

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响

张敏¹, 姜滢¹, 汪瑶琪¹, 韦佳敏¹, 陈重军^{1,2,3,4*}, 沈耀良^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009; 4. 江南大学江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 为改善厌氧氨氧化对总氮(TN)去除不完全和有机物对厌氧氨氧化胁迫的问题, 采用厌氧折流板反应器(ABR), 接种成熟的厌氧氨氧化污泥与城市污水处理厂厌氧污泥, 通过不同基质浓度控制, 构建厌氧氨氧化耦合反硝化系统(SAD), 并考察不同进水基质(COD、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N)浓度对耦合系统脱氮除碳效能的影响及污染物去除规律。结果表明, 在 ABR 反应器中可实现厌氧氨氧化与反硝化的耦合反应, 并缓解了有机物对厌氧氨氧化菌的抑制效应。当进水 COD、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度为 260、185 和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 比例为 2.6:1.85:1 时, 三者出水浓度分别低于 10、1.0 和 0.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 去除率达到 99%, 实现系统的稳定运行和 C、N 污染物的超低排放。不同基质浓度和比例条件下, 目标污染物去除基本在第 1 隔室完成, 去除率均在 75% 以上, 且厌氧氨氧化反应在 SAD 耦合系统脱氮中占主导地位。

关键词: 厌氧氨氧化; 反硝化; 基质浓度; 贡献率; 协同作用

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3254-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201712135

Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor

ZHANG Min¹, JIANG Ying¹, WANG Yao-qi¹, WEI Jia-min¹, CHEN Chong-jun^{1,2,3,4*}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to solve the problem of declining total nitrogen (TN) removal caused by anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and the suppression of organic matter for ANAMMOX, the anaerobic baffled reactor (ABR), inoculating ANAMMOX sludge and anaerobic sludge from a municipal WWTP, was selected to construct system of ANAMMOX coupled denitrification (SAD) by the control of different substrate concentration. The SAD was constructed to study the effects of different influent substrates (COD, NO_2^- -N, NH_4^+ -N) on the performance of nitrogen and carbon removal in the coupled system and pollutant removal rules. The results showed that the coupling reaction was achieved in the ABR reactor and the inhibitory effect of organic compounds on anaerobic ammonium oxidation bacteria (AAOB) was relieved. When influent concentrations of COD, NO_2^- -N, and NH_4^+ -N were 260, 185, and 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, which equates to a ratio of 2.6:1.85:1, the concentrations of these substances in the effluent decreased to 10, 1.0, and 0.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The TN removal rate reached 99%, hence stable system operation and ultra-low emissions of carbon and nitrogen pollutants were achieved. Under different conditions of substrate concentrations and ratios, the targeted pollutants were generally eliminated in the first compartment, in which the removal rate reached higher than 75%, and ANAMMOX held the dominant position in the SAD coupled system.

Key words: anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX); denitrification; substrate concentration; rate of contribution; synergistic effect

随着水处理新技术不断革新, 废水低耗处理和超低排放成为热点。厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)作为一种新型的脱氮工艺, 因其高效低耗能的优点而广受关注, 从厌氧氨氧化的启动^[1]、反应的实现与维持^[2]、影响因素的研究^[3]到中试^[4]和规模化的建设^[5], 厌氧氨氧化正逐渐走向应用。然而, 厌氧氨氧化是自养反应, 实际废水中存在的有机物, 会对厌氧氨氧化反应产生不利影响, 同时该过程会生成一定量的硝

酸盐氮, 而使脱氮效果不完全, 难以超低排放。因此, 能否采用厌氧氨氧化和反硝化耦合系统(SAD), 一方面削减有机碳源对厌氧氨氧化的抑制效应, 同时强化总氮的去除, 成为厌氧氨氧化推广应用的重要命题。厌氧氨氧化与反硝化耦合是

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508366, 51578353); 江苏省厌氧生物技术重点实验室开放基金项目(JKLAB201701)

作者简介: 张敏(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: 15289893686@163.com

* 通信作者, E-mail: chongjunchen@163.com

指在一定条件下,厌氧氨氧化反应去除氨氮和亚硝态氮,生成的硝态氮由反硝化反应去除,同时消耗有机碳源,两者相互作用,协同去除碳氮的过程^[6]. 研究者已在升流式厌氧污泥床(UASB)^[7,8]、厌氧序批式活性污泥法(ASBR)^[9]、序批式活性污泥法(SBR)^[10]等反应器实现了 SAD 系统同步脱氮除碳. 但在同一反应体系中,两种功能菌对生长环境、基质要求等不尽相同,导致反应器控制难度较大.

本研究基于厌氧折流板反应器(ABR),该反应器具有显著的生物相分离特性,且结构简单、生物截留能力强、运行效果能力稳定可靠^[11],可使厌氧氨氧化菌在相对较高浓度条件下保持活性稳定^[12]. 本文采用 ABR 反应器构建厌氧氨氧化-反硝化协同脱氮除碳系统,探明不同基质浓度和比例条件下 SAD 系统的耐受度,以期为工艺的实际运行和调控提供借鉴和指导.

