ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双效期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 2 期
2017 年 2 月 15 日

目 次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 …… 姚利,刘进,潘月鹏,田世丽,王振波,韦霞,张国忠,周保华,王跃思(423)
海西城市群 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 …… 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
嵊泗地区大气 $PM_{2.5}$ 中汞形态污染及其与碳组分的关系 …… 程娜,钱冠磊,段炼,赵梦飞,修光利(438)
泰山夏季 $PM_{2.5}$ 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 …… 孟静静,侯战方,刘晓迪,邢继钊(445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 …… 张玉欣,安俊琳,王健宇,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 …… 尤翔宇,罗达通,刘湛,苏艳蓉(461)
南京城市交通甲烷排放特征 …… 张雪,胡凝,刘寿东,王淑敏,高韵秋,赵佳玉,张圳,胡勇博,李旭辉, 张国君(469)
2003 ~ 2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析…… 张宸赫,赵天良,王富,徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好(476)
基于增强回归树的城市 $PM_{2.5}$ 日均值变化分析: 以常州为例 …… 葛跃,王明新,孙向武,齐今笛(485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 …… 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,徐凤,杨熹,何秀清(495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 …… 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠(502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 …… 高敏,仇天雷,秦玉成,王旭明(510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 …… 吴亚林,李帅东,江俊武,沈胤胤,黄昌春,黄涛,杨浩,余艳红,罗玉(517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 …… 李丽,蒲俊兵,李建鸿,张陶(527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 …… 张佳磊,郑丙辉,刘德富,王丽婧,谭纤茹(535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 …… 邱晓鹏,黄廷林,曾明正,史建超,曹占辉(547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 …… 林俊杰,刘丹,张帅,于志国,何立平,余顺慧(555)
湖泊水体中铁(Ⅲ)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 …… 蒋永参,彭云霄,刘广龙,周易勇,朱端卫(563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 …… 王卫东,郝瑞霞,张晓娴,万京京,钟丽燕(572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 …… 吴鹏,陆爽君,徐乐中,梁奇奇,沈耀良(580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 …… 姚程, 胡小贞,卢少勇,耿荣妹(589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 …… 何沅洁,刘江,江韬,黄京晶,成晴,陈宏(600)
TiO_2/膨润土复合材料对 Hg^{2+} 的吸附性能研究 …… 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇(608)
氨氮及 H_2O_2 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 …… 王永京,杜旭,金萌,冯思捷,杨凯,张明露,于建伟(616)
配水管网细菌活性影响因素 …… 王晓丹,赵新华(622)
施氏矿物的化学合成及其对含Cr(Ⅵ)地下水吸附修复…… 朱立超,刘元元,李伟民,牟海燕,王婉玉,石德智,王涛(629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 …… 侯瑞,金鑫,金鹏康,王晓昌(640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N_2O 的产生特性 …… 郭昌梓,张凤燕,刘富宇,朱超,裴立影(647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 …… 管勇杰,于德爽,李津,齐泮晴,魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 …… 王硕,徐巧,张光生,李激(665)
颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 …… 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 …… 戴晓虎,何进,严寒,李宁,丁月玲,董滨,戴翎翎(679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 …… 顾琼,金文标,陈远清,郭仕达,万超凡(688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 …… 魏欣,薛顺利,杨帆,李响,刘振鸿,薛罡,高品(697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价 …… 王静,刘明丽,张士超,鲁垠涛,姚宏(703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 …… 陈轶楠,马建华,段海静,魏林恒(711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 …… 杨雷峰,尹华,彭辉,李跃鹏(721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 …… 叶茜琼,吴蔓莉,陈凯丽,李炜,袁婧(728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 …… 罗路云,金德才,左晖,张卓,谭新球,张德咏,卢向阳,刘勇(735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 …… 邸琰茗,王广煊,黄兴如,郭逍宇(743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 …… 贺龙,李艳琴,李彬春,李君剑(752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 …… 刘琼,魏晓梦,吴小红,袁红朝,王久荣,李裕元,葛体达,吴金水(760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 …… 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,张霞,王旭东,张阿凤(769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 …… 聂文翰,戚志萍,冯海玮,孙玉静,支月娥,张进忠,张丹(783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 …… 成功,陈静,刘晶晶,张阿凤,王旭东,冯浩,赵英(792)
1 株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 …… 叶杰旭,林彤晖,骆煜昊,陈东之,陈建孟(802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 …… 谭文勃,马晓丹,黄聪,陈川,王爱杰(809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 …… 孙娜, 商和平,茹淑华,苏德纯(815)
施氮对小麦硒(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 …… 陈玉鹏,彭琴,梁东丽,宋卫卫,雷凌明,喻大松(825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 …… 李金丽,王振红,严雅萌,黄兵,罗专溪(832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 …… 马锋锋,赵保卫(837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究

孙延芳[1],韩晓宇[2,3,4],张树军[3,4],李星[1],曹相生[1*]

(1. 北京工业大学建筑工程学院,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,哈尔滨 150090; 3. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心,北京 100022; 4. 北京市污水资源化工程技术研究中心,北京 100124)

摘要: 为缩短工程应用中 CANON 工艺的启动时间及指导实际工程排泥控制,利用两个相同规格的 SBR 反应器接种不同比例厌氧氨氧化(anaerbic ammonium oxidation, ANAMMOX)颗粒污泥,研究了 CANNON 工艺启动规律与不同絮体 SRT 对工艺运行的影响. 试验过程中,温度控制在 30℃ ±1℃, pH 7 ~ 8. 结果表明,接种 5% 和 10% ANAMMOX 颗粒污泥的两反应器在初始 FA 浓度大于 44 mg·L^{-1}条件下,不利于工艺的快速启动. 接种 15% 和 20% ANAMMOX 颗粒污泥的两反应器,分别在运行的第 46 d 和 35 d 成功启动了 CANON 工艺. 当絮体 SRT 分别为 30 d、90 d 和不主动排泥时,系统总氮去除负荷均能维持在 0.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 定量 PCR 数据显示,随污泥龄的延长,AOB 丰度相对稳定,ANAMMOX 菌丰度略有增加,但是 NOB 丰度显著增加. 因此,选择性地排出絮体有利于 NOB 的淘洗和系统的长期运行稳定性.

