

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.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响

王建芳^{1,2,3}, 齐泽坤¹, 钱飞跃^{1,3*}, 刘文如^{1,3}, 张俊⁴, 王伟⁴, 沈聪²

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学天平学院, 苏州 215009; 3. 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; 4. 苏州市排水有限公司, 苏州 215001)

摘要: 在 CSTR 中控制稳定的进水氨氮负荷, 基于对粒径分布、胞外聚合物 (EPS) 组分和功能菌动力学活性的分析, 考察水力停留时间 (HRT) 对颗粒污泥形态、氮转化效能和微生物动力学活性的影响, 并采用 MiSeq 高通量测序技术分析污泥中微生物菌群结构。结果表明, HRT 从 4 h 逐渐缩短至 1 h, 反应器中氨氮去除率从 80% 逐渐提高至 95%, 亚硝酸盐累积率始终大于 85%。缩短 HRT 可显著改变颗粒污泥粒径分布, 0.3 ~ 0.8 mm 的颗粒逐渐占主导, 约达 50%, 粒径小于 0.3 mm 和大于 1.6 mm 的颗粒逐渐减少。HRT 对功能微生物活性影响与颗粒大小有关。系统中变形菌门 (Proteobacteria) 占绝对优势, 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 为代表的 AOB 富集度高达 56% 以上, 缩短 HRT 有利于 AOB 的富集。

关键词: 水力停留时间 (HRT); 亚硝化颗粒污泥; 粒径分布; 高通量测序; 群落特征; 连续流完全混合式反应器 (CSTR)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1794-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201911012

Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor

WANG Jian-fang^{1,2,3}, QI Ze-kun¹, QIAN Fei-yue^{1,3*}, LIU Wen-ru^{1,3}, ZHANG Jun⁴, WANG Wei⁴, SHEN Cong²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. College of Tianping, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 4. Suzhou Drainage Company Limited, Suzhou 215001, China)

Abstract: The effects of different hydraulic retention time (HRT) on short-cut nitrification granular sludge were studied in a continuous stirred-tank reactor (CSTR) by maintaining stable influent ammonia nitrogen load. Particle size distribution, extracellular polymeric substances (EPS), and functional bacterial kinetics were analyzed. The morphology of granular sludge, the performance of the CSTR, and the activity of functional microorganisms were investigated. The high throughput sequencing technology of MiSeq was employed to analyze the structure of the microbial community in sludge. The results showed that the ammonia nitrogen removal rate in the reactor was gradually increased from 80% to 95%, and the nitrite accumulation rate was always over 85% when the HRT was decreased from 4 h to 1 h. Particle size distribution of granular sludge was greatly influenced by HRT. The mass fraction of granules with a diameter smaller than 0.3 mm and larger than 1.6 mm was gradually declined, whereas the mass fraction of granules with a diameter between 0.3 mm and 0.8 mm was increased when HRT was shortened from 4 h to 1 h. The dominating proportion of granules with a diameter between 0.3 mm and 0.8 mm reached about 50% when HRT was 1 h. The impact of HRT on the activity of functional microorganisms was studied, and HRT activity was found to be closely related to the size of granular sludge. Proteobacteria were dominant in the system. AOB enrichment was represented by *Nitrosomonas*, which was more than 56%. Shortening HRT is beneficial for the enrichment of AOB.

Key words: hydraulic retention time (HRT); partial nitrification granular sludge; particle sizes distribution; high-throughput sequencing; microbial community characteristics; continuous stirred-tank reactor (CSTR)

稳定的亚硝化技术是短程脱氮工艺的关键^[1,2]。将短程硝化与污泥颗粒化技术结合, 培养具有亚硝化性能的颗粒污泥 (PNG) 是实现高效、稳定亚硝酸盐累积的可行方法^[3], 并可作为全自养型脱氮工艺的重要步骤。PNG 上富集有大量慢速生长的自养硝化微生物, 因而具有较异养 AGS 更好的密实度和沉降性能。阴方芳等将 SBR 中培养成熟的亚硝化颗粒污泥接种到连续流完全混合式反应器 (CSTR) 中, 可以在无机条件下实现极高的氨氮去除效能, 氨氮去除率稳定在 80% 左右, 亚硝积累率稳定在 84% 左右^[4]。

