

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铎鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系	李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马蛟蛟, 徐颂军 (2496)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动

陈亚¹, 印雯¹, 张星星¹, 张钰¹, 宋吟玲^{1,2,3*}, 吴鹏^{1,2,3}, 徐乐中^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 采用厌氧折流板反应器与完全混合反应器 (ABR-CSTR) 组合的一体式工艺作为试验载体, 在连续流的运行条件下, 针对低碳高氨氮 ($\text{NH}_4^+-\text{N} \geq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 污水, 将不同隔室内的普通厌氧污泥驯化培养为分别具有反硝化除磷、部分亚硝化和厌氧氨氧化功能, 以实现三者功能的耦合. A4 (CSTR) 段通过限氧 ($\text{DO} = 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和间歇曝气 (曝: 停比 = 30 min: 30 min) 的方式经过 30 d 成功实现部分亚硝化的启动. 随后进一步采取缩短水力停留时间 (HRT) 的方式实现部分亚硝化的稳定运行, 为厌氧氨氧化提供了 $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 1.0 ~ 1.1 的稳定进水基质. A5 和 A6 隔室运行 154 d 后实现了厌氧氨氧化功能, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率分别为 94% 和 97%, 其出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度稳定在 $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. A1 ~ A3 隔室利用回流中的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 作为电子受体成功实现了反硝化除磷功能, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率为 77%. 一体式工艺经过 175 d 成功耦合, 实现了碳、氮和磷的同步高效去除.

关键词: 反硝化除磷 (DPR); 部分亚硝化 (PN); 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 耦合; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2367-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201907188

Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation

CHEN Ya¹, YIN Wen¹, ZHANG Xing-xing¹, ZHANG Yu¹, SONG Yin-ling^{1,2,3*}, WU Peng^{1,2,3}, XU Le-zhong^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National Regional Engineering Laboratory of Urban Domestic Wastewater Resources Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: An integrated process uses an anaerobic baffled reactor combined with a fully mixed reactor (ABR-CSTR) as a test carrier for low-carbon, high-ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N} \geq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) wastewater under continuous flow operating conditions; the normal anaerobic sludge in different compartments is subjected to domestication and cultivation to realize denitrifying phosphorus removal, partial nitrification, and anaerobic ammonium oxidation, thereby achieving the coupling effect of the three. Partial nitrification was successfully achieved in the A4 (CSTR) section by the strategy of limited oxygen (dissolved oxygen $\text{DO} = 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and intermittent aeration (exposure ratio = 30 min: 30 min) after 30 days. Subsequently, a strategy of shortening the hydraulic retention time (HRT) was adopted to achieve a stable operation of partial nitrification, and a stable influent substrate of $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 1.0-1.1 was provided for anaerobic ammonium oxidation. The anaerobic ammonium oxidation function was achieved after 154 days in the A5 and A6 compartments. The removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were 94% and 97%, respectively, and the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in the effluent was stable at $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The denitrifying phosphorus removal function was successfully achieved in the A1-A3 compartments by using $\text{NO}_x^- - \text{N}$ in the reflux as an electron acceptor. The removal rate of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ was 77%. The integrated process was successfully coupled through 175 days, achieving simultaneous removal of C, N, and P.

Key words: denitrifying phosphorus removal (DPR); partial nitrification (PN); anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); coupling; nitrogen and phosphorus removal

目前, 高效脱氮和高效除磷工艺已取得较多研究成果, 如厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 工艺^[1,2]、全程自养脱氮 (CANON) 工艺^[3,4] 和反硝化除磷 (DPR) 工艺^[5,6] 等, 如何将高效的脱氮工艺和除磷工艺合理地耦合, 以实现污水的同步脱氮除磷成为研究热点^[7].