关键词:全程自养脱氮; 启动; 颗粒污泥; 污泥龄; 定量 PCR

中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)02-0672-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201608108

Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance

SUN Yan-fang[1], HAN Xiao-yu[2,3,4], ZHANG Shun-jun[3,4], LI Xing[1], CAO Xiang-sheng[1*]

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Technology, Beijing 100022, China; 4. Beijing Engineering Research Center for Wastewater Reuse, Beijing 100124, China)

Abstract: To shorten the start-up time of CANON process and guide the sludge dischargement in the practical project, the start-up of CANNON process and influence of different flocs SRT were studied by inoculation ANAMMOX granules of different proportions in two same specifications of SBR reactor. During the experiment, the temperature was controlled at 30℃ ±1℃ and pH was 7-8. The results showed that it was not good for CANON process rapid start-up when the two reactors were inoculated with 5% and 10% ANAMMOX granules respectively and the initial FA concentration exceeded 44 mg·L^{-1}. When the two reactors were inoculated with 5% and 10% ANAMMOX granular sludge, the reactors were started-up successfully on Day 46 and Day 35, respectively. When the flocs SRT was maintained at 30 d, 90 d and un-initiative discharge respectively, the average total nitrogen removal rate could reach 0.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$ stably. The quantitative PCR results of the three different flocs SRT showed that with increasing flocs SRT, the abundance of AOB was relatively stable, the abundance of ANAMMOX increased slightly, while the abundance of NOB significant increased. Therefore, it is necessary to elutriate flocs from reactor for decreasing the quantity of NOB and long-term stable operation of the CANON process.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite; start-up; granular sludge; sludge retention time; quantitative PCR

全程自养脱氮(completely antotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON)工艺是以厌氧氨氧化反应为基础发展起来的,该工艺是指在单一反应器内实现短程硝化和厌氧氨氧化,从而达到脱氮的目的[1]. 相比于传统硝化反硝化,CANON 工艺节约了 60% 以上的曝气量,无需外加碳源,减少 75% 的污泥产量[2],有机物回收量高[3],被认为是最经济高效的脱氮工艺[4] CANON 工艺的主要功能微生物为氨氧化菌(ammonium oxidation bacteria, AOB)和厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)菌,两种功能菌均属自养菌,其中 ANAMMOX 菌生长较慢,世代周期长达 11 d[5],对外界环境因子的变化较为敏感,这些因素均限制了 CANON 工艺在实际工程中的应用.

CANON 工艺的实际运行中,经常发生由于运行条件 pH[6]、温度[7]、溶解氧(dissolved oxygen, DO)[8]等的变化造成短程硝化转变为全程硝化的现

收稿日期: 2016-08-16; **修订日期**: 2016-09-02

作者简介: 孙延芳(1990 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术,E-mail:f507051500@126.com

* 通信作者,E-mail:caxish@163.com

象. 目前针对亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria,NOB)的控制策略主要有游离亚硝酸(free nitrous acid, FAN)[9] 和游离氨(free ammonia, FA)[10]等条件进行的抑制,短期内会达到满意效果,由于 NOB 的生物量并未减少且污泥具有适应性,长期运行之后抑制作用会消失. 为维持 CANON 工艺的稳定运行,不得不面临通过排絮体将 NOB 从系统内淘汰的现象. 絮体 + 颗粒系统的 CANON 工艺形式是指 AOB 和 NOB 主要生长在絮体污泥中(<200 μm),ANAMMOX 菌主要生长在颗粒污泥中(>200 μm)[11],可实现淘洗 NOB 的同时有效截留 ANAMMOX 菌的目的.

目前国内外研究者通过多种手段均实现了 CANON 工艺的启动,启动时间均在 2 个月以上[12, 13],但工程最低接种量与启动时间的对应关系并不明确,而 CANON 工艺过程中絮体淘洗量对系统稳定性的影响还没有清晰认识. 因此,本文重点研究了接种不同比例 ANAMMOX 颗粒污泥对 CANON 工艺快速启动的规律和絮体污泥龄(sludge retention time,SRT)对工艺运行稳定性的影响,并运用定量 PCR 技术对比分析不同絮体 SRT 期间微生物群落,以期为实现 CANON 工艺的工程应用提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　试验装置

试验装置为两个相同规格的 SBR 反应器,如图 1 所示,分别标记为 1 号反应器和 2 号反应器. SBR 反应器由有机玻璃制成,内径 300 mm,高1 400 mm,总容积为 100 L,有效容积为 90 L. 曝气器采用穿孔管,激光开孔孔径为 0.1 mm,孔间隔为 10 mm,曝气量通过转子流量计控制,DO 控制在 0 ~ 0.4 $mg \cdot L^{-1}$. 试验采用间歇运行的方式,每个周期包括:瞬间进水、曝气、沉淀、排水. 每个周期运行结束后直接进入下一周期. 试验温度通过恒温加热棒控制在 30℃ ±1℃.

