况进行分析,得出我国城镇污水处理平均电耗为 0.28 (kW·h)·m⁻³,高于美国 1999 年的 0.20 (kW·h)·m⁻³,高能耗造成污水设施运行成本高,效能低.本组合工艺通过厌氧产甲烷实现能源质回收,以弥补脱氮过程中曝气所损耗的电能,有望实现城市污水厂能量自给或能量外供.

生的消化气体主要包括 CH₄、N₂、H₂、CO₂、H₂S 等,经检测得知产气组分中 H₂、H₂S 含量很少.产生的消化气体通过 pH 为 12~13 的 NaOH 吸收液,利用 0.2 mol·L⁻¹ 的 HCl 标准使用液测定吸收瓶中的酚酞碱度和甲基橙碱度,从而换算出反应器产生 CO₂ 的体积.根据有机物进入 UAFB 后的流向,可以得到如下的 COD 平衡式:

$$COD_{\text{进水溶解}} = COD_{\text{微生物生长}} + COD_{\text{VFAs}} + COD_{\text{CH}_4} + COD_{\text{CO}_2} + COD_{\text{其它}}$$

式中,COD_{进水溶解}和 COD_{VFAs}分别为原模拟污水中的溶解性 COD 和出水中的 VFAs; COD_{CH₄}表示最终转化为 CH₄ 的部分 COD,其中包括气态 CH₄ 和溶解于出水中的 CH₄; COD_{CO₂}表示以气体的形式最终转化为 CO₂ 的部分 COD; COD_{微生物生长}表示转化为细胞自身物质所贡献的 COD; COD_{其它}表示一些诸如难降解的长链有机物或硫化物等化合物所贡献的 COD.此外,为达到厌氧环境而耗于脱氧的部分有机物量和由于水质变化而损失的有机物量同样占据相当的比重,且难以定量计算,因此并入 COD_{其它} 进行计算.

进水溶解性 COD 为 13.45 g·d⁻¹,其中 39.2% 转化为 COD_{CH₄} (图 8),UAFB 处理掉的溶解性 COD

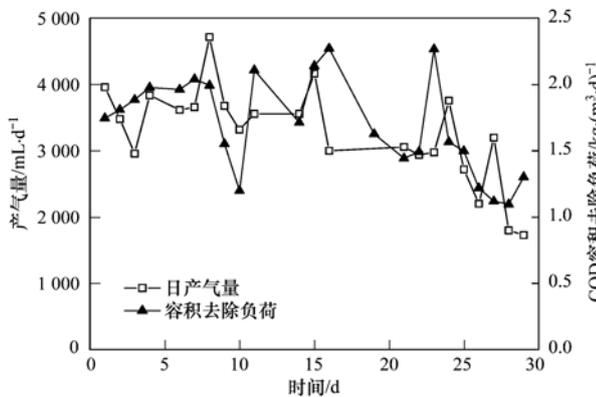


图 7 UAFOB 产气量变化情况

Fig. 7 Gas production in UAFOB

UAFOB 产生的消化气体由湿式气体流量计检测产气量,同时经气相色谱仪检测其中 CH₄ 含量.产

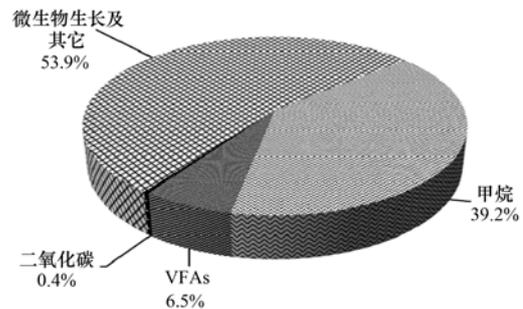


图 8 UAFOB 有机物的转化途径

Fig. 8 Pathways of organic matter transformation in UAFOB

中有 47.7% 转化为甲烷,但其中 12.0% 溶于水中,不可以直接回收利用. 进水溶解性 COD 只有小部分转化为 VFAs,进入后续工艺,UAFB 厌氧进程能够进行比较彻底,消化及产酸过程中生成的乙酸等均可以比较完全地转化为 CH_4 .

2.2.4 联合工艺氮平衡分析

为了更好地判断半亚硝化和厌氧氨氧化在联合工艺中发挥的作用,尤其是对氮素脱除的作用,对 SBR 反应器和 ANAMMOX 反应器在稳定运行时的进出水氮素浓度进行平衡分析. 由表 1 可以看出,SBR 反应器可以分别以 $0.84 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度去除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 同时以 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度生成

$\text{NO}_2^- \text{-N}$,而生活污水经 UAFB 后出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的质量流量为 $1.23 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$,在此基础上计算得到 SBR 反应器可以转化 36.59% 的氮素,同时去除 31.71% 的氮素,考虑 SBR 进水 COD 较低,推测去除部分可能是由自养反硝化,厌氧氨氧化等引起的. 因此,半亚硝化在联合工艺中对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的转化发挥着重要作用. 而 ANAMMOX 可以分别以 $0.35 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度脱除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,再以 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,同理,ANAMMOX 可以脱除 56.91% 的氮素. 因此,ANAMMOX 在联合工艺中对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的脱除发挥着重要作用.