反硝化除磷工艺利用反硝化聚磷菌 (DPAOs) 以硝酸盐氮/亚硝酸盐氮为电子受体的特性^[8,9], 解决了传统聚磷菌对曝气的依赖, 不仅节省了 30% 的曝气能耗, 减少了 50% 的碳源需求, 还大大降低

了污泥产量^[10,11], 在除磷方面极具优势^[12]; 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺因其无需添加有机碳源, 高效低耗的特点^[13], 广泛应用于对高氨氮废水的处理中^[14~16], 但在处理过程中会不可避免地产生较多的

收稿日期: 2019-07-22; 修订日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353); 江苏省自然科学基金项目 (BK20160356); 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划项目

作者简介: 陈亚 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: m15862351567@163.com

* 通信作者, E-mail: 807118983@qq.com

硝酸盐氮^[17,18].

基于此,本文以 ABR-CSTR 组合反应器作为试验载体,通过在不同隔室内接种普通厌氧污泥,研究反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动.同时利用后者产生的硝酸盐氮作为反硝化除磷的电子受体,探究耦合工艺针对如污泥厌氧消化液、味精废水等低碳高氨氮废水同步脱氮除磷处理特点,以期为实现污水的同步脱氮除磷处理提供新思路.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验装置采用有机玻璃制作.如图 1 所示,反应器总有效体积 11.8 L,长 63 cm,宽 12 cm,有效高度 20 cm,共分为 6 个隔室,A1、A2、A3、A4、A5 和 A6,各隔室的有效体积及功能见表 1.系统设置两个回流装置:A3 隔室设置污泥回流装置,A6 隔室设置 NO₃⁻-N 回流装置.同时,为促进 A1~A3 系统内循环,在 A1 隔室设置搅拌装置.A4 隔室底部设置直径 2 cm 的圆柱形曝气砂头.A5 和 A6 隔室外部采用遮阳塑料膜遮住避光.整个反应器置于水浴缸中进行恒温水浴加热,温度控制在 28~30℃.系统通过 A3 隔室底部排泥口定期排泥,控制污泥龄为 25 d,将富含无机物和磷的污泥定时排出.

表 1 A1~A6 各隔室参数及预期功能

Table 1 A1-A6 compartment parameters and expected functions			
隔室	控制条件	有效容积/L	预期实现功能
A1	厌氧	2.3	反硝化除磷功能
A2	缺氧	2.1	反硝化除磷功能
A3	缺氧	2.0	反硝化除磷功能
A4	先好氧,后缺氧	1.9	部分亚硝化功能
A5	厌氧	1.8	厌氧氨氧化功能
A6	厌氧	1.7	厌氧氨氧化功能

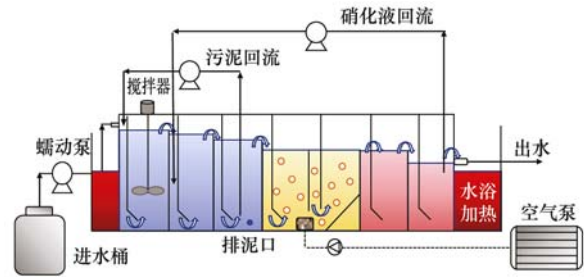


图 1 ABR-CSTR 组合装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ABR-MBR setup

1.2 接种污泥及进水水质

本试验接种污泥均取自苏州市某污水处理厂的普通厌氧污泥,MLSS 约为 4 400 mg·L⁻¹,污泥含水率 99.7%.试验进水采用人工配水,具体进水水质如表 2 所示.

表 2 进水水质

Table 2 Characteristics of the raw wastewater			
进水组分	浓度/mg·L ⁻¹	进水组分	浓度/mg·L ⁻¹
COD	180~220	COCl ₂ ·6H ₂ O	0.15
NH ₄ ⁺ -N	180~220	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.12
TP	6~8	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
MgSO ₄	10	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.06
CaCl ₂	10	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5	KI	0.03
H ₃ BO ₃	0.1	NaHCO ₃	根据实际情况添加

1.3 测定项目与方法

试验过程中每隔 2 d 分别采集各隔室水样及进水水样进行测定,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: DRB 200 COD 消解仪-分光光度法;PO₄³⁻-P: 钼锑抗分光光度计;TN: 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;MLSS、MLVSS: 标准重量法;SVI: 30 min 沉降法;pH、DO: 便携式测定仪.

