

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



2019

Vol.40 No.2  
第40卷 第2期

# 目次

|                                                               |                                                               |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响                                      | 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)                                   |
| 珠三角地区利用 PM <sub>2.5</sub> 反演气溶胶数浓度谱方法                         | 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)                     |
| 广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性                                | 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)                 |
| 扬州市 PM <sub>2.5</sub> 中重金属来源及潜在健康风险评估                         | 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)                        |
| 聊城市冬季 PM <sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析                    | 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)                            |
| 博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源                                     | 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)                          |
| 某集约化肉鸡饲养场 PM <sub>2.5</sub> 中抗生素抗性基因的分布特征                     | 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)                         |
| 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响                                    | 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)          |
| 滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献                                          | 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)             |
| 基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析                           | 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)                                   |
| 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响                                              | 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)                             |
| 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险                                          | 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)                              |
| 珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素                                       | 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)                                   |
| 北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价                                           | 陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)                          |
| 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律                                       | 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)                    |
| 磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响                                   | 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)               |
| 钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响                                      | 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658) |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 对镁改性生物炭除磷效果的影响                   | 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)                             |
| 3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较                                         | 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)                            |
| 硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制                                           | 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)                    |
| ZnTiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 | 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)                                       |
| 高指数晶面 TiO <sub>2</sub> 对铬的吸附及光催化去除                            | 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)                                       |
| Fe <sup>0</sup> /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B                  | 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)                           |
| 不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制                                           | 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)                              |
| SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能                                           | 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)                                       |
| 一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制                                            | 薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)                                       |
| 臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析                                    | 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)                |
| 多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除                                 | 刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)                                   |
| 微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程                                    | 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)                               |
| 从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水                                        | 窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)                                  |
| 夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法                                    | 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)                                  |
| 硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性                                            | 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)                    |
| 乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性                                   | 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)                   |
| DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性                            | 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)              |
| 间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷                                           | 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)                        |
| ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行                                       | 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)                              |
| 进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响                                     | 都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)      |
| ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性                                       | 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)                               |
| 不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响                                         | 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)                               |
| 调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行                              | 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)                                     |
| C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响                                    | 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)                         |
| 基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性                                         | 王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)                                         |
| 黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征                                            | 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)                                  |
| 基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化                                    | 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)                                 |
| 硝化作用对盐碱湿地 N <sub>2</sub> O 排放的影响及其环境因子分析                      | 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)                     |
| 长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N <sub>2</sub> O 和 NO 排放的影响              | 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)                             |
| 地膜覆盖和施氮对菜地 N <sub>2</sub> O 排放的影响                             | 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)                             |
| 双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系                                          | 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)                          |
| 多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响                                        | 李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)                             |
| 桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征                                       | 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)                          |
| 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析                                           | 李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)                                         |
| 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响                                    | 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)                                  |
| 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征                                            | 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)                                         |
| 复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献                                            | 张彦军, 郭胜利 (961)                                                |
| 不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征                                    | 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)                        |
| 宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价                                         | 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)                               |
| 生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响                                       | 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)                                    |
| 污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响                                 | 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)                         |
| 热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件                           | 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)                     |
| 《环境科学》征订启事 (547)                                              |                                                               |
| 《环境科学》征稿简则 (828)                                              |                                                               |
| 信息 (581, 933, 952)                                            |                                                               |



# ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性

李田<sup>1</sup>, 印雯<sup>1</sup>, 王昕竹<sup>1</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3</sup>, 吴鹏<sup>1,2,3\*</sup>, 宋吟玲<sup>1,2,3</sup>

(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)