对于 CSTR 而言, 水力停留时间 (HRT) 影响污

泥截留性能和颗粒结构, 成为反应器效能调控重要的运行参数^[5,6]。在传统活性污泥法中, HRT 直接决定了微生物与污染物的接触反应时间, 过短的 HRT 易导致出水水质下降和污泥流失率增大^[7]。好氧颗粒污泥 (AGS) 由于具有良好的沉降性能, 能够在更短的 HRT 条件下实现稳定运行, 较短的 HRT 为

收稿日期: 2019-11-02; 修订日期: 2019-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353, 51878430); 江苏省高等学校自然科学基金资助项目 (18KJ B610019); 苏州市科技计划项目 (SS 201834); 苏州科技大学研究生科研创新计划项目 (SKCX 18_003); 江苏省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: 王建芳 (1973 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: wjf302@163.com

* 通信作者, E-mail: feiyuehandler@163.com

AGS 提供充足的水力选择压,有助于促进胞外聚合物(EPS)分泌,改善颗粒形态结构^[8~10]。

目前,关于 CSTR 中 HRT 对好氧颗粒污泥的影响多是结合基质负荷变化进行的^[11~13],将 HRT 作为单一因素考察对 PNG 性能和功能微生物影响鲜见报道。本研究在保持进水氨氮负荷不变的前提下,较系统地考察 HRT 对 CSRT 中颗粒形态结构、氮转化性能、微生物活性和群落结构的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

本实验所用装置为合建式连续流 CSTR 反应器,如图 1 所示,由有机玻璃制成,分曝气区和沉淀区两部分,有效容积分别为 1.7 L 和 0.6 L。曝气区底部装有曝气装置,控制曝气量为 0.6 L·min⁻¹ (表面上升流速 0.156 cm·s⁻¹),为污泥系统提供溶解氧和剪切力。反应器置于恒温水浴箱中,温度控制在 28℃ 左右。

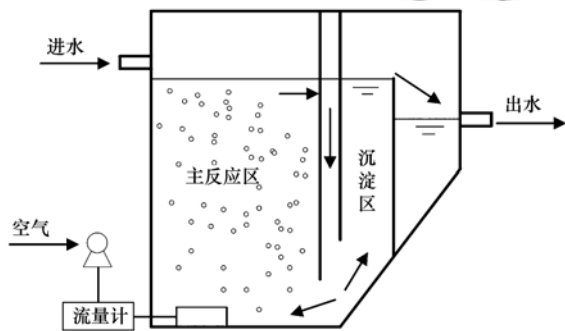


图 1 实验装置及工艺流程示意
Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

1.2 接种污泥及实验用水

接种污泥取自本实验室 SBR 中成熟的亚硝化颗粒污泥,亚硝酸盐累积率在 80% ~ 85%。初始 MLSS 和 SVI 分别约为 4.8 g·L⁻¹ 和 35 mL·g⁻¹。

本研究所用模拟污水组成如下: 125 ~ 500 mg·L⁻¹ NH₄Cl (以 N 计), 18 mg·L⁻¹ K₂HPO₄, 49 mg·L⁻¹ MgSO₄, 60 mg·L⁻¹ CaCl₂, 1.5 mg·L⁻¹ FeCl₃·6H₂O, 1 mL·L⁻¹ 的微量元素,微量元素配方见文献[14]。通过向进水中投加 NaHCO₃,维持反应器中 pH 在 7.8 ~ 8.0。控制反应器进水氨氮负荷稳定在 3.0 kg·(m³·d)⁻¹,运行工况分为 3 个阶段,反应器具体运行参数如表 1 所示。

1.3 分析测试方法

NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN 和 MLSS/MLVSS 等水质指标分别按文献[15]中规定的纳氏试剂比色法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、紫外分光光度法、过硫酸钾氧化法、重量法等进行测定。pH 由 PB-10

型 pH 计 (Sartorius 公司) 测定,温度和 DO 采用 HI946N 型溶解氧测定仪 (WTW 公司) 进行测定。

表 1 反应器运行工况和参数

Table 1 Operating conditions and parameters in CSTR			
水力停留时间 /h	运行时间 /d	进水氨氮 /mg·L ⁻¹	氮容积负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
4	1 ~ 30	500	3
2	31 ~ 60	250	3
1	61 ~ 90	125	3