为方便数据分析,定义 A4 隔室中实现部分亚硝化的两个参数——氨氮去除率($R_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$)、硝氮转化率($R_{\text{NO}_3^--\text{N}}$)^[19]:

$$R_{\text{NH}_4^+-\text{N}} = \frac{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{in}} - [\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{e}}}{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{in}}} \times 100\%$$
$$R_{\text{NO}_3^--\text{N}} = \frac{[\text{NO}_3^--\text{N}]_{\text{e}}}{[\text{NO}_2^--\text{N}]_3 + [\text{NO}_3^--\text{N}]_{\text{e}}} \times 100\%$$

式中,角标 in 表示 A4 隔室进水组分浓度,e 表示 A4 隔室出水组分浓度.部分亚硝化工艺要求 $R_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为 50%~57%, $R_{\text{NO}_3^--\text{N}}$ 小于 20%.

2 结果与讨论

2.1 部分亚硝化的启动及稳定运行

部分亚硝化是整个耦合工艺的中枢部分,其快速启动及稳定运行不仅直接影响后续厌氧氨氧化的启动,同时也间歇影响硝化除磷电子受体的供应.因此,部分亚硝化的快速启动及稳定运行是试验的关键环节.

本试验进水 NH₄⁺-N 浓度维持在 200 mg·L⁻¹ 左右,进水水质稳定.部分亚硝化的启动调控条件如表 3 所示:试验初期,由于接种污泥含水率较高,污泥沉降性能较差,因此采用连续好氧曝气的方式进行污泥驯化,DO 控制在 1.5~2 mg·L⁻¹.如图 2 所示,反应器运行至第 10 d,达到最高为 77.4%,为 67.7%,异养反硝化菌利用前段出水中较多的剩余 COD 快速繁殖,处于优势地位.在 AOB 富集阶段,采用限氧^[20]和间歇曝气^[21,22]的方式进行部分亚硝化的快速启动.第 13 d,对 CSTR 隔室进行限氧调控,DO 降低至 0.8 mg·L⁻¹,进行 AOB 的富集.值得注意

的是,在限氧后的 2~3 d,迅速下降,出水 NO_2^- -N浓度逐渐升高. 低氧条件下运行至第 23 d,CSTR 系统内 NO_2^- -N累积达到 $80.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 NO_3^- -N含量仅剩 $21.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 为了进一步满足后续厌氧氨氧化进

水质的要求,试验运行至第 24 d 时,对 CSTR 格室采用间歇曝气方式,曝停比为 1:1 (30 min: 30 min),间歇曝气环境下运行至第 30 d,为 50%,稳定在 20% 以下,表明部分亚硝化成功启动.

表 3 A4(CSTR) 隔室部分亚硝化的启动及稳定运行工况

Table 3 Start-up and stable operation conditions of partial nitritation in the A4(CSTR) compartment					
阶段	时间/d	调控策略	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT /h	温度 / $^{\circ}\text{C}$
污泥驯化阶段	1~12	连续好氧曝气	1.5~2.0	5	28~30
AOB 富集阶段	13~24	限氧;连续低氧曝气	0.8	5	28~30
	25~51	间歇曝气: 曝停比为1:1 (30 min: 30 min)	0.8	5	28~30
稳定运行阶段	52~175	缩短水力停留时间(HRT)	0.8	3	28~30