**摘要:** CANON 工艺如能处理低氮城市生活污水, 将大幅度降低市政污水处理能耗。故以纤维载体为填料, 在 CSTR 反应器中同时接种亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥启动 CANON 反应器, 且在 CANON 系统前端添加 ABR 除碳系统, 构建 ABR 除碳-CANON 耦合工艺, 研究 ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮性能, 并采用 MiSeq 高通量测序技术分析污泥中微生物菌群结构的变化情况。结果表明, 通过同时接种亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥, 控制 DO 为 0.5 ~ 2 mg·L<sup>-1</sup>、HRT 为 6h、pH 值为 8 左右等措施, 在 55 d 内成功启动 CANON 系统, TN 去除率为 81% ~ 87%, 氨氮负荷为 0.195 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>。ABR 除碳系统出水有机物浓度 (120 mg·L<sup>-1</sup>) 不会对后续 CANON 系统产生不利影响, 一体式 ABR 除碳-CANON 工艺 TN 去除率在 74% ~ 87%, 出水 COD 平均浓度为 40 mg·L<sup>-1</sup>。同时, CANON 系统启动后变形菌门 (Proteobacteria) 得到了显著提升, 鞘脂杆菌纲 (Sphingobacteria) 所占比例下降为 6.8%, CANON 系统中亚硝化菌和厌氧氨氧化菌不断淘汰劣势菌群成为反应器内优势菌群, 一体化 ABR 除碳-CANON 工艺对城市污水具有良好的脱氮除碳效果。

**关键词:** 全程自养脱氮工艺; 一体式反应器; 微生物菌群结构; 城市污水; 厌氧氨氧化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0823-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201808002

## Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process

LI Tian<sup>1</sup>, YIN Wen<sup>1</sup>, WANG Xin-zhu<sup>1</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2,3</sup>, WU Peng<sup>1,2,3\*</sup>, SONG Yin-ling<sup>1,2,3</sup>

(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)

**Abstract:** If municipal wastewater can be treated by the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process, it will greatly reduce the energy consumption of municipal wastewater treatment. The CANON reactor with a fiber carrier was started up by seeding nitrification sludge and anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) sludge in the continuously stirred tank reactor (CSTR). An ABR decarbonization system was added to the front of the CANON system to build the ABR decarbonization-CANON coupling process to examine carbon and nitrogen removal characteristics of the whole system. The high throughput sequencing technology of MiSeq was also employed to analyze the structure of the microbial community before and after the reactivation. The results showed that mixing nitrification sludge and ANAMMOX sludge in the CSTR reactor under controlled parameters (DO of 0.5-2 mg·L<sup>-1</sup>; HRT for 6 h; pH of 8) allowed the CANON system to successfully start within 55 d, with a TN removal rate of 81%-87% and ammonia nitrogen load of 0.195 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>. The effluent COD concentration of the ABR decarbonizing system did not adversely affect the subsequent CANON system, and the TN removal rate of the ABR decarbonization-CANON process was between 74% and 87%. Additionally, the average concentration of COD in the effluent was 40 mg·L<sup>-1</sup>. At the same time, the Proteobacteria gate significantly improved after the CANON system began, and the proportion of Sphingobacteria decreased to 6.8%. Nitrifying bacteria and anaerobic ammonia oxidizing bacteria in the CANON system continuously eliminated the inferior bacterial groups to become the dominant group in the reactor. The integrated ABR decarbonization-CANON process had a positive effect on the denitrification and decarbonization of urban sewage.

**Key words:** completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); integrated reactor; structure of microbial community; urban sewage; anaerobic ammonia oxidation

全程自养脱氮工艺 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 是近年发展起来的新型脱氮工艺<sup>[1~4]</sup>。其原理是在单一反应器内, 利用好氧氨氧化细菌 (AOB)<sup>[5]</sup> 和厌氧氨氧化细菌 (AnAOB)<sup>[6]</sup> 的协同作用, 将水中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 直接转化为 N<sub>2</sub>, 该工艺不消耗有机碳源, 耗氧量低且污泥产量低, 被认为是最具发展前景的脱氮工艺<sup>[7,8]</sup>。CANON 工艺的启动方法大多是颗粒污泥技术或者是以生物膜为载体, 其原理是在颗粒污泥

表面或者膜外形成好氧区以实现短程硝化, 在颗粒污泥内部或者膜内形成厌氧区以为厌氧氨氧化菌提供适宜的生存环境, 以此实现联合脱氮<sup>[9,10]</sup>。

目前 CANON 工艺主要应用在处理如污泥消化

收稿日期: 2018-08-01; 修订日期: 2018-08-25

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); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目

作者简介: 李田 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水回用与处理技术, E-mail: li690824185@sina.com