1.2　试验用水

试验用水采用人工配水的方式. 即通过向北京市高碑店污水处理厂初沉池出水中投加 NH_4HCO_3 和 $NaHCO_3$ 模拟高氨氮废水,进水水质如表 1 所示.

表 1　反应器进水水质/$mg \cdot L^{-1}$

Table 1　Water quality of influent for reactor/$mg \cdot L^{-1}$

NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	COD	TP
500 ~ 2 000	0 ~ 10	0 ~ 20	150 ~ 300	5 ~ 8

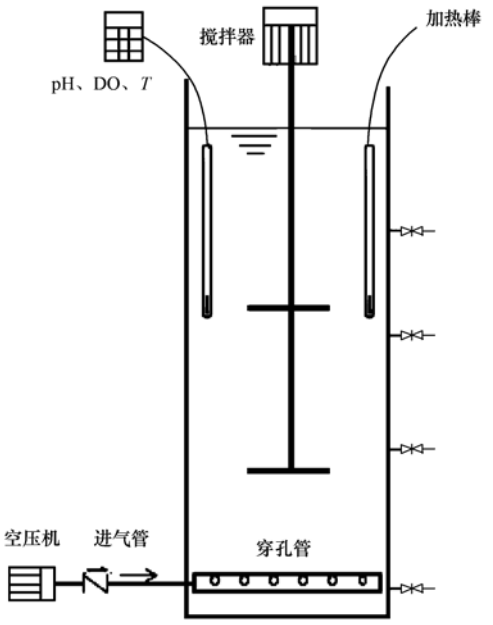

图 1　SBR 反应器试验装置示意

Fig. 1　Experimental apparatus of SBR reactor

1.3　污泥接种与运行参数

反应器同时接种北京市高碑店污水厂的回流污泥和 ANAMMOX 颗粒污泥,共计 60 L. 反应器内具有絮体污泥和颗粒污泥两种污泥形式,ANAMMOX 颗粒污泥取自高碑店污水处理厂内某高氨氮废水一体式厌氧氨氧化 SBR 中试反应器[14],接种时该反应器已运行两年,总氮去除负荷稳定维持在 0.32 $kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$. 本试验成功启动的标准定义为 SBR 反应器总氮去除负荷达到接种的 ANAMMOX 颗粒污泥系统内的水平. 试验过程中各阶段反应器的污泥组成与运行参数如表 2 所示. 各阶段反应器中的温度控制在 30℃ ±1℃,pH 为 7 ~ 8.

表 2　试验各阶段反应器内 ANAMMOX 颗粒污泥比例与运行参数

Table 2　Proportion of ANAMMOX granular sludge and operational of the reactor in each phase

运行阶段	反应器序号	ANAMMOX 颗粒污泥比例/%	初始 FA /$mg \cdot L^{-1}$	DO /$mg \cdot L^{-1}$
Ⅰ	1	5	44	0 ~ 0.10
	2	10	46	0 ~ 0.10
Ⅱ	1	15	11	0.10 ~ 0.30
	2	20	11	0.10 ~ 0.35

1.4　分析方法

水质指标检测方法按照文献[15]规定的方法测量,总氮采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度法,氨氮采用纳氏试剂光度法,硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和总磷采用离子色谱法,化学需氧量采用重铬酸钾法;

污泥浓度采用称重法；粒径分析采用湿式筛分法；DO、pH 和 T 采用 WTW 测定；定量 PCR 扩增程序见文献[16, 17].

2 结果与讨论

2.1 反应器的启动

2.1.1 FA 浓度对启动的影响

阶段 I 运行期间两反应器进水氨氮、出水氨氮、出水硝酸盐氮、出水亚硝酸盐氮和总氮去除负荷的变化如图 2 所示. 阶段 I,1 号反应器内回流污泥和 ANAMMOX 颗粒污泥分别为 95% 和 5%,进水氨氮初始浓度为 703 $mg\cdot L^{-1}$,初始 FA 浓度为 44 $mg\cdot L^{-1}$；2 号反应器内回流污泥和 ANAMMOX 颗粒污泥分别为 90% 和 10%,进水氨氮初始浓度为 745 $mg\cdot L^{-1}$,初始 FA 浓度为 46 $mg\cdot L^{-1}$. 启动初期调整曝气量至系统内 DO 低于 0.1 $mg\cdot L^{-1}$,以减弱 NOB 对亚硝酸盐氮的竞争,为 ANAMMOX 菌争取更多基质并提供低氧环境.