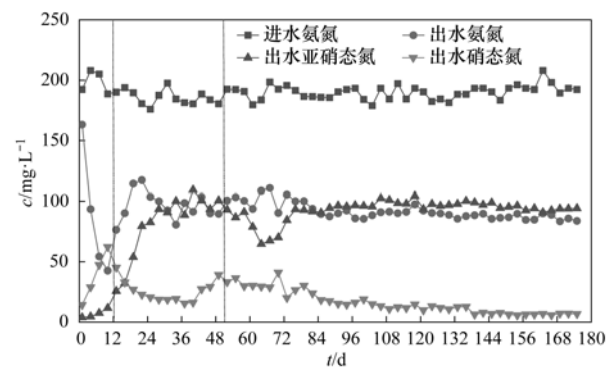


图2 A4(CSTR) 隔室部分亚硝化启动过程中氮素的转化
Fig. 2 Nitrogen conversion during partial nitritation initiation in compartment A4(CSTR)

反应器运行至第 52 d 时,CSTR 出水 NO_3^- -N浓度高达 $41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时出水中 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N浓度出现波动较大的现象. 为了进一步淘洗 NOB,维持部分亚硝化出水的稳定性,将 HRT 从 5 h 缩短至 3 h,经过 26 d 淘洗,出水中 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N稳定在 1.0~1.1 之间,出水 NO_3^- -N维持在 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,

部分亚硝化保持稳定.

2.2 厌氧氨氧化的启动

根据进水基质的稳定性,图 3 厌氧氨氧化的启动过程可分为 3 个阶段,分别为基质生成期(1~29 d),基质波动期(30~78 d),基质稳定期(79~175 d).

第 I 阶段(1~29 d),厌氧氨氧化进水基质浓度受前段部分亚硝化启动的影响,进水尚无法满足厌氧氨氧化的基质要求,此阶段 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的进出水浓度基本不变,ANAMMOX 菌未得到有效富集.

第 II 阶段(30~78 d),部分亚硝化成功启动后,厌氧氨氧化的进水基质呈现出相对的稳定性,浓度均维持在 $80\sim100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器运行至第 52 d, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N去除率分别为 51.3% 和 48.7%,ANAMMOX 菌活性增强,系统呈现出一定的厌氧氨氧化效果. 随后 NH_4^+ -N去除率不升反降,出水中 NH_4^+ -N 浓度与 NO_2^- -N 浓度均呈上升趋势,

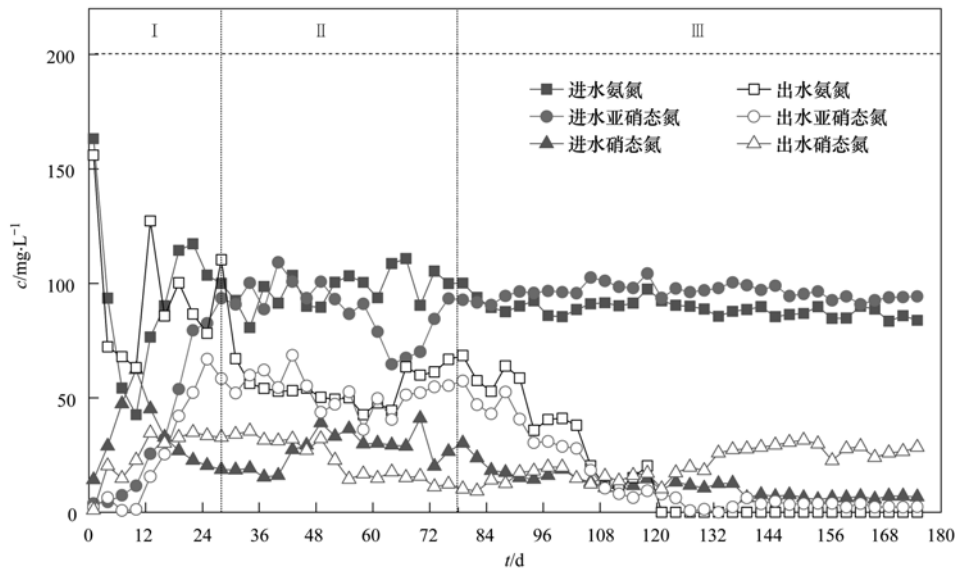


图3 A5~A6 隔室厌氧氨氧化启动过程中氮素的转化

Fig. 3 Nitrogen conversion during anaerobic ammonium oxidation initiation in A5-A6 compartment

ANAMMOX 菌活性受到一定程度抑制. 这主要是由于前段部分亚硝化的失稳造成进水基质波动较大, 进而影响了后续厌氧氨氧化的启动进程. 在整个第 II 阶段, 由于厌氧氨氧化进水基质的不稳定, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率整体呈先上升后下降趋势, 严重延缓了厌氧氨氧化的启动.