采用甲醛-NaOH 法进行颗粒污泥 EPS 的提取,并使用苯酚-硫酸法、改进的 Lowry 法分别测定蛋白质(PN)和聚多糖(PS)组分的含量。颗粒污泥沉降速率采用清水静沉法测定。

采用筛分法测算颗粒污泥的粒径分布。定期从反应器中取出部分污泥样品,经 0.9% NaCl 溶液反复清洗后,依次通过孔径为 2.5、1.6、1.25、0.8 和 0.3 mm 的分样筛,称量各筛网截留的污泥质量。根据样品总质量,计算各粒径区间所占比例和颗粒平均粒径。

1.4 功能菌动力学活性

当反应器出水水质达到稳定状态,通过批次实验测定颗粒污泥的基质比降解速率和产物比累积速率,以表征不同功能菌的动力学活性。具体方法为:取湿重为 2 g 的颗粒污泥,经 0.9% NaCl 溶液反复清洗后,置于 250 mL 烧杯中,注入 200 mL 基质溶液,曝气反应 2 h。控制初始 NH₄⁺-N 浓度为 150 mg·L⁻¹,其他组分与反应器进水相同,pH = 8.0,水温为 28℃,DO 浓度在 2 ~ 4 mg·L⁻¹。期间,定期取样测定水质指标,并计算以下比速率值。

NH₄⁺-N 比降解速率,mg·(g·h)⁻¹:

$$\mu(\text{NH}_4^+\text{-N}) = -\Delta c(\text{NH}_4^+\text{-N})/(\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \tag{1}$$

NO₂⁻-N 比累积速率,mg·(g·h)⁻¹:

$$\mu(\text{NO}_2^-\text{-N}) = \Delta c(\text{NO}_2^-\text{-N})/(\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \tag{2}$$

NO₃⁻-N 比累积速率,mg·(g·h)⁻¹:

$$\mu(\text{NO}_3^-\text{-N}) = \Delta c(\text{NO}_3^-\text{-N})/(\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \tag{3}$$

式中,Δc(NH₄⁺-N)、Δc(NO₂⁻-N) 和 Δc(NO₃⁻-N) 分别指反应时间 Δt 内,上清液中 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的浓度变化,mg·L⁻¹; MLVSS 为挥发性悬浮固体浓度,g·L⁻¹;Δt 为各参数值呈线性变化的时间段,h。

1.5 微生物高通量测序分析

在 HRT 稳定运行条件下反应器中多点采样混合后作为污泥样品,采用 FastPrep DNA 提取试剂盒抽提基因组 DNA。用 16S rRNA 基因引物 338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R (GGACTA

CHVGGGTWTCTAAT)对细菌 16S rRNA 基因进行 PCR 扩增. 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物, 由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.

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥的理化特征变化

随着 HRT 的逐渐缩短, 亚硝化颗粒污泥粒径分布变化如图 2 所示. 当 HRT = 4 h 时, 粒径 1.6 ~ 2.5 mm 和 > 2.5 mm 的大颗粒分别占到了约 40% 和 35%, 污泥平均粒径为 1.8 mm. 缩短反应器 HRT 会使得大颗粒污泥逐渐减少, 粒径在 0.3 ~ 0.8 mm 的颗粒快速增多. 当 HRT = 1 h 时, 粒径在 0.3 ~ 0.8 mm 的颗粒占据主导地位, 约占 50%, 粒径 > 1.6 mm 和 < 0.3 mm 的颗粒分别占到 36% 和 5% 以下, 污泥平均粒径稳定在 1.3 mm. 该结果表明, 缩短 HRT, 增大水力冲刷强度, 提升了选择压, 可显著改变 CSTR 中颗粒污泥的粒径分布, 并使颗粒形态更加均匀和密实.