系统在阶段 I 运行的第 14 d,出水氨氮分别为 494 $mg\cdot L^{-1}$ 和 361 $mg\cdot L^{-1}$,亚硝酸盐氮分别为 25 $mg\cdot L^{-1}$ 和 22 $mg\cdot L^{-1}$,硝酸盐氮均为 0 $mg\cdot L^{-1}$,总氮去除负荷分别为 0.02 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$ 和 0.03 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$. 说明初始 FA 浓度大于 44 $mg\cdot L^{-1}$,有利于实现回流污泥短程硝化的稳定运行. 系统中 AOB 和 ANAMMOX 菌也受到不同程度的抑制,因此在阶段Ⅰ运行 14 d 后,调整两个反应器内的初始氨氮浓度至 274 $mg\cdot L^{-1}$ 和 231 $mg\cdot L^{-1}$,其他运行条件不变,对应的 FA 浓度分别是 17 $mg\cdot L^{-1}$ 和 14 $mg\cdot L^{-1}$. 系统在阶段 I 运行 20d 后,仍观察到出水亚硝盐氮较高,分别为 56 $mg\cdot L^{-1}$ 和 44 $mg\cdot L^{-1}$,硝酸盐氮为 0 $mg\cdot L^{-1}$ 的现象,说明 FA 浓度降低至 14 $mg\cdot L^{-1}$ 仍能实现短程硝化的稳定, ANAMMOX 菌的活性却不能得到有效提高,分析原因可能是较低比例的 ANAMMOX 颗粒污泥接种量造成了启动的失败. 因此,两反应器内各加入 6 L 的 ANAMMOX 颗粒污泥,将 ANAMMOX 颗粒污泥的比例分别提高至 15% 和 20%,进入阶段Ⅱ的启动过程.

有研究表明,对 AOB、NOB 和 ANAMMOX 菌产生抑制的不是氨氮,而是 FA[18, 19]. FA 浓度超过 6 $mg\cdot L^{-1}$ 时,NOB 的活性受到完全的抑制[20]；10 ~ 150 $mg\cdot L^{-1}$ 时,AOB 的活性会受到抑制[21]；13 ~ 90 $mg\cdot L^{-1}$ 时,ANAMMOX 的活性会受到抑制[22]. 阶段Ⅰ的试验结果说明：①在温度维持在 31℃ ±1℃, pH 为 7 ~ 8, DO 低于 0.1 $mg\cdot L^{-1}$,初始 FA 浓度超过 14 $mg\cdot L^{-1}$ 的条件下,有利于实现回流污泥短程硝化的稳定运行；②小于等于 10% ANAMMOX 颗粒污泥的接种量不利于 CANON 工艺的快速启动.

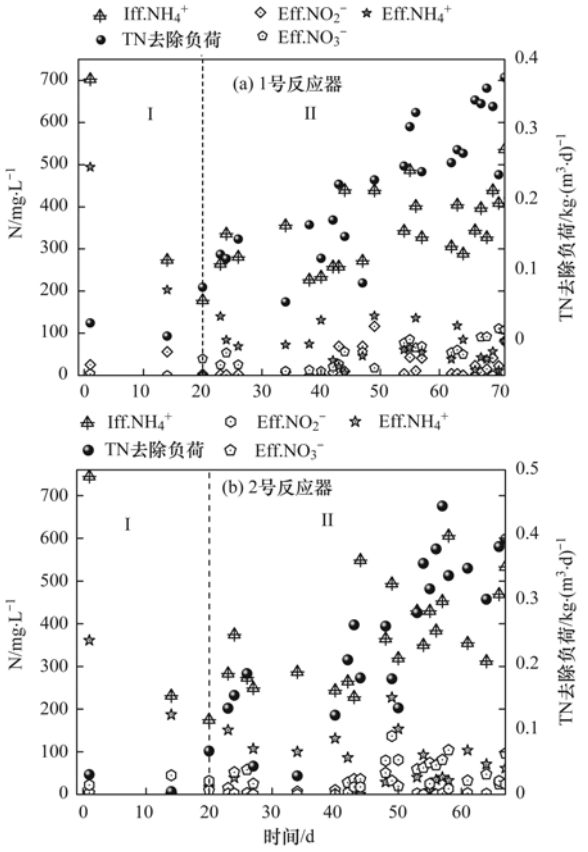

图 2 启动过程中氮素变化

Fig. 2 Variations of nitrogen concentrations during start-up

2.1.2 反应器的成功启动

阶段Ⅱ运行期间,通过实时监测氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的变化状态,在无硝酸盐氮和亚硝酸盐氮累积的前提下,缓慢提高曝气量和进水氨氮的浓度,进水氨氮、出水氨氮、出水亚硝酸盐氮、出水硝酸盐氮和总氮去除负荷的变化如图 2 所示. 阶段Ⅱ,1 号反应器内回流污泥和 ANAMMOX 颗粒污泥分别为 85% 和 15%,进水氨氮初始浓度为 178 $mg\cdot L^{-1}$,初始 FA 浓度为 11 $mg\cdot L^{-1}$；2 号反应器内回流污泥和 ANAMMOX 颗粒污泥分别为 80% 和 20%,进水氨氮初始浓度为 175 $mg\cdot L^{-1}$,初始 FA 浓度为 11 $mg\cdot L^{-1}$. 两反应器在启动初期 FA 浓度均小于文献报道抑制区间的最低值 13 $mg\cdot L^{-1}$,排除启动初期 FA 对 ANAMMOX 菌的影响.