第 III 阶段 (79 ~ 175 d), 进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 基质比始终维持在 1.0 ~ 1.1 之间, ANAMMOX 菌获得快速富集, 此时出水中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度显著下降, 并表现出一致性. 在稳定的进水基质条件下, 反应器运行 75 d 后, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除率分别达到 94.2% 和 96.5%, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 去除量与 NO_3^- -N 生成量呈现出 1:1.20:0.22 的比例关系, 与理论值^[23]接近, 标志着厌氧氨氧化的成功启动.

2.3 反硝化除磷的启动

本试验进水 PO_4^{3-} -P 的浓度维持在 6 ~ 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 启动过程中通过系统末端 A6 隔室上清液回流为反硝化除磷提供电子受体, 回流比根据出水 NO_x^- -N 浓度进行不断调整. 如图 4 所示, 启动初期 (1 ~ 11 d), 系统内聚磷菌 (PAOs) 富集程度较低, A3 隔室出水中 PO_4^{3-} -P 浓度为 5.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后在较多剩余 COD 的作用下, PO_4^{3-} -P 在 A5 和 A6 的厌氧环境中进一步释放, 此时系统出水 PO_4^{3-} -P 浓度达到 8.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统 PO_4^{3-} -P 去除率为 -30.5%. 这主要是由于反应器运行初期, A1 段未能充分吸收进水 COD, 既影响了磷的去除效果, 又导致了二次释磷的出现. 污泥经过 26 d 驯化后, 厌氧段 (A1) 释磷量从 4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 12.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, A3 隔室出水和系统出水 PO_4^{3-} -P 的浓度分别为 4.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 去除率提高至 35.9%. 反应器运行第 46 d, 回流至前端的电子受体中 NO_2^- -N 浓度为

25.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 浓度为 7.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时 PO_4^{3-} -P 去除率突降至 2.9%, 继续运行一段时间后发现, PO_4^{3-} -P 去除率仍旧维持在较低水平, 推测是回流中较高浓度的 NO_2^- -N 对 DPAOs 产生了毒害作用, DPAOs 活性受到严重抑制. 随后降低回流比使得回流至前段的 NO_2^- -N 浓度维持在 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 系统运行至 91 d 时, PO_4^{3-} -P 去除率由 2.9% 提高至 31.5%. 由此得出, 此系统内 DPAOs 仅能利用较低浓度 (< 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 NO_2^- -N 作为电子受体, 当 NO_2^- -N 浓度 > 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 会对其产生较大的毒害作用. 与刘建广等^[24]认为的 NO_2^- -N 浓度超过 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不能被 DPAOs 较好地吸收利用一致. 反应器运行至第 109 d, 回流中 NO_3^- -N 浓度为 11.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度为 7.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 逐渐代替 NO_2^- -N 成为回流的主体成分, PO_4^{3-} -P 的去除率始终保持上升趋势. 随着厌氧氨氧化的成功启动, 其出水中 NO_2^- -N 接近 0, 硝态氮保持在 22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 回流水质稳定, 稳定的回流有利于 DPAOs 更好地驯化, PO_4^{3-} -P 去除率稳步上升. 反应器运行至第 145 d, PO_4^{3-} -P 的去除率最高达到 76.5%, 连续运行 27 d 内, PO_4^{3-} -P 去除率均保持在 75% 以上, 标志着反硝化除磷成功实现启动.