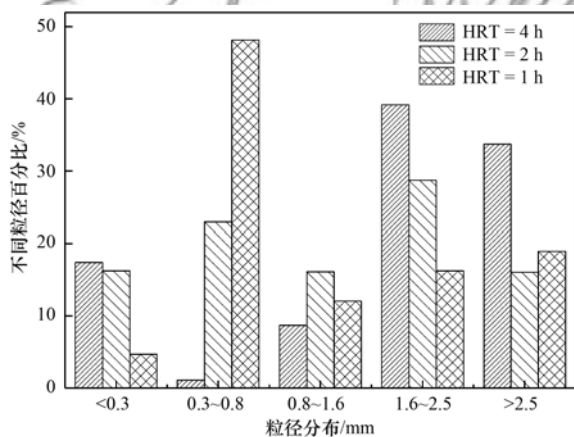


图 2 不同的 HRT 条件下 CSTR 中污泥粒径分布

Fig. 2 Size distribution of sludge in CSTR at different HRT

从图 3 可知, 缩短 HRT, 反应器出水 SS 总体呈下降趋势. 反应器中污泥浓度从 $5.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 持续增加, 运行至第 90 d, MLSS 高达 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 比启动初期提高了近 2 倍. HRT 从 4 h 减小到 1 h, 进水氨氮容积负荷始终维持在 $3.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 不变, 污泥 MLSS 增幅加大, 进一步证实了颗粒污泥可显著提升反应器污泥的生物截留能力, 由于污泥密实度高、沉降速率快, 缩短水力停留时间, 并未出现污泥流失. 有研究表明, 随着 HRT 减小, 容积负荷逐渐增加使得微生物具有较高的生长速率, MLSS 显著增加^[16, 17]. Beun 等^[18]提出较短的 HRT 有利于颗粒污泥的形成, SBR 反应器 HRT 为 8 h 运行 10 周, 颗粒污泥的 MLSS 从 $1.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $1.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 缩

短 HRT 到 6.75 h 运行 8 周, 颗粒污泥的 MLSS 从 $1.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $2.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Liu 等^[6]维持进水氨氮容积负荷在 $8.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 考察 HRT 单一因素对污泥颗粒化过程的影响, 运行 14 d, HRT 为 4 h 的反应器, MLSS 从 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $3.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 较短的 HRT 有利于污泥增殖. Rosman 等^[12]和 Pan 等^[13]均证实了较短的 HRT 条件下形成的颗粒污泥结构密实, 形状规则, 具有较好的沉降性能. 本研究自养亚硝化颗粒污泥中 AOB、NOB 属于慢速生长微生物, 较短的 HRT, 提高了水力选择压, 有利于微生物增殖, 且使污泥颗粒粒径分布更加均匀.

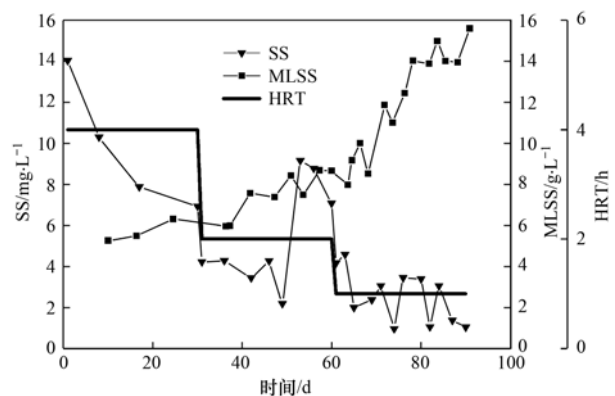


图 3 反应器运行过程中出水 SS 的变化

Fig. 3 Variations of MLSS in effluent during the experiment

EPS 对颗粒污泥的形成和稳定性具有显著影响^[19, 20], 微生物细胞产生 EPS, 形成交联的网络, 并进一步加强颗粒的完整性使得颗粒结构更加密实. 本研究发现(图 4), 缩短 HRT, EPS 总量逐渐升高, 蛋白质和多糖都有所提高, 蛋白质的增幅略高于多糖, 符合成熟亚硝化颗粒污泥典型的 EPS 分布特征^[21]. EPS 中的蛋白质比多糖具有更丰富的静电键与金属架桥, 有利于污泥结构的稳定. 胞外蛋白质富含各类降解酶, 包埋于 EPS 中的微生物可降解特定污染物^[22]. 较短的 HRT, 提高颗粒污泥水力剪切力, 促使微生物分泌更多的胞外聚合物(EPS), 有利于提升微生物活性和颗粒物稳定性. 这一现象可进一