\* 通信作者, E-mail: wupengniu@126.com

液等高氨氮废水<sup>[11~13]</sup>, 应用于城市生活污水中还存在短程不稳定、污泥流失生物量减少、启动时间长难以稳定维持等问题<sup>[14]</sup>. 本研究在 CSTR 反应器以纤维载体为填料, 同时接种亚硝化污泥和厌氧氨氧化絮状污泥启动 CANON, 并且为减少有机碳源对 CANON 系统的影响, 在 CANON 系统前端设置 ABR 除碳系统, 构建一体化 ABR 除碳-CANON 耦合工艺, 用于处理城市污水, 同时采用 MiSeq 高通量测序技术对 CANON 系统启动前后的微生物进行检测, 从分子生物学角度分析接种污泥前后的菌群结构变化, 以期对 CANON 工艺处理城市生活污水提供宏观和微观依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本实验装置由有机玻璃制成, 总有效体积 11 L, 反应器长 52 cm, 宽 8 cm, 有效高度 30 cm, 由 ABR 除碳系统和 CSTR 全程自养脱氮系统 (CANON) 组成 (如图 1). ABR 系统每隔室升流区和降流区隔间宽度比为 4:1, 折流板导向角 45°, 有效容积为 6.5 L. CANON 系统分为曝气池和沉淀池两部分组成, 有效容积分别为 5.5 L 和 0.96 L, 反应器长 17 cm, 宽 8 cm, 有效高度 40 cm, 采用蠕动泵连续进水, 溢流水, 反应器内挂有带状的辫带式填料. 曝气区底部装有曝气装置, 以提供溶解氧, 并使泥水充分混合. 整个反应器始终置于恒温水箱中, 温度控制在  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

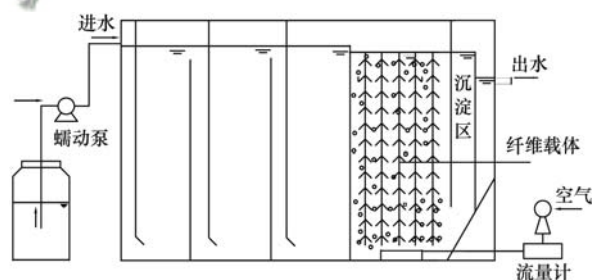


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus

### 1.2 接种污泥和实验进水

ABR 除碳污泥取自苏州某生活污水处理厂缺氧池污泥, ABR 反应器各隔室接种污泥量约占各隔室 2/3. 亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥均来源于实验室的亚硝化反应器和厌氧氨氧化反应器, 接种污泥量均为 500 mL.

采用人工配水模拟城市污水, 以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  为氮源 ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右), 以乙酸钠为碳源, 加碳酸氢钠以调节 pH 至 7.5 左右. 另外还包括生物所需的其它营养元素氯化钙 ( $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、硫酸镁 ( $10$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、磷酸氢二钾 ( $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 及微量元素. 微量元素分为微量元素 I 和微量元素 II, 微量元素按照  $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$  添加. 微量元素 I 组分 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): EDTA 5,  $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  5; 微量元素 II 组分 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): EDTA 15,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.43,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.24,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.99,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.25,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.22,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.19,  $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  0.21,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.014.

### 1.3 分析方法

本实验过程中每隔 1 d 取水样测定, 测定项目  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ : 纳氏试剂分光光度法;  $\text{NO}_2^--\text{N}$ : *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;  $\text{NO}_3^--\text{N}$ : 紫外分光光度法; MLSS、MLVSS: 标准重量法; SVI: 30 min 沉降法; pH: pH-9V 数显酸度计; 溶解氧: YSI550A 溶氧仪.

### 1.4 微生物高通量测序分析

分别将实验前后的 CANON 系统中污泥采集送样, 采用 FastPrep DNA 提取试剂盒 (QBIOWNE, USA) 提取 DNA, 完成基因组 DNA 抽提后, 利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA. 用 16S rRNA 基因引物 338F (ACTCCTACGGGAGG CAGCAG) 和 806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT) 对细菌 16S rRNA 基因进行 PCR 扩增, PCR 仪采用 ABI GeneAmp® 9700 型, 采用 TransGen AP221-02; TransStart Fastpfu DNA Polymerase,  $20 \mu\text{L}$  反应体系. 反应程序为  $95^\circ\text{C}$  预变性 3 min,  $95^\circ\text{C}$  变性 30 s,  $55^\circ\text{C}$  退火 30 s,  $72^\circ\text{C}$  延伸 45 s, 27 个循环后,  $72^\circ\text{C}$  延伸 10 min, 每个样品重复 3 次.