2.4 耦合系统对 COD 的沿程去除特性

COD 的去除效果与各隔室内微生物的富集紧密联系, 影响着各系统的脱氮、除磷性能. COD 在耦合系统中的去除主要分为 2 个部分: 第一部分是由反硝化除磷系统中的 DPAOs 用于合成内碳源存储于胞内; 第二部分由部分亚硝化段和厌氧氨氧化段少量的异养菌所利用.

进水 COD 浓度维持在 185.4 ~ 213.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, COD 的总去除率为 89.1%. 如图 5 耦合系统对

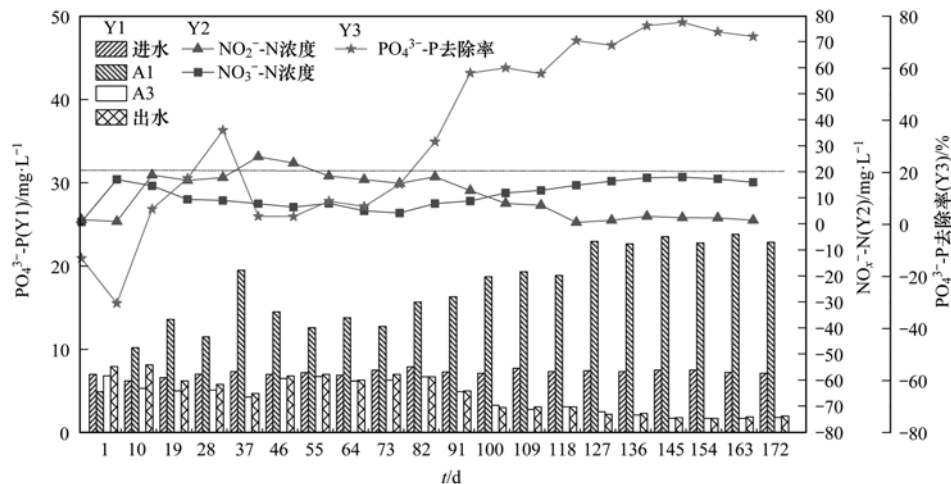


图 4 回流中不同 NO_x^- -N 浓度对系统中磷的去除变化的影响

Fig. 4 Effects of different NO_x^- -N concentrations in reflux on phosphorus removal in the system