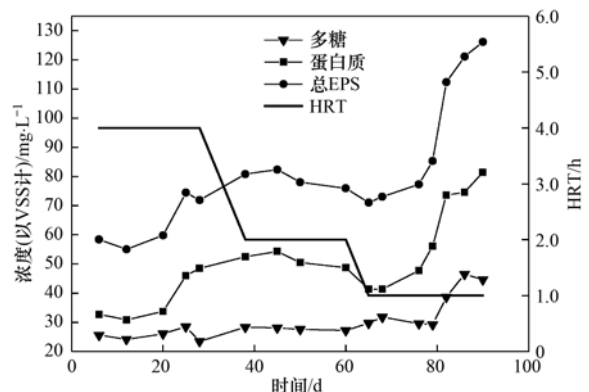


图 4 不同 HRT 条件下 EPS 的变化关系

Fig. 4 Variations of EPS at various HRT

步解释在低 HRT 条件下,反应器具有良好微生物截留性能,较高的污泥增殖速率的原因。

2.2 HRT 对氮转化效能的影响

HRT 不断缩短过程中,亚硝化颗粒污泥反应器的整体运行状况如图 5 所示。随着 HRT 降低,氨氮去除率呈阶梯式增长最终稳定在 99% 左右。其中 HRT 为 2 h 时,氨氮去除率出现较为明显的波动,出水亚硝酸盐浓度略有波动。HRT 对微生物群落结构和反应器性能会产生影响^[23]。缩短 HRT,促进污泥增殖,使颗粒污泥粒径分布更加均匀。对于连续流反应器,HRT 是重要参数,过高的 HRT 会导致反应器处理效率降低,而缩短 HRT,易加剧污泥流失。本研究在 HRT 为 1 h 的条件下,系统仍具有较高的脱氮性能,这与颗粒污泥良好的沉降性能密不可分。

有研究发现,随着 HRT 降低,反应器的硝化性能下降^[23],而本研究整个运行过程中亚硝酸盐累积率始终保持在 85% 以上(图 5),随着 HRT 不断下降,氨氮去除率逐步增长,出水硝态氮浓度逐渐降低至 10 mg·L⁻¹左右。本研究控制氮容积负荷不变,进

水氨氮浓度随着 HRT 缩短而下降(表 1),污泥氮负荷进一步下降。系统中微生物处于低负荷运行,污泥活性增强,氮去除效率提高。通过逐渐缩短 HRT 的方式,降低污泥沉降时间,将沉降性能较差的絮状污泥逐渐从反应器内淘洗出去,污泥龄(SRT)缩短,起到淘洗 NOB 的作用^[4]。本研究缩短 HRT 成为有效抑制 NOB、维持颗粒污泥稳定亚硝化性能的有效因素。笔者认为可能存在以下 3 个原因:① 研究所用接种污泥具有良好的亚硝化效果,保证了反应器中较高的 AOB 和较低的 NOB 数量;② 在自适应条件下,缩短 HRT 增加了水力选择压,颗粒污泥粒径分布集中于 0.3 ~ 0.8 mm,有利于优化基质和 DO 的传质条件,提高 AOB 的活性,抑制 NOB;③ 由于颗粒污泥中不同功能微生物呈层状分布,AOB 通常分布在颗粒的外层,有利于获得更好的基质和生长条件,相对于 NOB,更易在颗粒化污泥中成为优势种群^[24,25]。