1 号反应器在阶段Ⅱ加泥后的第一个周期,曝气量由 21 $L\cdot h^{-1}$ 调高至 36 $L\cdot h^{-1}$,系统内 DO 浓度由 0.08 $mg\cdot L^{-1}$ 升高至 0.16 $mg\cdot L^{-1}$,造成出水氨氮为 1.49 $mg\cdot L^{-1}$,亚硝酸盐氮为 3 $mg\cdot L^{-1}$,硝酸盐氮

的生成比例为 0.17 的现象，说明阶段Ⅰ运行期间，系统内 NOB 的活性只是暂时受到抑制，并未完全失活，系统内 DO 浓度突然升高，NOB 的活性可立即恢复，系统内短程硝化遭到破坏，变为全程硝化．1 号反应器在阶段Ⅱ运行 46 d 后，初始氨氮浓度由 178 $mg\cdot L^{-1}$增加至 344 $mg\cdot L^{-1}$，曝气量由 30 $L\cdot h^{-1}$升高至 160 $L\cdot h^{-1}$，总氮去除负荷达到 0.32 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$并能稳定维持，认定 1 号反应器 CANON 工艺启动成功；2 号反应器在阶段Ⅱ运行 35 d 后，初始氨氮浓度由 175 $mg\cdot L^{-1}$增加至 350 $mg\cdot L^{-1}$，曝气量由 20 $L\cdot h^{-1}$升高至 180 $L\cdot h^{-1}$，总氮去除负荷能稳定维持在 0.32 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$，认定 2 号反应器 CANON 工艺启动成功．

在诸多厌氧氨氧化工艺应用研究的报道中，启动时间多为 0.5 ~ 3.5 a[23, 24]，较长的启动时间限制了 CANON 工艺的推广应用．本试验利用两个相同规模的 SBR 反应器分别接种 15% 和 20% 的 ANAMMOX 颗粒污泥，在 46 d 和 35 d 成功启动了 CANON 工艺．以上分析结果说明，通过接种一定比例的 ANAMMOX 颗粒污泥可缩短 CANON 工艺的启动时间．

2.2　CANON 工艺的稳定运行及效果

CANON 工艺启动成功后进入稳定运行阶段，1 号反应器进水氨氮控制在 400 ~ 500 $mg\cdot L^{-1}$，气量 180 $L\cdot h^{-1}$；2 号反应器进水氨氮控制在 500 ~ 600 $mg\cdot L^{-1}$，气量 250 $L\cdot h^{-1}$，TN 去除负荷、去除率和 DO 关系如图 3 所示．

1 号反应器在稳定运行阶段，出水亚硝酸盐氮和硝酸盐氮平均值分别是 35 $mg\cdot L^{-1}$和 75 $mg\cdot L^{-1}$，硝酸盐氮产生比例为 0.03，TN 和氨氮平均去除率分别为 81% 和 96%，TN 平均去除负荷为 0.32 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$，颗粒浓度由 491 $mg\cdot L^{-1}$增长至 665 $mg\cdot L^{-1}$，增长率为 5.1 $mg\cdot(L\cdot d)^{-1}$．2 号反应器在稳定运行阶段，出水亚硝酸盐氮和硝酸盐氮平均值分别是 19 $mg\cdot L^{-1}$和 84 $mg\cdot L^{-1}$，硝酸盐氮产生比例为 0.07，TN 和氨氮平均去除率分别为 85% 和 95%，TN 平均去除负荷为 0.35 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$，颗粒浓度由 470 $mg\cdot L^{-1}$增长至 686 $mg\cdot L^{-1}$，增长率为 7.0 $mg\cdot(L\cdot d)^{-1}$．由上述分析结果可知，两反应器均对氨氮表现出良好的去除效果，本系统具有良好的稳定性．

2.3　絮体 SRT 对 CANON 工艺运行的效果

为维持 CANON 工艺的稳定运行，有时不得不面临通过排絮体将 NOB 从系统内淘汰的现象．本文

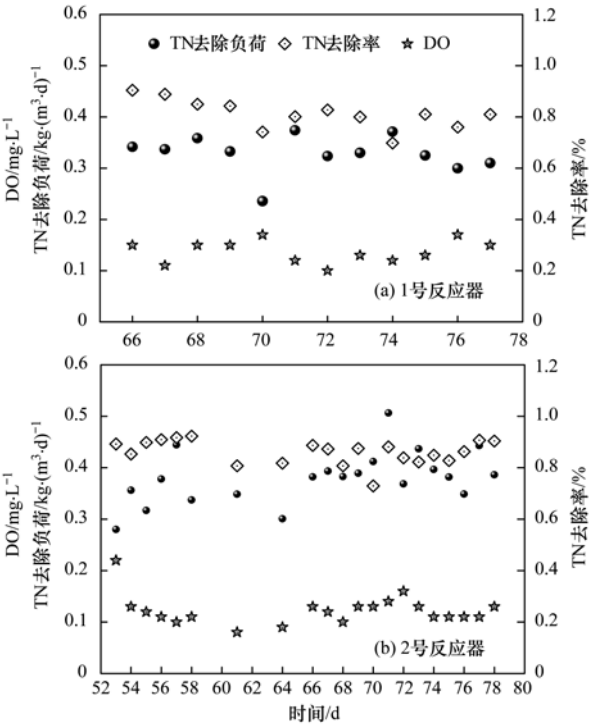

图 3　反应器 TN 负荷、去除率及 DO

Fig. 3　Variations of TN removal rate, removal efficiency and DO concentrations

以 2 号反应器为研究对象，进行了絮体 SRT 对 CANON 工艺稳定性的试验．阶段 1，絮体 SRT 为 30 d；阶段 2，絮体 SRT 为 90 d；阶段 3，不主动排絮体，具体试验结果如图 4 ~ 6 所示．各阶段运行期间维持系统内温度 31℃ ±1℃，pH 7 ~ 8，平均气量维持在 250 $L\cdot h^{-1}$，初始氨氮浓度 300 ~ 500 $mg\cdot L^{-1}$．