使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物, 委托上海美吉生物医药科技有限公司完成对 PCR 扩增产物的高通量测序, 微生物多样性分析于上海美吉医药生物科技有限公司所提供的 I-Sanger 生信分析云平台上完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 CANON 脱氮性能

混合亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥后, 在 CANON 启动过程中, 控制 HRT 为 6 h、氨氮负荷为  $0.195 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 为避免 DO 对 ANAMMOX 菌产生影响, 且保证 AOB 能够利用 DO 进行短程硝化, 控制 DO 为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在启动反应器的前 5 d, 在进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为  $43 \sim 47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为  $21 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  维持在  $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 然而出水亚硝态氮却高达  $31 \sim 41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (如图 2). 这是因为微生物所在环境的改变, 使得接种的厌氧氨氧化污泥中微生物生长繁殖受到抑制因而发



生细胞自溶<sup>[15]</sup>, 从而释放出大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  又被氨氧化菌 (AOB) 氧化为  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , 故而导致出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  较高. 在随后 5 ~ 10 d 里, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度持续升高至  $38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  下降至  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  亦下降至  $2 \sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 表明此时曝气量提供的 DO 已不能满足反应器的需求, 过低的曝气量致使大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  未能被 AOB 利用, 厌氧氨氧化菌 (ANAMMOX) 只能利用 AOB 产生的少量  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  与进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  产生氮气, 总氮去除率为 14% ~ 17%, CANON 脱氮效果低下. 故在 CANON 启动的第 11 d 调高曝气量, 此时 DO 达到  $1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  迅速降低,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  略有升高至  $5 \sim 7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度基本不变, 维持在  $2 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器性能得以迅速提升. 在接下来的 40 d 中, 根据出水氨氮情况的变化, 调节曝气量, DO 逐渐升高至  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  稳定在  $2 \sim 7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  为  $0 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为  $2 \sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 去除率为 81% ~ 87%, 反应器性能稳定.

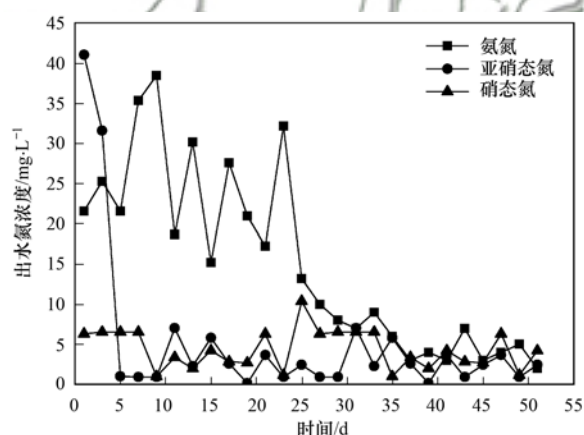


图2 出水氮浓度变化

Fig. 2 Change in effluent nitrogen concentration

在整个 CANON 系统启动过程中, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度一直较低 ( $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下), 说明亚硝酸盐氧化菌的活性一直处于被抑制的状态, 这是因为在整个启动过程中 DO 一直处于  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 周律等<sup>[16]</sup> 在生物膜系统中考察不同浓度的溶解氧对亚硝酸盐积累的影响时发现, 当 DO 浓度为  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 可以实现最大程度的亚硝酸盐积累; 且由于 CANON 反应器是一体式反应器, 系统中既有 AOB 和 NOB 又有 ANAMMOX, 这样 NOB 除了要与 AOB 争夺氧气外, 还要与 ANAMMOX 争夺亚硝酸盐, 受到双重竞争; 除此之外反应器温度控制在  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 在如此高的温度下, AOB 比 NOB 生长更快, 同时该温度也接近 AnAOB 的最佳生长温度,

所以在整个启动过程中, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度始终处于  $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下.

## 2.2 ABR 除碳-CANON 工艺的脱氮除碳性能

由于厌氧氨氧化反应功能菌世代时间长, 生长条件苛刻, 在有机物浓度过高的情况下, 反应过程和脱氮效果极易受到影响<sup>[17]</sup>, 为保证 ABR 段出水中有机物浓度不对后续 CANON 系统中 ANAMMOX 菌产生影响, 本实验在 ABR 系统和 CANON 系统耦合之前, 对 ABR 系统做单独运行. 如图 3, 进水 COD 在  $300 \sim 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, HRT 为 6 h, 经过 45 d 运行, 出水 COD 由  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右逐渐下降至  $170 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.