2.3 HRT 对功能微生物动力学活性的影响
HRT 对 CSTR 中亚硝化颗粒污泥的粒径分布产

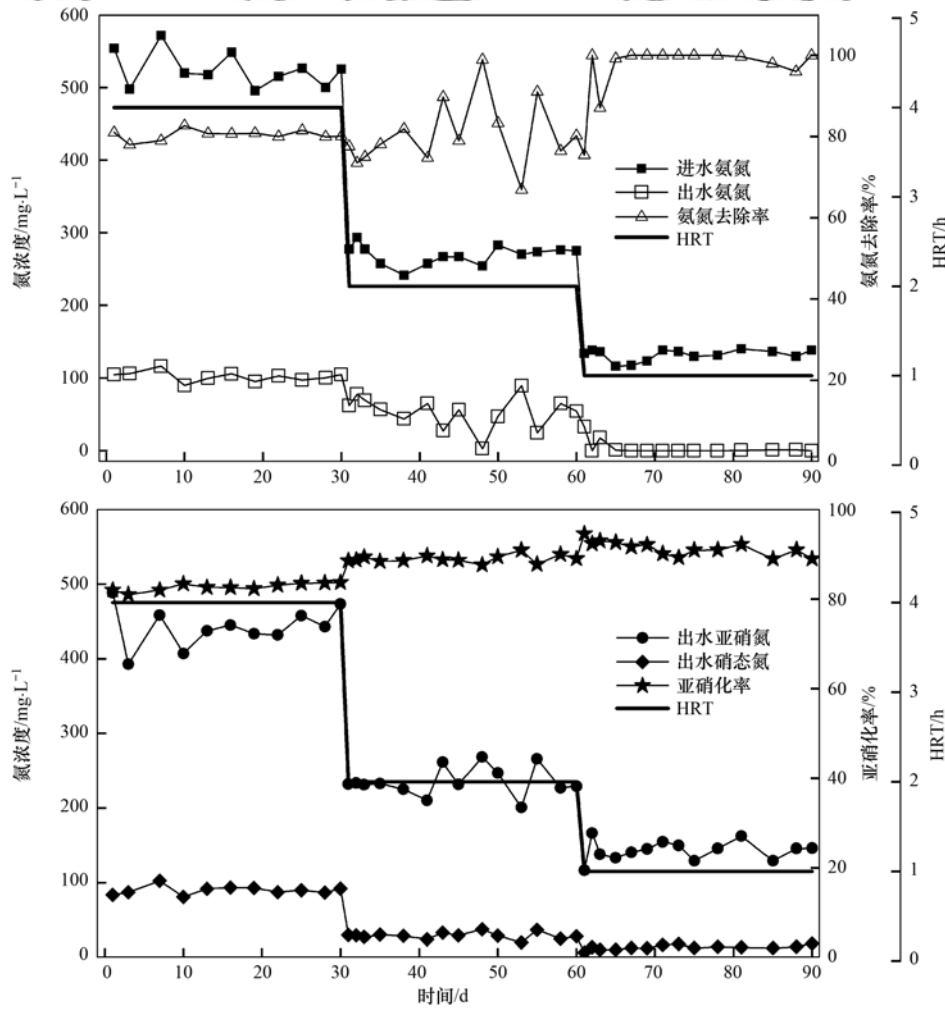


图5 亚硝化颗粒污泥反应器运行氮的转化规律

Fig. 5 Nitrogen transformation behavior of short-cut nitrification granular sludge in the CSTR

生了较大影响,HRT 为 1 h,反应器中污泥粒径集中于 0.3 mm~0.8 mm. 颗粒污泥粒径的差异,将直接影响反应器性能.

本研究对不同 HRT 稳定运行条件下,粒径小于 0.8 mm 和大于 0.8 mm 的两大类污泥中功能微生物 AOB 和 NOB 的活性进行分析,氨氮比降解速率 $\mu(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、亚硝酸盐比生成速率 $\mu(\text{NO}_2^--\text{N})$ 和硝酸盐比生成速率 $\mu(\text{NO}_3^--\text{N})$ 测定结果见表 2.

表 2 不同 HRT 条件下 CSTR 中大小颗粒污泥功能微生物活性对比

Table 2 Comparison of sludge activity at various HRT in CSTR				
污泥粒径 /mm	功能微生物活性 /mg·(g·h) ⁻¹	HRT/h		
		4	2	1
>0.8	$\mu(\text{NH}_4^+-\text{N})$	13.3	16.3	22.0
	$\mu(\text{NO}_2^--\text{N})$	12.9	16.0	20.9
	$\mu(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.7	1.0	1.9
<0.8	$\mu(\text{NH}_4^+-\text{N})$	35.2	31.6	24.7
	$\mu(\text{NO}_2^--\text{N})$	30.6	30.1	23.2
	$\mu(\text{NO}_3^--\text{N})$	3.6	3.4	1.9

结果发现,粒径 <0.8 mm 的颗粒污泥,氨氮比降解速率和亚硝酸盐比生成速率、硝酸盐比生成速率均高于粒径 >0.8 mm 的颗粒污泥,说明粒径较小颗粒污泥中 AOB 和 NOB 均具有更高的活性. 因此,在 HRT 缩短过程中,0.3~0.8 mm 的颗粒比例逐渐提升,反应器亚硝化性能也得以提升. 不同粒径污泥中功能微生物的活性受 HRT 的影响完全不同. 粒径 >0.8 mm 的颗粒污泥,缩短 HRT, AOB 和 NOB 功能微生物的活性都逐渐提升;与之相反,粒径 <0.8 mm 的颗粒污泥,缩短 HRT, AOB 和 NOB 功能微生物的活性都有所下降. 在本研究中,两种效果叠加,缩短 HRT, NOB 在竞争基质和 DO 时处于劣势,硝酸盐比生成速率总体下降,证实了较低的 HRT 对 NOB 有较好的抑制作用,这一结果与运行数据 HRT 缩短,硝酸盐生成量减少的情况吻合.