1 材料与方法

1.1 研究装置与方法

研究所采用的 ABR 反应器(图 1)由有机玻璃制成. 反应器长 37.5 cm,宽 8 cm,高度 33 cm,持水高度 26.5 cm,总有效容积为 6.36 L. 反应器分为 5 个隔室,各隔室升流区降流区隔间宽度比为 4:1,折流板导向 45°,采用蠕动泵连续进水. 反应器整体密封保证厌氧,采用塑料膜遮光,反应器放置水浴缸中,控制温度在 33℃±2℃.

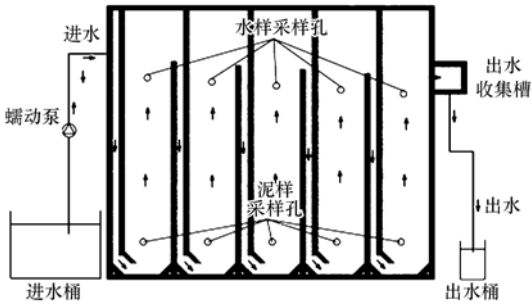


图 1 ABR 反应器装置示意
Fig. 1 Schematic of the ABR reactor

1.2 接种污泥

本研究接种两种污泥,分别为取自苏州市某城市污水处理厂 A²/O 工艺的厌氧池污泥和实验室培养的厌氧氨氧化污泥,按体积比 1:1 混合接种,接种后 ABR 各隔室污泥浓度控制为 8 000 mg·L⁻¹,SVI 分别为 52 mL·g⁻¹,沉降性能良好.

1.3 反应器运行条件

反应器 HRT 设置为 20 h, pH 为 7.5±0.2,采用人工配水,其成分主要包括葡萄糖,(NH₄)₂SO₄, NaNO₂, KHCO₃, KH₂PO₄, MgSO₄·7H₂O, CaCl₂·2H₂O,微量元素 I 和微量元素 II 按照 1 mL·L⁻¹ 添加. 微量元素 I 组分(g·L⁻¹): EDTA 15, FeSO₄ 5; 微量元素 II 组分(g·L⁻¹): EDTA 15, ZnSO₄·7H₂O 0.43, CoCl₂·6H₂O 0.24, MnCl₄·H₂O 0.99, CuSO₄·5H₂O 0.25, NaMoO₄·2H₂O 0.22, NiCl₂·6H₂O 0.19, NaSeO₄·10H₂O 0.21, H₃BO₄ 0.014. ABR 具体运行条件见表 1.

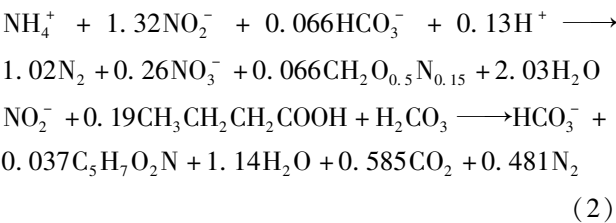
表 1 ABR 的具体运行情况
Table 1 Operation condition of the ABR

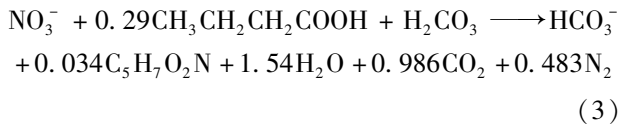
反应器运行阶段	运行时间 /d	进水NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	进水NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	进水 COD /mg·L ⁻¹	COD: NH ₄ ⁺ -N: NO ₂ ⁻ -N
I	1~10	110	75	0	0:1.0:1.47
II	11~22	110	75	40	0.53:1.0:1.47
III	23~34	110	75	100	1.33:1.0:1.47
IV	35~46	110	75	180	2.4:1.0:1.47
V	47~58	110	75	260	3.47:1.0:1.47
VI	59~70	160	75	260	3.47:1.0:2.13
VII	71~82	160	100	260	2.6:1.0:1.6
VIII	83~100	185	100	260	2.6:1.0:1.85

1.4 测定项目与方法

研究过程中每隔 2~3 d 采集反应器各隔室水样,测定项目主要包括 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、COD. NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N: 紫外分光光度法; COD: 快速消解-分光光度法.