表 1 联合工艺氮素平衡分析

Table 1 Nitrogen balance analysis in the combined process

氮素	UAFB 出水		SBR 出水		ANAMMOX 出水	
	浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	质量流量 / $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$	浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	质量流量 / $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$	浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	质量流量 / $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	45.48	1.23	14.30	0.39	1.52	0.04
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	—	—	16.17	0.44	0.46	0.01
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	—	—	0.48	0.01	3.59	0.09

3 结论

(1) 采用“甲烷化 + 半亚硝化 + 厌氧氨氧化自养脱氮”联合工艺处理模拟城市污水,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N} \approx 0$, $\text{NO}_2^- \text{-N} \leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均为 $3.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性 COD $< 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率高达 98%.

(2) 采用 UAFB 实现甲烷化,能去除 80% 以上的进水溶解性 COD,平均日产气量为 3.3 L ,产气量与 COD 去除量之间的关系为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$,UAFB 厌氧进程能够比较彻底,39.2% 的进水溶解性 COD 转化为 COD_{CH_4} ,只有 6.52% 转化为 COD_{VFAs} .

(3) SBR 反应器实现半亚硝化,亚硝化累积率达到 97%,出水基本达到 ANAMMOX 进水基质配比 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}:\text{NO}_2^- \text{-N} = 1:1.13$),半亚硝化的主要作用是转化 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,转化率为 36.59%.

(4) 厌氧氨氧化段氨氮去除量、亚硝态氮去除量和硝态氮生成量之比为 $1:1.18:1.25$,容积去除负荷为 $0.62 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,对氮素去除的贡献率为 56.91%,为氮素脱除的主导工艺环节.

参考文献:

[1] Verstraete W, Van de Caveye P, Diamantis V. Maximum use of resources present in domestic " used water" [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(23) : 5537-5545.
[2] Ma B, Zhang S J, Zhang L, *et al.* The feasibility of using a two-

stage autotrophic nitrogen removal process to treat sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17) : 8331-8334.

- [3] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Anammox brings wastewater treatment closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57**(3) : 383-388.
[4] Minder A, Van de 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.
[5] Schmidt I, Sliemers O, Schmid M, *et al.* New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, **27**(4) : 481-492.
[6] Van de graaf A A, Mulder A, De Bruijn P, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8) : 2187-2196.
[7] Jetten M S M, Strous M, Van De Pas-Schoonen K T, *et al.* The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1998, **22**(5) : 421-437.
[8] Kumar M, Lin J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal-Strategies and issues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **178**(1-3) : 1-9.
[9] Lettinga G, Roersma R, Grin P. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, **25**(7) : 1701-1723.

- [10] Vandevivere P. New and broader applications of anaerobic digestion [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, **29**(2): 151-173.
- [11] Tao Y, Gao D W, Fu Y, *et al.* Impact of reactor configuration on anammox process start-up: MBR versus SBR [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **104**: 73-80.
- [12] 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.
- [13] Ho J, Sung S. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(7): 2191-2196.
- [14] Galf A, Dosta J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale; Partial SBR nitrification and SHARON process [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(4): 715-720.
- [15] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [16] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H M, *et al.* Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, **400**(6743): 446-449.
- [17] Lv Y T, Wang L, Sun T, *et al.* Autotrophic nitrogen removal discovered in suspended nitrification system [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(2): 180-185.
- [18] Van Hulle S H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [19] 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*, 2009, **166**(1): 336-341.
- [20] Xiao Y, Zeng G M, Yang Z H, *et al.* Coexistence of nitrifiers, denitrifiers and Anammox bacteria in a sequencing batch biofilm reactor as revealed by PCR-DGGE [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, **106**(2): 496-505.
- [21] 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.
- [22] 易鹏, 张树军, 甘一萍, 等. 城市污水三污泥系统自养脱氮与强化生物除磷 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2390-2397.
- [23] Hendrickx T L G, Wang Y, Kampman C, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2187-2193.
- [24] De Clippeleir H, Yan X G, Verstraete W, *et al.* OLAND is feasible to treat sewage-like nitrogen concentrations at low hydraulic residence times [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(4): 1537-1545.
- [25] 邓胜琳. 市政污水处理中的沼气发电技术 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(10): 40-42.
- [26] Kim J, Kim K, Ye H, *et al.* Anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(2): 576-581.
- [27] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平, 等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析 with 定量识别 [J]. *给水排水*, 2008, **34**(10): 42-45.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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