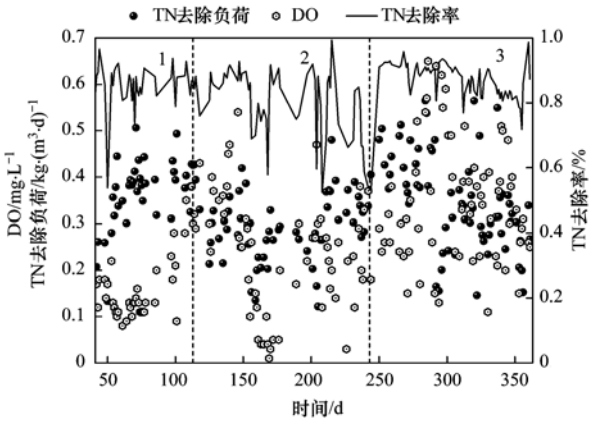

图 4　反应器 TN 负荷、去除率及 DO

Fig. 4　Variations of TN removal rate, removal efficiency and DO concentrations

阶段 1，絮体 SRT 为 30 d，共运行 70 d．运行期间具体操作方法为：每天取 3 L 混合污泥，用 0.2 mm 的筛网进行水力筛分，淘洗絮体后将颗粒再截留至反应器．如图 5 所示，混合污泥浓度先呈下降趋

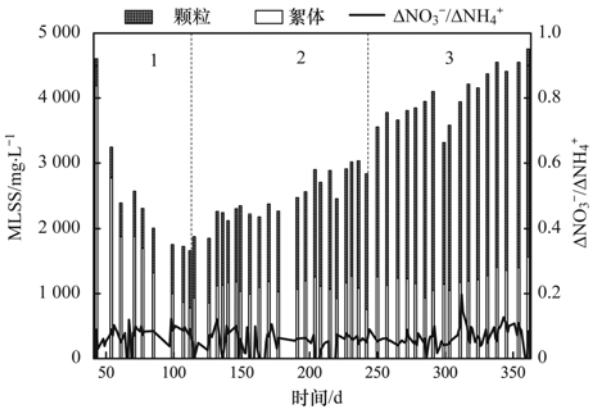

图 5 污泥浓度变化及硝酸盐产生比例

Fig. 5 Variations of mixed liquor suspended sludge concentration and the ratio of nitrate

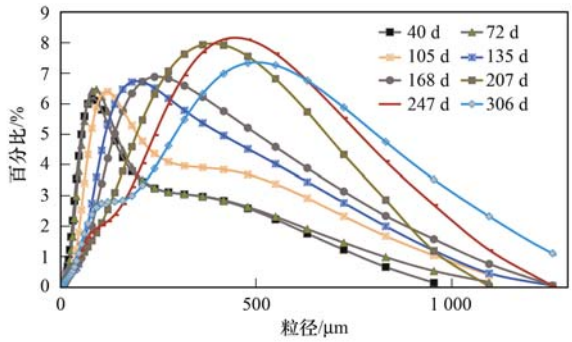

图 6 粒径分布

Fig. 6 Variations of particle size

势,后趋于稳定,颗粒浓度呈上升趋势,由之前的 508 mg·L^{-1} 增长至 941 mg·L^{-1},颗粒所占比例由 9% 增加至 40%,颗粒增长率为 6.1 mg·(L·d)$^{-1}$. 系统内的平均粒径由 156 μm 增长至 218 μm. 因大量 NOB 被淘洗,硝酸盐氮并未明显增加,系统内好氧菌数量相对较少,DO 浓度不断上升,总氮去除负荷也呈上升趋势,平均去除负荷为 0.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$,最高达到 0.50 kg·(m^3·d)$^{-1}$,总氮平均去除率为 86%. 说明絮体 SRT 为 30 d 时,CANON 工艺仍能稳定运行,原系统内絮体处于过剩状态.

阶段 2,絮体 SRT 为 90 d,共运行 130 d. 运行期间具体操作方法为:每天取 1 L 混合污泥,用 0.2 mm 的筛网进行水力筛分,淘洗絮体后将颗粒截留至反应器. 阶段 2 相比阶段 1,NOB 淘洗量有所降低,平均 DO 浓度由 0.15 mg·L^{-1} 提高至 0.24 mg·L^{-1},硝酸盐氮的产生比例仍在合理范围内,总氮平均去除率维持在 80%,原因在于,阶段 2,颗粒浓度呈上升趋势,由 941 mg·L^{-1} 增加至 2 077 mg·L^{-1},颗粒在系统内所占比例由 40% 增长至 73%,颗粒增长率为 8.6 mg·(L·d)$^{-1}$,系统内平均粒径由 218 μm 增长至 358 μm,ANAMMOX 菌较 NOB 对亚硝酸盐氮更具亲和力,逐渐成为系统的优势菌. 在运行阶段 2 的第 172 d 至第 177 d,系统内混合装置出现问题,传质效率受阻,出现反应速率降低,出水氨氮较高,总氮负荷下降的现象. 由上述分析结果可知,絮体 SRT 为 90 d 时,CANON 工艺仍能稳定运行.

阶段 3 采取不主动排泥的方式运行了 118 d. 系统内平均 DO 维持在 0.35 mg·L^{-1},总氮平均去除负荷 0.35 kg·(m^3·d)$^{-1}$,最高达 0.56 kg·(m^3·d)$^{-1}$,总氮平均去除率维持在 88%. 系统内的平均粒径由 359 μm 增长至 377 μm,絮体浓度平均维持在1 100 mg·L^{-1},颗粒浓度由 2 077 mg·L^{-1} 增加至 3 151 mg·L^{-1},颗粒增长率为 9.7 mg·(L·d)$^{-1}$. 说明控制合适的条件,即使不进行 NOB 的淘洗,也可以维持系统的稳定.