1.5 碳氮平衡分析方法





由文献[13, 14]可知,在 SAD 脱氮除碳过程中,既存在以厌氧氨氧化为主的脱氮反应[式(1)],也存在以亚硝酸型反硝化[式(2)]、硝酸型反硝化[式(3)]、厌氧生物处理为辅的脱氮除碳反应,为分析耦合系统中的去除途径,将进水中 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的浓度之和看作一个整体,由厌氧氨氧化去除的 NO_2^- -N占耦合系统反应中 NO_2^- -N和 NO_3^- -N去除总量的比值计算得到厌氧氨氧化反应在耦合反应中的贡献率^[9]:

$A =$

$$\frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{rem}}}{\text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{rem}} - \Delta \text{NO}_3^- - \text{N} + 0.26\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{rem}}} \times 100\% \quad (4)$$

反硝化反应在耦合反应中的贡献率为:

$$D = 1 - A \quad (5)$$

式中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{rem}}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{rem}}$ 分别为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除量; $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化量。

2 结果与讨论

2.1 有机物浓度提升对 SAD 系统碳氮脱除的影响

在反应器运行阶段 I ~ V 期间,维持 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.47$,进水 COD 浓度从 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,有机负荷由 $0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 升至 $0.312 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,明确有机物浓度提升对 SAD 系统碳

氮脱除的影响。由图 2 可知,当进水 COD 浓度由 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (阶段 I ~ IV),出水 COD 维持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,去除率从 0% 升至 93.3%,且每次提高进水 COD 浓度后,出水 COD 浓度呈现先少量升高后迅速下降的趋势,表明 ABR 反应器具有较强的抗有机负荷冲击能力。当反应器运行至第 58 d(第 V 阶段),进水 COD 为 $260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水 COD 浓度由 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下提高至 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,虽然 COD 去除量继续升高至 $234 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但去除率下降至 88%。尽管 ABR 反应器 SAD 协同体系对 COD 有一定的耐受性,但过高的有机物浓度还是会破坏系统的稳定,这与杨洋等^[15]在研究有机物对厌氧氨氧化的影响结论相一致,认为低浓度($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)有机物对污泥的厌氧氨氧化活性影响不大,但高浓度有机物($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)将明显影响耦合系统的脱氮除碳效果。

在整个有机负荷提高期,反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 分别低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,协同体系对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率维持在 98% 和 97% 以上,由图 3 可知,随着进水有机负荷的提升, TN 去除量变化趋势相对稳定,且维持在 $163 \sim 176 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率达 94%,表明该有机负荷对反应器的脱氮效能影响较小。

2.2 基质比例对 SAD 系统碳氮脱除的影响

阶段 VI ~ VIII,维持进水 COD 浓度为 $260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,通过调整进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,控制 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 1.6 ~ 2.1,考察 SAD 系统在固定

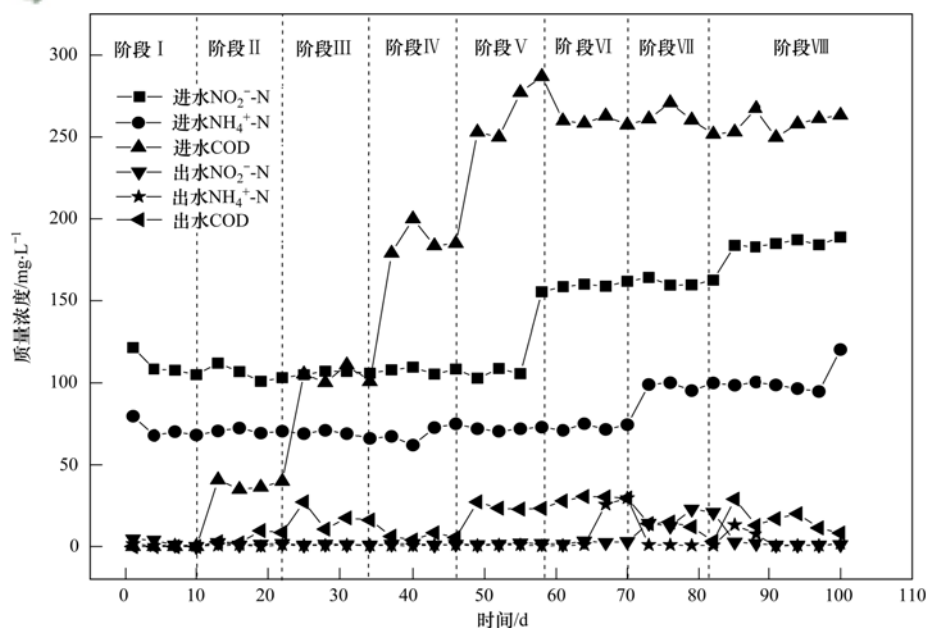


图 2 ABR 各阶段稳定运行时进出水参数变化

Fig. 2 Changes in influent and effluent parameters for each stage of stable operation of the ABR