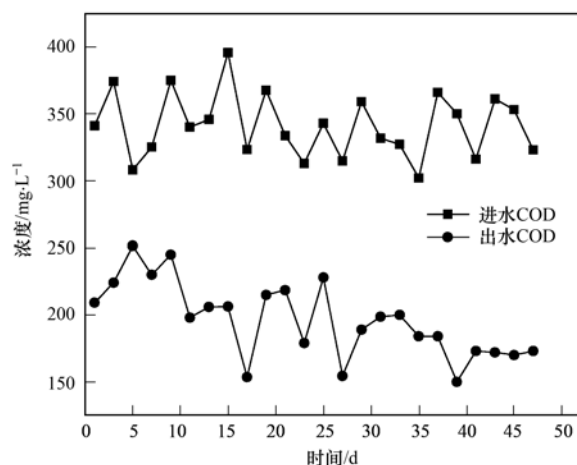


图3 ABR 系统进出水 COD 浓度变化

Fig. 3 Change in COD concentration in and out of water in the ABR system

汪瑶琪等<sup>[18]</sup> 所做研究认为有机物浓度控制在  $100 \sim 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 可降低有机物对 ANAMMOX 菌活性的抑制, 傅金祥等<sup>[19]</sup> 的研究结果表明, 当  $\text{COD} \leq 120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 有机物对厌氧氨氧化不仅没有抑制作用, 反而有促进作用, 李冬等<sup>[20]</sup> 在研究有机碳源对 CANON 工艺的影响时发现, 适量有机物 (不超过  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的存在会通过增强亚硝化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的活性和促进反硝化作用来提高氨氮和总氮的去除率, 而本实验在 CANON 系统中存在好氧异养菌, 好氧异养菌又能消耗一部份有机物, 所以在 ABR 单独运行 45 d 后, 对 ABR 系统和 CANON 系统进行耦合.

本实验在启动后期, 虽然有机物进入 CANON 系统, 但是总氮去除率并没有降低, 稳定在 74% ~ 87% (图 4), 这是因为厌氧氨氧化反应系统在有有机物的情况下, 系统内的异养反硝化菌与自养厌氧氨氧化菌可以协同作用使系统内同时发生异养反硝化反应与 ANAMMOX 反应. 其中, ANAMMOX 反应

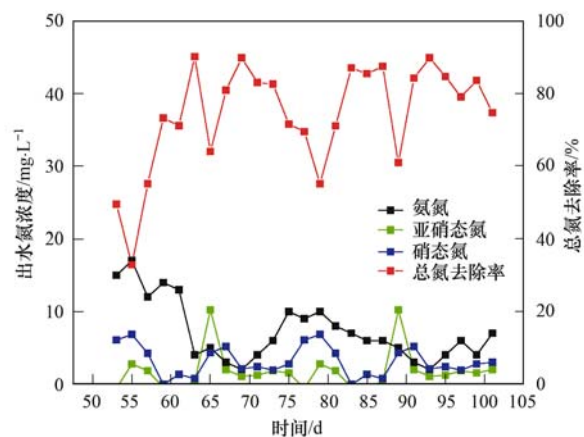


图4 耦合后一体式反应器出水氮变化

Fig. 4 Change in effluent nitrogen concentration of the integrated reactor after coupling

在消耗氨氮和亚硝酸盐氮的同时产生少量的硝酸盐氮,而异养反硝化菌则可以通过反硝化将

ANAMMOX 反应过程中生成的硝酸盐氮降解,从而提高系统的 TN 去除率,另一方面,适量有机物(不超过  $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的存在使得异养菌适度生长,这些异养菌产生的胞外聚合物使填料表面黏度变大,因而有利于污泥的持留,有利于一体式 ABR 除碳-CANON 系统的稳定.