本试验中还通过定量 PCR 研究了各阶段反应器内 AOB、ANAMMOX 和 NOB 的丰度,如表 3 所示. 结果表明,随絮体 SRT 的延长,反应器内 AOB 的丰度维持稳定,而 ANAMMOX 菌的丰度增长了 1.5 倍,表明在各 SRT 下,主要脱氮功能菌 AOB 和 ANAMMOX 菌都可以得到良好的持留,系统可维持稳定的总氮去除负荷(图 4). 根据报道[25],CANON 反应器中 NOB 的过量增殖会改变系统的脱氮途径,使总氮去除率降低,是一体化厌氧氨氧化工艺崩溃的主要原因之一. 在本试验中,NOB 的丰度一直维持很低的水平(8.06×10^6 ~ 3.76×10^8 copies·g^{-1},以 SS 计),由此短程硝化-厌氧氨氧化途径是总氮去除的主要途径,系统稳定性良好. 但值得注意的是,当阶段 3 不淘洗絮体污泥时,系统 NOB 的丰度显著增加,与絮体 SRT 为 30d 时相比增加了 47 倍. 因此有必要在后续的长期运行中持续关注 NOB 的丰度及系统稳定性. 综上所述,通过控制合理的絮体污泥龄可以实现功能菌(AOB 和 ANAMMOX 菌)的有效持留和 NOB 的淘洗,有利于系统的稳定运行.

表 3 试验各阶段反应器内菌群丰度(平均值)/copies·g^{-1}

Table 3 Abundance of microbial community in each phase (average)/copies·g^{-1}

阶段	全菌	ANAMMOX	AOB	NOB
1	4.63E+11	1.81E+11	2.67E+10	8.06E+06
2	5.30E+11	2.12E+11	2.66E+10	6.27E+07
3	6.56E+11	2.68E+11	2.69E+10	3.76E+08

3　结论

(1)接种 5% ANAMMOX 颗粒污泥和 95% 回流污泥，10% ANAMMOX 颗粒污泥和 90% 回流污泥，两反应器在初始 FA 浓度大于 44 mg·L^{-1}的条件下，不利于 CANON 工艺的启动.

(2)通过接种 15% ANAMMOX 颗粒污泥和 85% 回流污泥，20% ANAMMOX 颗粒污泥和 80% 回流污泥，两反应器在采取不断提高曝气量和进水氨氮浓度的策略下，分别在 46d 和 35d 实现 CANON 工艺的启动，并能稳定运行.

(3)温度维持在 31℃ ±1℃，pH 7 ~8，DO 低于 0.1 mg·L^{-1}，初始 FA 浓度超过 14 mg·L^{-1}的条件下，有利于实现回流污泥短程硝化的稳定.

(4)通过定量 PCR 技术分析得出絮体 SRT 时间越长，ANAMMOX 菌的丰度越高；通过控制合理的絮体污泥龄可实现功能菌(AOB 和 ANAMMOX 菌)的有效持留和 NOB 的淘洗，有利于系统的稳定运行.

参考文献：

[1] Third K A, Sliekers A O, Kuenen J G, *et al*. The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2001, **24**(4): 588-596.

[2] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. Nature Reviews. Microbiology, 2008, **6**(4): 320-326.

[3] 彭永臻，邵和东，杨延栋，等. 基于厌氧氨氧化的城市污水处理厂能耗分析[J]. 北京工业大学学报，2015，**41**(4)：621-627.
Peng Y Z, Shao H D, Yang Y D, *et al*. Energy consumption of the municipal wastewater treatment plant with Anammox process [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, **41**(4): 621-627.

[4] 胡石，甘一萍，张树军，等. 一体化全程自养脱氮(CANON)工艺的效能及污泥特性[J]. 中国环境科学，2014，**34**(1)：111-117.
Hu S, Gan Y P, Zhang S J, *et al*. Performance and sludge characteristics of the CANON process[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(1): 111-117.

[5] 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.

[6] 郭劲松，杨国红，方芳，等. 温度和 pH 值对 CANON 工艺的影响试验研究[J]. 环境工程学报，2009，**3**(1)：22-26.
Gou J S, Yang G H, Fang F, *et al*. Study of the influence of temperature and pH value on CANON process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(1): 22-26.

[7] 袁砚，朱亮. 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响[J]. 环境科学，2016，**37**(11)：4289-4295.
Yuan Y, Zhu L. Effects of moderate and room temperature on nitrogen removal in PN-ANAMMOX process [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4289-4295.

[8] 王会芳，付昆明，左早荣，等. 水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响[J]. 环境科学，2015，**36**(11)：4161-4167.
Wang H F, Fun K M, Zuo Z R, *et al*. Effects of hydraulic retention time and dissolved oxygen on a CANON reactor with haydite as carrier[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4161-4167.

[9] 马斌，委燕，王淑莹，等. 基于 FNA 处理污泥实现城市污水部分短程硝化[J]. 化工学报，2015，**66**(12)：5054-5059.
Ma B, Wei Y, Wang S Y, *et al*. Achieving partial nitritation in sewage treatment system based on treating activated sludge by FNA[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(12): 5054-5059.

[10] 吕鑑，孟凡能，张树军，等. 半短程硝化-厌氧氨氧化处理污泥消化液的脱氮研究[J]. 北京工业大学学报，2011，**37**(11)：1737-1742.
Lü J, Meng F N, Zhang S J, *et al*. Study on half-nitrosofication-ANAMMOX process for treatment of reject water[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, **37**(11): 1737-1742.