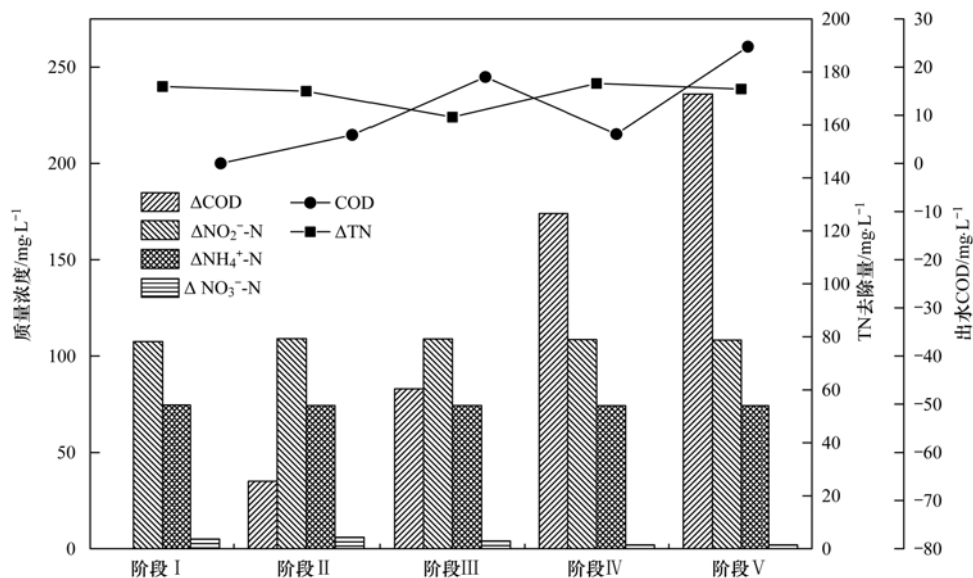


图3 阶段 I ~ V 期间 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 消耗量和 NO₃⁻-N 改变量

Fig. 3 Organic matter, ammonium, nitrite removal, and nitrate production during phases I - V

有机负荷下的恢复能力。由图 2 可知,随着进水 NO₂⁻-N 浓度由 110 mg·L⁻¹ 提高至 160 mg·L⁻¹, NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比达 2.1, NO₂⁻-N 浓度过量 (阶段 VI), ABR 反应器出水 COD 并未改善,且出水 NH₄⁺-N 浓度呈现升高的趋势,从低于 1 mg·L⁻¹ 升高至 27.7 mg·L⁻¹,说明当 NO₂⁻-N/NH₄⁺-N = 2.1 条件下,厌氧氨氧化菌的活性受到抑制,脱氮效率降低,推测 NO₂⁻-N 作为厌氧氨氧化的主要基质,所产生的基质抑制性 (尤其是 NO₂⁻-N 的自抑制) 是限制厌氧氨氧化工艺运行性能的障碍因子^[16]。运行至 70 d (阶段 VII),调整进水 NH₄⁺-N 由 75 mg·L⁻¹ 至 100 mg·L⁻¹,NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比由 2.1 降为 1.6,该阶段出水 NH₄⁺-N 浓度恢复至 1 mg·L⁻¹ 以下,去除率由 60% 回升至 99%,出水 COD 浓度降至 15 mg·L⁻¹ 以下,去除率由 88% 升至 95% 左右。然而出水 NO₂⁻-N 由 5 mg·L⁻¹ 以下提高至 22 mg·L⁻¹ 左右,去除率由 95% 以上降至 86%,推测是因为 NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 基质比的突然降低,污泥对新环境的不适应导致去除途径受到冲击,造成 NO₂⁻-N 的利用率降低。于德爽等^[17] 提出基质浓度变化会影响有效基质量,在中性或碱性条件下,水相中氮化物的主要存在形式为游离氨 (FA) 和亚硝酸根 (NO₂⁻),因它们是直接基质,提高基质浓度可加速反应进程。但阶段 VI 和阶段 VII 期间反应器出水水质变差,主要是基质浓度提升过快引发了基质浓度的自抑性所致。

为恢复 ABR 反应器的协同脱氮除碳效能,在运

行至第 83d (阶段 VIII) 时,固定 NH₄⁺-N 浓度为 100 mg·L⁻¹,将进水 NO₂⁻-N 由 160 mg·L⁻¹ 升至 185 mg·L⁻¹,NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比为 1.85,出水 NH₄⁺-N、COD 浓度出现波动后分别平稳在 1 mg·L⁻¹、10 mg·L⁻¹ 以下,出水 NO₂⁻-N 一直处于较低浓度 (1 mg·L⁻¹ 左右),表明在该基质浓度下,反应器的协同脱氮除碳能力较好。研究表明,当 NO₂⁻-N 进水浓度达到 100 mg·L⁻¹ 时,可以强烈抑制厌氧氨氧化菌的活性^[16]。同时, Egli 等^[18] 的研究结果认为 185 mg·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N 能使厌氧氨氧化菌完全失活。但本研究中,进水 185 mg·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N 并没有抑制厌氧氨氧化菌,这是因为不同的厌氧氨氧化菌种对 NO₂⁻-N 的耐受程度有差异,如 *Brocadia anammoxidans* 菌能耐受 10 mmol·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N,而 *Kuenenia stuttgartiensis* 菌能耐受 13 mmol·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N^[18]; Tsushima 等^[19] 报道厌氧氨氧化菌适应质量浓度为 710 mg·L⁻¹ 的 NO₂⁻-N 可能是由于反应器中富集了高浓度厌氧氨氧化菌的原因,说明了不同反应器、水质条件造成的菌种多样性会导致差异化研究成果。本研究在 NO₂⁻-N 浓度相对过量 (NO₂⁻-N/NH₄⁺-N = 1.85) 的情况下,得到系统最佳的协同脱氮除碳效果。朱明石等^[20] 的研究发现,有机碳源存在的环境下,由于反硝化菌的生长速度大于厌氧氨氧化菌而大量繁殖,在竞争 NO₂⁻-N 时占据优势。因此,相对过量的 NO₂⁻-N 浓度 (NO₂⁻-N/NH₄⁺-N > 1.32) 有利于保证 SAD 中反硝化与厌氧氨氧化反应相平衡。