2.3 微生物菌群结构变化

利用 MiSeq 高通量测序平台对 CANON 系统实验前(刚接种亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥于 CANON 系统中)和实验后(实验进行 100 d)污泥中微生物多样性进行分析,本研究中 2 个样本的覆盖率均大于 99.99%,可确保本次测序结果能够代表样本中微生物群落组成.如表 1 所示,Chao1 和 ACE 指数有所增加,表明实验后的 CANON 污泥拥有更高的微生物物种丰度<sup>[21]</sup>.Shannon 和 Simpson 指数变化较小,实验前后 CANON 微生物多样性略有增加<sup>[22]</sup>.

表1 CANON 系统实验前后微生物多样性变化

Table 1 Variation of microbial diversity of CANON system before and after the experiment

| 样品  | Chao1 指数 | ACE 指数 | Shannon 指数 | Simpson 指数 | 覆盖度/% |
|-----|----------|--------|------------|------------|-------|
| 实验前 | 291      | 288.84 | 3.19       | 0.10       | 99.95 |
| 实验后 | 366      | 360.55 | 3.44       | 0.14       | 99.96 |

如图 5,实验前后 Proteobacteria(变形菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门)均为丰度较高的菌门,而实验后 Proteobacteria 得到了显著提升,由实验前的 22.56% 上升到 61.02%,Bacteroidetes 和 Chloroflexi 均有不同程度地减少.有研究表明<sup>[23]</sup>,Proteobacteria 在大多数厌氧氨氧化系统中占据主导地位,且  $\beta$ -Proteobacteria 纲几乎涵盖了所有类型的 AOB,这也从微生物角度解释了本实验脱氮效能提高的原因.

活性恢复前,为进一步阐明厌氧氨氧化反应器启动前后微生物群落结构的变化情况,对纲水平下的菌群结构作进一步的分析.如图 6 所示,实验后

CANON 系统中  $\gamma$ -Proteobacteria 纲数量上占据绝对优势,郑平等<sup>[24]</sup>和 Heylen 等<sup>[25]</sup>指出  $\gamma$ -Proteobacteria 对于系统的脱氮和反硝化有很大的贡献,这与本实验结论一致. Sphingobacteria(鞘脂杆菌纲)与好氧反硝化关系密切,实验前 Sphingobacteria 纲所占比例为 34%,实验后 Sphingobacteria 纲所占比例下降为 6.8%,这是因为本实验所接种的亚硝化污泥中含有大量的好氧反硝化菌,而经过 100 d 实验后,好氧反硝化菌逐渐被淘汰,这也从侧面证明了本实验脱氮的主要方式为亚硝化与厌氧氨氧化的联合作用.

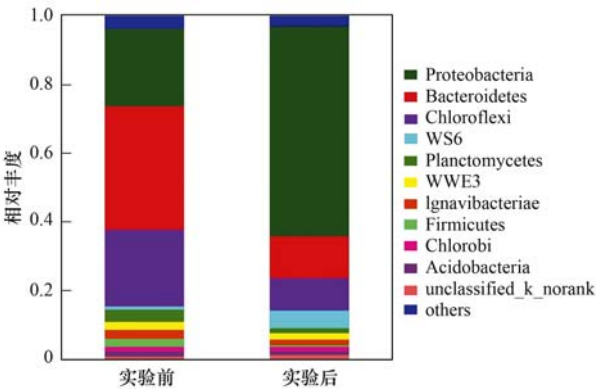


图5 启动前后, CANON 系统中各菌群在门级别上的相对丰度

Fig. 5 Relative abundances of different microbial phyla in the CANON system before and after start-up

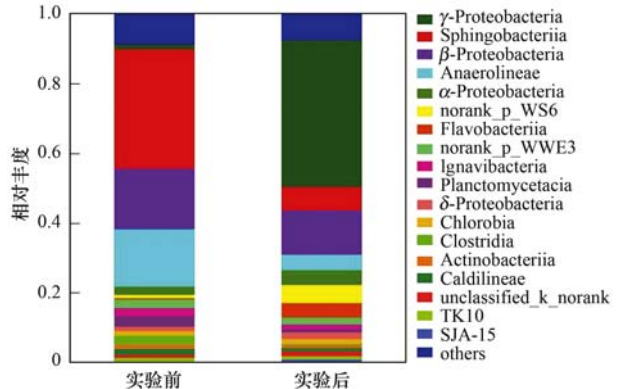


图6 启动前后, CANON 系统中各菌群在纲级别上的相对丰度

Fig. 6 Relative abundances of different microbial classes in the CANON system before and after start-up