[11] 张自杰，林荣忱，金儒霖. 排水工程(下册)[M]. (第四版). 北京：中国建筑工业出版社，2000.

[12] 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.

[13] 顾书军，方芳，李凯，等. 低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动[J]. 环境科学，2016，**37**(8)：3120-3127.
Gu S J, Fang F, Li K, *et al*. Rapid start-up of one-stage autotrophic nitrogen removal process in EGSB reactor for wastewater with low concentration of ammonia[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3120-3127.

[14] 韩晓宇，常江，孟春霖，等. 短程硝化/厌氧氨氧化一步法自养脱氮中试研究[J]. 中国给水排水，2014，**30**(19)：1-5.
Han X Y, Chang J, Meng C L, *et al*. Single-stage autotrophic nitrogen removal based on partial nitrification and Anammox[J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(19): 1-5.

[15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京：中国环境科学出版社，2002.

[16] 赵志瑞，马斌，张树军，等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. 环境科学，2013，**34**(4)：1448-1456.
Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al*. Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1448-1456.

[17] 黄京，徐亚慧，张亮，等. CANON 工艺快速启动和运行过程中 anammox 群落变化研究[J]. 环境工程，2014，**32**(12)：36-41.
Huang J, Xu Y H, Zhang L, *et al*. Research on change in anammox community during rapid start-up and running of CANON system by CSTR reactor [J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(12): 36-41.

[18] Van Hulle S W, Volcke E I, Teruel J L, *et al*. Influence of temperature and pH on the kinetics of the Sharon nitritation

process[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2007, **82**(5): 471-480.

[19] 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 等. 游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1075-1081.
Sun H W, Lü X T, Wei X F, *et al*. Synergetic inhibitory effect of free ammonia and aeration phase length control on the activity of nitrifying bacteria[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1075-1081.

[20] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched Nitrobacter culture[J]. Water Research, 2007, **41**(4): 826-834.

[21] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al*. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1976, **48**(5): 835-852.

[22] Waki M, Tokutomi T, Yokoyama H, *et al*. Nitrogen removal from animal waste treatment water by anammox enrichment[J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(14): 2775-2780.

[23] Van der Star W R, Abma W R, Blommers D, *et al*. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam[J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4149-4163.

[24] Wett B. Development and implementation of a robust deammonification process[J]. Water Science and Technology, 2007, **56**(7): 81-88.

[25] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al*. Full-scale partial nitritation/anammox experiences-an application survey[J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016 年 10 月 12 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 15 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 2

Feb. 15, 2017

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing ····· YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, *et al.* (423)

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China ····· CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, *et al.* (429)

Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Shengsi Region ····· CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, *et al.* (438)

Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in $PM_{2.5}$ from Mt. Taishan ····· MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, *et al.* (445)

Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing ····· ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, *et al.* (453)

Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region ····· YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, *et al.* (461)

Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing ····· ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, *et al.* (469)

Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 ····· ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, *et al.* (476)

Variation Analysis of Daily $PM_{2.5}$ Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou ····· GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, *et al.* (485)

Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing ····· ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, *et al.* (495)

Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong ····· FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, *et al.* (502)

Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations ····· GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, *et al.* (510)

Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century ····· WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, *et al.* (517)

Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge ····· LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, *et al.* (527)

Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors ····· ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, *et al.* (535)

Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer ····· QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, *et al.* (547)

Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone ····· LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, *et al.* (555)

Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(Ⅲ)-oxalate Complex in Lake Water ····· JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, *et al.* (563)

Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO ····· WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, *et al.* (572)

Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland ····· WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, *et al.* (580)

Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants ····· YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, *et al.* (589)

Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir ····· HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, *et al.* (600)

Experimental Research of Hg^{2+} Removal by TiO_2/Bentonite Composite ····· TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, *et al.* (608)

Impact of Ammonia and H_2O_2 on Bromate and Disinfection By-products Control ····· WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, *et al.* (616)

Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks ····· WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua (622)

Adsorptive Remediation of Cr(Ⅵ) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite ····· ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, *et al.* (629)

Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation ····· HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, *et al.* (640)

Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes ····· GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, *et al.* (647)

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources ····· GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (654)

Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System ····· WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, *et al.* (665)

Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance ····· SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, *et al.* (672)

Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge ····· DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, *et al.* (679)

Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using *Mucor circinelloides* ····· GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, *et al.* (688)

Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge ····· WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, *et al.* (697)

Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City ····· WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, *et al.* (703)

Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China ····· CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, *et al.* (711)

Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes ····· YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (721)

Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil ····· YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, *et al.* (728)

Effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure ····· LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, *et al.* (735)

Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment ····· DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, *et al.* (743)

Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas ····· HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, *et al.* (752)

Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils ····· LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, *et al.* (760)

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances ····· ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, *et al.* (769)

Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity ····· NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, *et al.* (783)

Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain ····· CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, *et al.* (792)

Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics ····· YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, *et al.* (802)

Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain ····· TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, *et al.* (809)

Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat ····· SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, *et al.* (815)

Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat ····· CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, *et al.* (825)

Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure ····· LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, *et al.* (832)

Sorption of *p*-Nitrophenol by Biochars of Corncob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures ····· MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

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　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　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）

2017 年 2 月 15 日　第 38 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 2　Feb. 15, 2017

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	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed**	by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 （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：140.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0250-3301