值得注意的是,前人研究表明,厌氧氨氧化与反硝化耦合反应器的启动过程分为迟滞阶段、适应阶段、稳定阶段^[8, 21, 22],且张诗颖等^[23]于 ABR 中启动 SAD 时,也出现了前 10 d 反应器处于适应期, NH_4^+ -N 去除率降低、 NO_2^- -N 去除率升高的现象,在本研究中并没有出现,推测是因为接种的厌氧氨氧化污泥经有机物驯化而来,对其更具耐受性。

2.3 运行阶段 ABR 各隔室对污染物去除贡献率

各阶段不同工况下稳定运行时各隔室去除量浓度变化见图 4、图 5。ABR 反应器对所有污染物的去除大部分都在第 1 隔室完成,这与成功启动的 ABR 厌氧氨氧化氮素去除情况相似^[1]。由图 4 可知, C/N 比由 0 ~ 3.5 的过程中, 75% 以上的

NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和几乎全部的 NO_3^- -N 依靠第 1 隔室来去除,且第 1 隔室对 COD 的去除贡献率从 56% 升至 96.5%。C/N 为 3.5 时第 1 隔室的 COD 去除量维持在 $210 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。但随着负荷的提高,第 2 隔室承担的去除量比例略有提高, ΔCOD 、 ΔNH_4^+ -N 和 ΔNO_2^- -N 分别升高 5、8 和 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明在 ABR 反应器内,基质会随着负荷的增大向后面隔室推移,这与吕亮等^[24]在 ABR 中提高容积负荷,基质向后推移的规律一致,该现象是由于在 ABR 中,低浓度底物本身会降低传质的推动力^[25],从而展现良好的去除效果,但当进水负荷不断提升,前段隔室的生物量及其活性仍维持在上一阶段,故剩余基质会不断地向后推移。后续第 3、4、5 隔室对 COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除贡献率低于 2%。

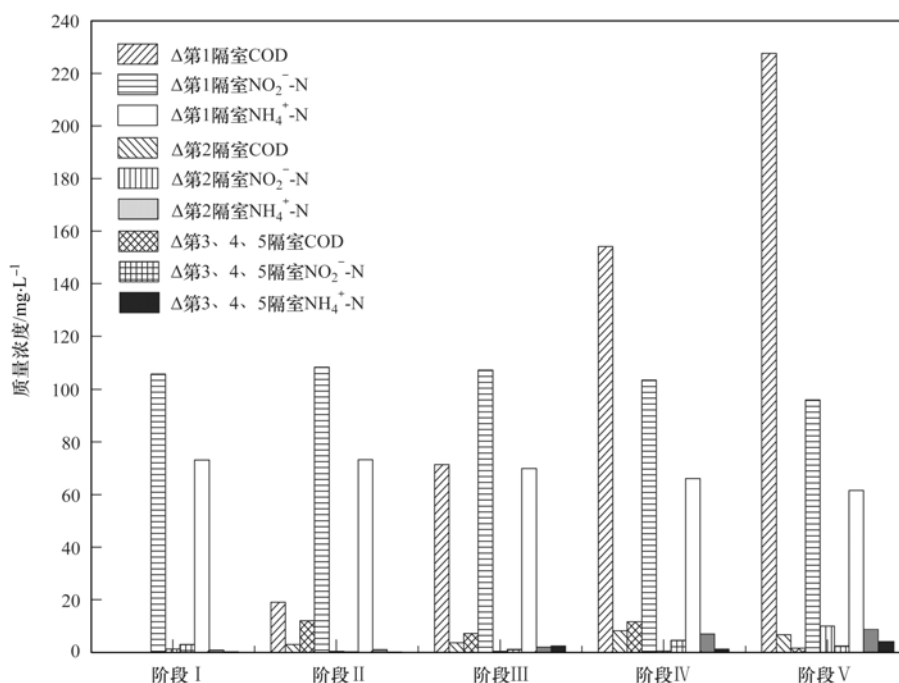


图 4 阶段 I ~ V 期间 COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 在各隔室的去除量

Fig. 4 Organic matter, ammonium, and nitrite removal in each compartment during phases I-V