### 3 结论

(1) 通过在 CSTR 反应器中同时接种亚硝化和厌氧氨氧化污泥, 控制 DO 为  $0.5 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、HRT 为 6 h、氨氮负荷为  $0.195 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、pH 值为 8 左右等措施, 在 55 d 内成功启动 CANON 系统, TN 去除率为 81% ~ 87%。

(2) ABR 除碳系统出水有机物浓度 ( $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 不会对后续 CANON 系统产生不利影响, 一体式 ABR 除碳-CANON 工艺 TN 去除率在 74% ~ 87%, 出水 COD 平均浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 一体化 ABR 除碳-CANON 工艺可以对城市污水稳定高效脱氮。

(3) CANON 系统启动前后 Proteobacteria 门得到了显著提升, Sphingobacteria 纲所占比例下降为 6.8%, CANON 系统中亚硝化菌和厌氧氨氧化菌不断淘汰劣势菌群成为反应器内优势菌群。

#### 参考文献:

- [1] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [2] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [3] Wang Z, Peng Y Z, Miao L, *et al.* Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 514-519.
- [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.
- [5] 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.
- [6] van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [7] 操沈彬, 王淑莹, 吴程程, 等. 有机物对厌氧氨氧化系统的冲击影响 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2164-2169.
- [8] Cao S B, Wang S Y, Wu C C, *et al.* Shock effect of organic matters on anaerobic ammonia oxidation system [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(12): 2164-2169.
- [9] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [10] Varas R, Guzmán-Fierro V, Giustinianovich E, *et al.* Startup and oxygen concentration effects in a continuous granular mixed flow autotrophic nitrogen removal reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **190**: 345-351.
- [11] Miao L, Wang S Y, Cao T H, *et al.* Optimization of three-stage Anammox system removing nitrogen from landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **185**: 450-455.
- [12] 王亚宜, 黎力, 马骁, 等. 厌氧氨氧化菌的生物特性及 CANON 厌氧氨氧化工艺 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1362-1374.
- [13] Wang Y Y, Li L, Ma X, *et al.* Bio-characteristics of anammox bacteria and CANON anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1362-1374.
- [14] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [15] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [16] Zhu J, Wilderer P A. Effect of extended idle conditions on structure and activity of granular activated sludge [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2013-2018.
- [17] 张倩, 王淑莹, 苗圆圆, 等. 间歇低氧曝气下 CANON 工艺处理生活污水的启动 [J]. *化工学报*, 2017, **68**(1): 289-296.
- [18] Zhang Q, Wang S Y, Miao Y Y, *et al.* Start-up of CANON process on domestic wastewater using intermittent aeration with low DO [J]. *CIESC Journal*, 2017, **68**(1): 289-296.
- [19] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [20] 周律, 李哥, Shin H, 等. 污水生物处理中生物膜传质特性的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1580-1586.
- [21] Zhou L, Li G, Shin H, *et al.* Research progression mass transfer in biofilms for wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1580-1586.
- [22] 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.
- [23] Wang H F, Fu 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.
- [24] 汪瑶琪, 喻徐良, 陈重军, 等. 有机物对厌氧氨氧化菌活性影响研究进展 [J]. *化学通报*, 2017, **80**(2): 173-178.
- [25] Wang Y Q, Yu X L, Chen C J, *et al.* Research progress in influence of organic matter on anaerobic ammonia oxidation reaction [J]. *Chemistry*, 2017, **80**(2): 173-178.
- [26] 傅金祥, 童颖, 于鹏飞, 等. 有机物对厌氧氨氧化的双向影响及抑制解除 [J]. *工业水处理*, 2014, **34**(7): 19-22.
- [27] Fu J X, Tong Y, Yu P F, *et al.* Two-way effect and disinhibition effect of organic matter on Anammox [J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, **34**(7): 19-22.
- [28] 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 等. 有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- [29] Li D, Wang Y J, Lü Y F, *et al.* Effect of organic carbon source on start-up and operation of the CANON granular sludge process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- [30] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Metagenomic insights into the effects of volatile fatty acids on microbial community structures and functional genes in organotrophic anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 621-633.
- [31] Ma J X, Wang Z W, Yang Y, *et al.* Correlating microbial community structure and composition with aeration intensity in submerged membrane bioreactors by 454 high-throughput pyrosequencing [J]. *Water Research*, 2013, **47**(2): 859-869.
- [32] 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 等. 长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4310-4316.