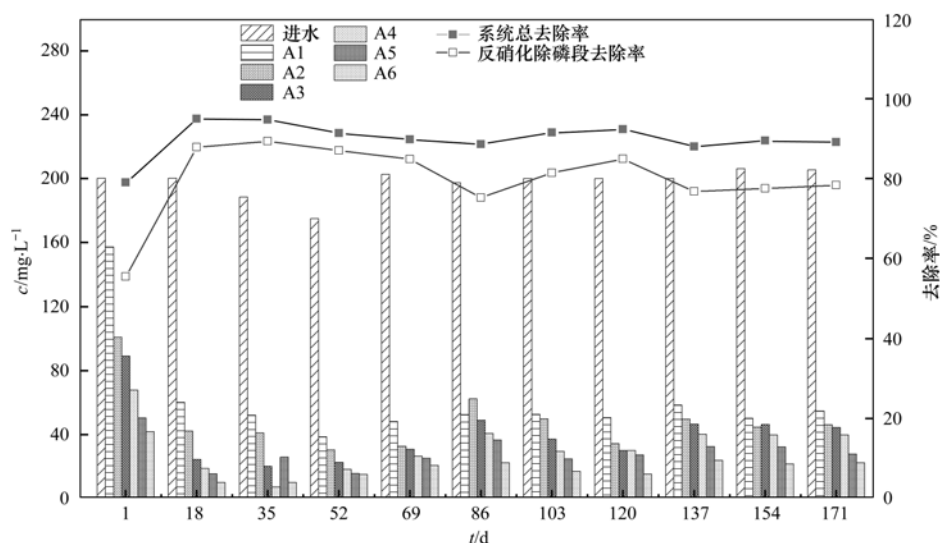


图5 耦合系统对 COD 的沿程去除规律

Fig. 5 Coupling system to remove COD along the path

COD 的沿程去除特性所示,反硝化除磷系统对 COD 的去除贡献率为 78.3%,占耦合系统总去除率的主体部分,其中进水经过反硝化除磷系统厌氧段(A1)后,COD 出水浓度维持在 $58.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,大量 COD 在 DPAOs 的厌氧释磷阶段所吸收,这不仅为后续 DPAOs 在缺氧段的过量吸磷提供了电子供体,同时也避免了较高浓度有机物对部分亚硝化与厌氧氨氧化的抑制^[25]。随后,反硝化除磷系统出水 COD 依次经过部分亚硝化系统和厌氧氨氧化系统,COD 均有少量的去除,去除率分别为 2.3% 和 8.5%,这主要是由于在 COD 的存在条件下,部分亚硝化系统与厌氧氨氧化系统会较易滋生少量反硝化细菌,利用系统内的 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进行一定的反硝化。

3 结论

(1)反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺经过 175 d 成功启动并保持稳定运行.针对人工模拟的低碳高氨氮污水,耦合工艺实现了 COD、氮和磷的同步去除,去除率分别达到 89%、92% 和 77%。

(2)部分亚硝化的稳定运行对厌氧氨氧化的快速启动影响较大.控制 $\text{DO } 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,曝:停比 = 30 min:30 min 的方式实现了部分亚硝化的成功启动.在此基础上,将 HRT 缩短至 3h 实现部分亚硝化的稳定运行。

(3)当系统回流中电子受体 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度 $> 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反硝化聚磷菌会受到严重抑制, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率迅速降低至 7.1%,反硝化除磷系统接近崩溃.随后当回流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占据主体时,反硝化除磷效果达到最佳, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率稳定在 75% 左右。

参考文献:

- [1] 阎刚,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] 张少辉,郑平.厌氧氨氧化反应器启动方法的研究[J].中国环境科学,2004,24(4):496-500.
Zhang S H, Zheng P. Studies on start-up technique of anammox bioreactor[J]. China Environmental Science, 2004, 24(4): 496-500.
- [3] 李田,印雯,王昕竹,等.ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性[J].环境科学,2019,40(2):823-828.
Li T, Yin W, Wang X Z, et al. Carbon and nitrogen removal characteristics of ABR decarbonization-CANON coupling process [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 823-828.
- [4] 陈希,王建芳,钱飞跃,等.连续流与序批式组合运行启动高性能 CANON 反应器[J].化工学报,2018,69(4):1695-1702.
Chen X, Wang J F, Qian F Y, et al. Start-up of high-performance CANON reactor by alternating continuous flow and sequencing batch operation modes[J]. CIESC Journal, 2018, 69(4): 1695-1702.
- [5] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, et al. Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure[J]. Water Research, 2007, 41(19): 4383-4396.
- [6] Wang Y Y, Geng J J, Ren Z J, et al. Effect of COD/N and COD/P ratios on the PHA transformation and dynamics of microbial community structure in a denitrifying phosphorus removal process [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2013, 88(7): 1228-1236.
- [7] 王梅香,赵伟华,王淑莹,等. A_2N_2 系统反硝化除磷性能的优化及稳定运行[J].中国环境科学,2016,36(11):3311-3320.
Wang M X, Zhao W H, Wang S Y, et al. Denitrifying phosphorus removal performance optimization and stable operation of A_2N_2 system [J]. China Environmental Science, 2016, 36(11): 3311-3320.
- [8] 卢峰,杨殿海.反硝化除磷工艺的研究开发进展[J].中国