阶段 VI ~ VIII 期间反应器各隔室对污染物的去除情况如图 5 所示,当 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 由 1.5 升至 2.1,第 1 隔室对 NO_2^- -N 和 COD 的去除贡献率维持在 90% 以上,对 NH_4^+ -N 的去除贡献率由 83% 升至 89%。当 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 由 2.1 降至 1.6,第 1 隔室对 NO_2^- -N 的去除贡献率维持在 90% 以上,而对 NH_4^+ -N 的去除贡献率由 89% 降至 78%,对 COD 的去除贡献率由 94% 降至 88%,第 2 隔室对 NH_4^+ -N 的去除贡献率由 6% 升至 18%,对 COD 的去除贡献率由 3% 升至 7%。当 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 由 1.6 升至

1.85,第 1 隔室对 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、COD 的去除贡献率继续降至 85%、75%、81%,而第 2 隔室对其去除贡献率升至 13%、25%、12%,这可能是高氮负荷已对第 1 隔室厌氧氨氧化菌产生抑制而导致。在整个反应期间其余 3 个隔室对各物质的去除贡献率各维持在 2% 以下。上述结果可知,ABR 第 1 隔室富集了大量的厌氧氨氧化菌和反硝化菌,承担了主要的脱氮除碳功能,这与陈重军等^[26]在 ABR 中启动厌氧氨氧化时的富集规律一致。当容积负荷不断提高,基质会不断向后续隔室推进,各隔室共同完成碳氮的同步去除,表明 ABR 厌氧氨氧化-反硝化

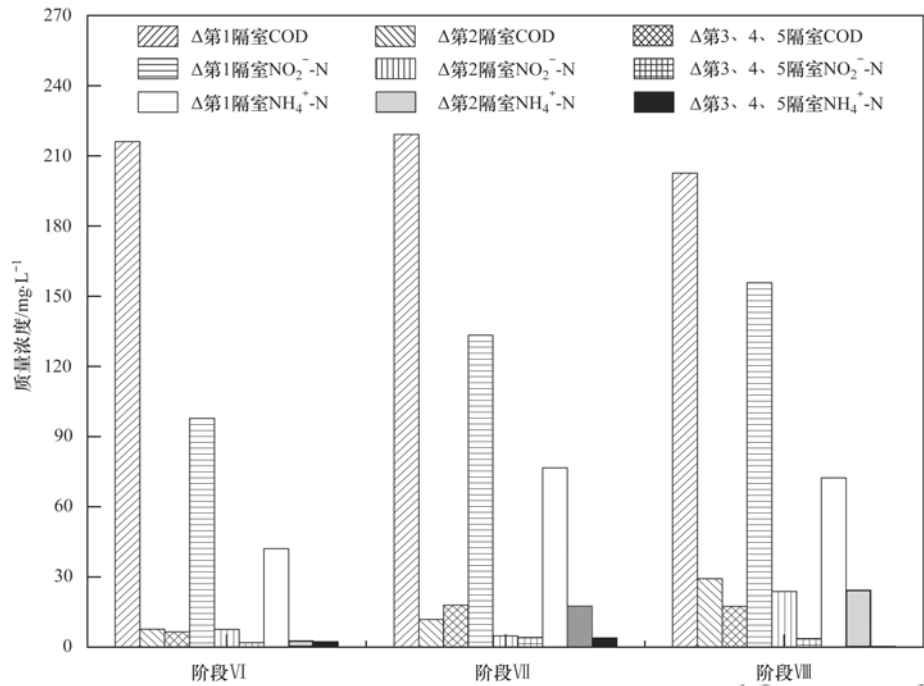


图5 阶段VI~VIII期间COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在各隔室的去除量

Fig. 5 Organic matter, ammonium, and nitrite removal in each compartment during phases VI-VIII

系统对基质浓度变化具有良好的稳定性。

2.4 ABR 碳氮同步去除和转化规律

根据公式(1)、(2)、(3)进行物料衡算^[13,27]可知,几乎所有的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都由厌氧氨氧化反应去除,同时去除1.32倍的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,而剩余的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 由亚硝酸型反硝化去除,且消耗掉1.71倍 $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的COD,进水的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与厌氧氨氧化反应生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由硝酸型反硝化反应去除,且消耗掉2.86倍 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的COD。剩余的COD由厌氧生物除碳过程来完成,而厌氧氨氧化和反硝化反应在耦合反应中的去除贡献率由式(4)计算得出。

如图6所示,有机负荷提高期间(阶段I~V),厌氧氨氧化对系统耦合脱氮的贡献率维持在80%左右,且在阶段IV进水COD浓度为 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,厌氧氨氧化贡献率出现降低后迅速回升,说明有机负荷的提高对厌氧氨氧化菌的影响较小,在该系统中厌氧氨氧化菌的活性可以很快得到恢复。进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在1.5~2.1期间(阶段VI),厌氧氨氧化的脱氮贡献率由80%降至54%左右,而反硝化脱氮贡献率由20%升至46%,表明过量的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度抑制了厌氧氨氧化菌的活性,厌氧氨氧化反应对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度变化的敏感程度高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[3]。随着 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降至1.6,厌氧氨氧化脱氮贡献率逐渐恢复至65%,继续提高基质比例至1.85时,其贡献率维持在60%~65%。在整个基