- Li T, Wei F K, Wang Y C, *et al.* Reactivation performance of nitrosation flocculent sludge after long-term storage [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4310-4316.
- [24] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] Heylen K, Gevers D, Vanparys B, *et al.* The incidence of *nirS* and *nirK* and their genetic heterogeneity in cultivated denitrifiers [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(11): 2012-2021.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                             | LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> ( 513 )            |
| A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in PRD .....                                                                   | LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> ( 525 )              |
| Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou .....                | FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> ( 532 )              |
| Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Yangzhou, China .....                                                                     | DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> ( 540 )         |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Liaohe City .....                                        | LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> ( 548 )     |
| Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed .....                                     | SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> ( 558 )         |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM <sub>2.5</sub> of a Concentrated Broiler Feeding Operation .....                                                    | LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> ( 567 )                     |
| Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation .....                                                    | HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> ( 573 )              |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading .....                                          | REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> ( 582 )          |
| Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis .....                                                               | LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> ( 590 )             |
| Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers .....                                                                                        | YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> ( 603 )                |
| Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China .....                                                         | LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> ( 614 )         |
| Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors .....                                         | DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> ( 625 )         |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River .....                                                                            | CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> ( 633 )            |
| Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle .....                                                                                                 | HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> ( 640 )  |
| Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments .....                                          | WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 649 )           |
| Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite .....                                                                  | ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> ( 658 )     |
| Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus .....                                                                                                       | ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> ( 669 )      |
| Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents .....                                                                        | WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> ( 677 )                      |
| Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution .....                                                                                    | DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> ( 685 )   |
| Preparation of ZnTiO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants .....                                         | ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> ( 693 )       |
| Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO <sub>2</sub> Facet .....                                                                                          | ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> ( 701 )         |
| Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B .....                                               | ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> ( 708 )       |
| Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material .....                                                     | CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> ( 717 )         |
| Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation .....                                                         | ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> ( 724 ) |
| Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process .....                                                                       | XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> ( 730 )           |
| Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process .....                                                                 | WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> ( 738 )             |
| Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process .....                                                                          | LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> ( 747 )       |
| Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater .....                                                                        | LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> ( 754 )       |
| Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza .....                                     | DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> ( 761 )            |
| Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer .....                                                        | SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> ( 768 )     |
| Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets .....                                                                                     | YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> ( 774 )     |
| Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source .....                                               | BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> ( 783 )         |
| Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage .....                                                              | DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> ( 791 )         |
| Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration .....                                                            | ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> ( 799 )        |
| Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process .....                                                                                                | WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> ( 808 )        |
| Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems .....                                                                                          | DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> ( 816 )         |
| Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process .....                                                                                       | LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> ( 823 )                 |
| Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process .....                                                                                                                         | LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> ( 829 )               |
| Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation .....                                                                        | LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> ( 837 )                |
| Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System .....                                                                                                 | ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> ( 845 )          |
| Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms .....                                                                                                | WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> ( 853 )                   |
| Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan .....                                                                   | YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> ( 859 )          |
| Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing .....                                                       | QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> ( 869 )         |
| Effect of Nitrification on N <sub>2</sub> O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands .....                                                                 | YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> ( 876 )            |
| Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N <sub>2</sub> O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems .....                                                 | NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> ( 885 )   |
| Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from a Vegetable Field .....                                                       | NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> ( 893 )              |
| Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety .....                                                          | XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> ( 904 )       |
| Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province .....                                                             | LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> ( 915 )       |
| Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin .....                                                                             | DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> ( 924 )      |
| Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City .....                                                                       | LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> ( 934 )                   |
| Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils .....                                                                 | LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> ( 945 )             |
| Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain .....                                                                              | CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> ( 953 )                |
| Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions .....                                                                                          | ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> ( 961 )                    |
| Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil .....                   | WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> ( 970 )         |
| Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City .....                                                                             | ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> ( 978 )            |
| Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost .....                                                                     | ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> ( 987 )                  |
| Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge .....                              | YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> ( 994 )          |
| Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield ..... | BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> ( 1003 )             |