- 给水排水, 2003, **19**(9): 32-34.
- Lu F, Yang D H. Advance in the development of denitrifying phosphorus removal process [J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(9): 32-34.
- [9] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water Research, 1997, **31**(3): 471-478.
- [10] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. Water Research, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [11] 韦嘉敏, 蒋志云, 程诚, 等. ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 [J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 808-815.
- Wei J M, Jiang Z Y, Cheng C, *et al.* Start-up and stable operation of ABR-MBR denitrifying phosphorus removal process [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 808-815.
- [12] 陈亚, 印雯, 吴鹏, 等. 厌氧氨氧化与反硝化除磷耦合机制 [J]. 工业水处理, 2019, **39**(2): 1-5.
- Chen Y, Yin W, Wu P, *et al.* Coupling mechanism of anaerobic ammonia oxidation and denitrifying phosphorus removal [J]. Industrial Water Treatment, 2019, **39**(2): 1-5.
- [13] 马富国, 张树军, 曹相生, 等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化耦合工艺处理污泥脱水液 [J]. 中国环境科学, 2009, **29**(2): 219-224.
- Ma F G, Zhang S J, Cao X S, *et al.* Coupling process of partial nitrification and anammox for treatment of sludge liquor [J]. China Environmental Science, 2009, **29**(2): 219-224.
- [14] 周正, 林兴, 王凡, 等. 酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 [J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3377-3384.
- Zhou Z, Lin X, Wang F, *et al.* Removal of nitrogen from alcohol wastewater by pn-anammox [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3377-3384.
- [15] 崔剑虹, 李祥, 黄勇. 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺联合形式、应用及脱氮效能评析 [J]. 化工进展, 2015, **34**(8): 3142-3146.
- Cui J H, Li X, Huang Y, *et al.* Evaluation of combination, application and nitrogen removal efficiency of partial nitrification-anammox process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, **34**(8): 3142-3146.
- [16] Liu J, Zuo J E, Yang Y, *et al.* An autotrophic nitrogen removal process: short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate [J]. Journal of Environmental Science, 2010, **22**(5): 777-783.
- [17] 印雯, 陈亚, 张钰, 等. 全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 [J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5032-5039.
- Yin W, Chen Y, Zhang Y, *et al.* Start-up and stable operation of CANON coupled with denitrifying phosphorus removal [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5032-5039.
- [18] 乔森, 张美娇, 邵东海, 等. 新型单级自养脱氮与反硝化除磷耦合工艺 [J]. 安全与环境学报, 2018, **18**(1): 257-263.
- Qiao S, Zhang M J, Shao D H, *et al.* Renovated coupling single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification process with phosphorus removal process [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, **18**(1): 257-263.
- [19] 魏小明. 高氨氮废水的部分亚硝化工艺研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- Wei X M. Partial nitrification process for ammonium-rich wastewater treatment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [20] 李祥, 陈宗炬, 黄勇, 等. 控制 ORP 实现连续流反应器部分亚硝化稳定运行 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3086-3092.
- Li X, Chen Z H, Huang Y, *et al.* Stable operation of partial nitrification by controlling ORP in continuous flow reactor [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3086-3092.
- [21] 现有奎, 彭永臻. 运行方式对 SBBR 亚硝酸型同步脱氮及 N₂O 释放的影响 [J]. 化工学报, 2019, **70**(6): 2289-2297.
- Gong Y K, Peng Y Z. Effect of operation mode on characteristics and N₂O emissions during simultaneous nitrification and denitrification via nitrite in SBBR [J]. CIESC Journal, 2019, **70**(6): 2289-2297.
- [22] 张婷, 吴鹏, 沈耀良, 等. CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 [J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- Zhang T, Wu P, Shen Y L, *et al.* Fast start-up of shortcut nitrification in a CSTR and an MBR [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- [23] 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.
- [24] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- Liu J G, Fu K M, Yang Y F, *et al.* Effect of electron acceptors on anoxic phosphorus uptake of DPB [J]. Environmental Science, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- [25] 苗蕾, 王凯, 王淑莹, 等. 垃圾渗滤液中有有机物对其厌氧氨氧化的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, **44**(5): 999-1004.
- Miao L, Wang K, Wang S Y, *et al.* Effect of organics on anammox process for treatment of landfill leachate [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, **44**(5): 999-1004.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)