质浓度变化期间,厌氧氨氧化对SAD耦合系统的脱氮贡献率占主导地位,与魏思佳等^[28]研究得到的COD/ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 值在1~3.75时,厌氧氨氧化反应的去除贡献率在SAD系统中占主导地位的结论一致。

在本研究中,运行阶段VIII期间,ABR反应器SAD系统脱氮除碳效能达到最优,该工况下各去除途径占系统脱氮除碳的百分比如图7所示,其中,厌氧氨氧化反应占整个系统的60%,亚硝酸型反硝化对系统脱氮除碳的贡献占15.12%,硝酸型反硝化占11.68%,而厌氧生物除碳反应占13.2%。

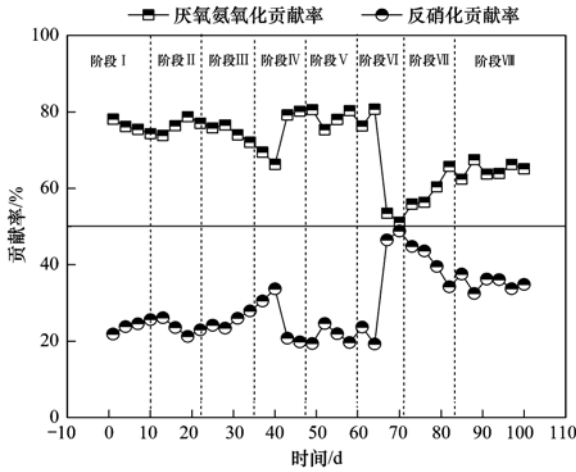


图6 阶段I~VIII期间厌氧氨氧化与反硝化对系统脱氮的贡献率

Fig. 6 Contribution of anaerobic ammonium oxidation and denitrification to the system denitrification during phases I-VIII

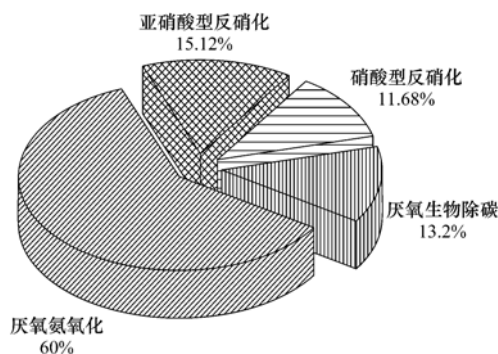


图7 最优工况下各脱氮除碳途径所占的百分比

Fig. 7 Percentage of each nitrogen removal pathway in a typical period

3 结论

(1) ABR 反应器可实现厌氧氨氧化-反硝化耦合系统协同脱氮除碳,在基质比为 $\text{COD}:\text{NO}_2^--\text{N}:\text{NH}_4^+-\text{N}=2.6:1.85:1$ 时,获得最优污染物去除效果, COD 去除率为 96%, NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 TN 去除率均达到 99%、99%、99%,可实现出水污染物的超低排放。

(2) 不同进水基质浓度条件下,各污染物质的去除基本在第 1 隔室完成。最优工况下第 1 隔室对 COD、 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除贡献率为 85%、75%、81%,第 2 隔室对其的去除贡献率为 13%、25%、12%,其余几个隔室的去除贡献微弱。

(3) 耦合反应器在多基质 (COD 、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N) 存在条件下,虽然会产生反硝化作用,但厌氧氨氧化反应仍占主导地位,且对系统耦合脱氮的贡献率维持在 50% 以上,厌氧氨氧化与反硝化反应相互促进,协同去除系统中的有机物及总氮。

参考文献:

- [1] 闫刚,徐乐中,沈耀良,等.快速启动厌氧氨氧化工艺[J].环境科学,2017,38(3):1116-1121.
Lü G, Xu L Z, Shen Y L, *et al.* Quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process[J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1116-1121.
- [2] 李媛.厌氧氨氧化工艺启动和运行特性及其受抑机理研究[D].无锡:江南大学,2014.
Li Y. Start-up and performance characteristics of anaerobic ammonium oxidation process and its repressed mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [3] 陈重军,冯宇,汪瑶琪,等.厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J].生态环境学报,2016,25(2):346-352.
Chen C J, Feng Y, Wang Y Q, *et al.* Research progress in influence factor of anammox reaction [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 346-352.
- [4] 唐崇俭,郑平,张吉强,等.中试厌氧氨氧化反应器的运行性能及其过程动力学特性[J].环境科学,2010,31(8):1834-1838.
Tang C J, Zheng P, Zhang J Q, *et al.* Performance and process kinetics of pilot-scale anammox bioreactor under different water temperatures[J]. Environmental Science, 2010, 31(8): 1834-1838.
- [5] Cao Y S, Leng L C, Li L, *et al.* Mass flow and energy efficiency in a large water reclamation plant in singapore[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2013, 3(4): 402-409.
- [6] 黄孝肖,陈重军,张蕊,等.厌氧氨氧化与反硝化耦合反应研究进展[J].应用生态学报,2012,23(3):849-856.
Huang X X, Chen C J, Zhang R, *et al.* Research progress in anammox-denitrification coupling process[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 849-856.
- [7] 刘常敬,李泽兵,郑照明,等.苯酚对厌氧氨氧化工艺耦合反硝化的启动及脱氮性能的影响[J].中国环境科学,2014,34(5):1145-1151.
Liu C J, Li Z B, Zheng Z M, *et al.* Effect of phenol on startup and nitrogen removal performance of ANAMMOX coupling denitrifying[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1145-1151.
- [8] 李伙生,周少奇,孙艳波,等. ANAMMOX 与反硝化协同脱氮反应器的启动特性研究[J].中国给水排水,2009,25(21):29-32.
Li H S, Zhou S Q, Sun Y B, *et al.* Start-up characteristics of ANAMMOX/denitrification reactor [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(21): 29-32.
- [9] 于德爽,魏思佳,李津,等.温度对厌氧氨氧化与反硝化耦合脱氮除碳的影响[J].中国环境科学,2016,36(5):1384-1391.
Yu D S, Wei S J, Li J, *et al.* Effect of temperature on simultaneous carbon and nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation and denitrification [J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1384-1391.
- [10] 李冬,杨巧云,曾辉平,等. SAD 工艺在厌氧氨氧化不同运行阶段的启动[J].中国环境科学,2017,37(5):1775-1782.
Li D, Yang Q Y, Zeng H P, *et al.* The startup of simultaneous anammox and denitrification process at different operational phases of anammox[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1775-1782.
- [11] Jin R C, Yu J J, Ma C, *et al.* Performance and robustness of an ANAMMOX anaerobic baffled reactor subjected to transient shock loads[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 126-136.
- [12] 李泽兵,刘常敬,赵白航,等.多基质时厌氧氨氧化菌、异养反硝化污泥活性及抑制特征[J].中国环境科学,2013,33(4):648-654.
Li Z B, Liu C J, Zhao B H, *et al.* Activity and inhibition characteristics of anammox and heterotrophic denitrifier bacteria in a multi-substrate system [J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 648-654.
- [13] 周少奇.厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(5):1-4.
- [14] 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.
- [15] 杨洋,左剑恶,沈平,等.温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J].环境科学,2006,27(4):691-695.

- Yang Y, Zuo J E, Shen P, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [16] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [17] 于德爽, 李伟刚, 李津. ASBR 反应器厌氧氨氧化脱氮 I: 工艺特性与控制策略[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2176-2183.
- Yu D S, Li W G, Li J. Nitrogen removal in the anammox sequencing batch reactor I: performance and control strategies [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(12): 2176-2183.
- [18] Egli K, Fanger U, Alvarez P J J, *et al.* Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate [J]. *Archives of Microbiology*, 2001, **175**(3): 198-207.
- [19] 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.
- [20] 朱明石, 周少奇. 厌氧氨氧化-反硝化协同脱氮研究[J]. *化工环保*, 2008, **28**(3): 214-217.
- Zhu M S, Zhou S Q. Study on anaerobic ammonium oxidation-denitrification synergistic interaction [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2008, **28**(3): 214-217.
- [21] 孙艳波, 周少奇, 李伙生, 等. ANAMMOX 与反硝化协同脱氮反应器启动及有机负荷对其运行性能的影响[J]. *化工学报*, 2009, **60**(10): 2596-2602.
- Sun Y B, Zhou S Q, Li H S, *et al.* Start-up of ANAMMOX-denitrification reactor and effect of organic loading on its performance of synergistic interaction[J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(10): 2596-2602.
- [22] Chamehoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [23] 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 等. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4174-4179.
- Zhang S Y, Wu P, Song Y L, *et al.* Nitrogen removal using ANAMMOX and denitrification for treatment of municipal sewage [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4174-4179.
- [24] 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 等. 容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 239-246.
- Lü L, You W, Wei J M, *et al.* Effect of volume loading rate (VLR) on denitrifying phosphorus removal by the ABR-MBR process[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 239-246.
- [25] 杜接弟, 王毅力, 李炯, 等. HRT 对 ABR 处理低浓度废水的效果和颗粒污泥特征的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2022-2029.
- Du J D, Wang Y L, Li J, *et al.* Impact of hydraulic retention time (HRT) in ABR on its operation performance and granular sludge characteristics when treating low-strength wastewater [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 2022-2029.
- [26] 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [27] Chen C J, Huang X X, Lei C X, *et al.* Effect of organic matter strength on anammox for modified greenhouse turtle breeding wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 172-179.
- [28] 魏思佳, 于德爽, 李津, 等. 厌氧氨氧化与反硝化耦合脱氮除碳研究 I: COD/NH₄⁺-N 对耦合反应的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 759-767.
- Wei S J, Yu D S, Li J, *et al.* Simultaneous carbon and nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation and denitrification I: effect of COD/NH₄⁺-N on coupled reaction [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 759-767.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)