粒径相对较小颗粒污泥,既具有颗粒污泥沉降性能好、生物富集度高的优势,又具有相对较大的比表面积,有利于富集在颗粒污泥表面的优势微生物生长代谢. 在实际工程运用中,可根据主导颗粒污泥粒径分布调控合理的 HRT,提高系统效能.

2.4 高通量测序结果分析

图 6 为 CSTR 系统在 HRT 为 4 h 和 1 h 稳定运行条件下,污泥测序在门水平下微生物群落多样性分析结果,主要包括变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿菌门(Chlorobi)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycets). 涉及到脱氮功能微生物的变形菌门占绝对优势,超 80%. HRT 从 4 h 缩短至 1 h,变形菌门比例略有升高. 系

统中出现厌氧氨氧化菌所在的浮霉菌门, HRT 缩短后,这类微生物的比例略有下降.

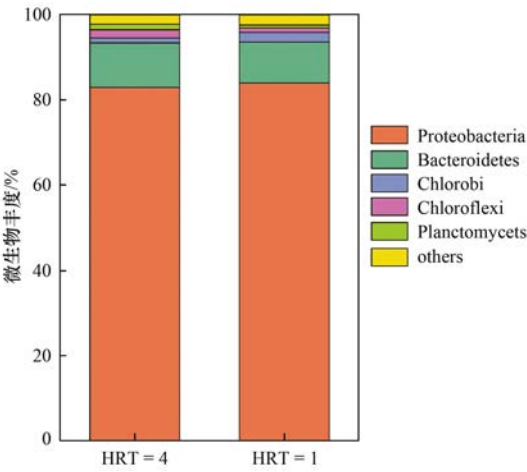


图 6 不同 HRT 时 CSTR 中微生物群落组成(门)相对丰度
Fig. 6 Taxonomic classification of the bacterial communities in CSTR under various HRT at the phylum level

为了进一步阐明 HRT 对 CSRT 污泥微生物种群变化影响,对属水平样品功能微生物和优势微生物菌群进行分析. 如图 7 所示,亚硝化单胞菌属(Nitrosomomas)在 CSTR 污泥微生物群落中占绝对优势. 亚硝化单胞菌属(Nitrosomomas)是典型的 AOB^[26],在本系统污泥中富集度高达 56% 以上. 短程硝化技术实现的关键在于亚硝酸盐的积累^[27],也就是通过富集污泥中的 AOB,并控制 AOB 和 NOB 的数量与活性平衡,在硝化过程中实现亚硝酸盐的稳定积累. 高通量微生物测序结果表明,优势微生物 Nitrosomomos 的高度富集度,也进一步解释系统具有良好的氨氧化性能和亚硝酸盐积累率. 缩短 HRT, Nitrosomomos 丰度提高 3% 左右,与系统脱氮性能提升结果吻合. 尽管维持容积负荷不变, HRT 从 4 h 到 1 h, AOB 绝对优势不变,微生物门类一致,但微生物种类和丰度发生变化,有利于颗粒污泥中微生物的自平衡,提升污泥自适应性能.

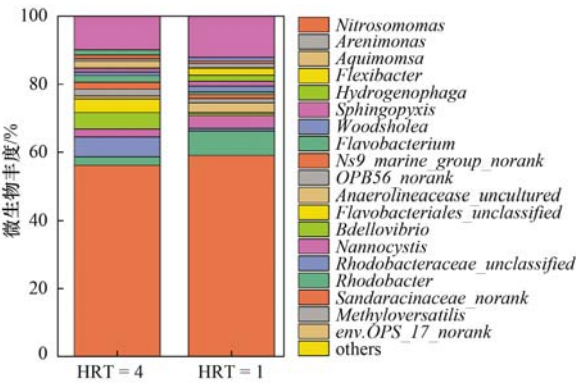


图 7 不同 HRT 时 CSTR 中微生物群落组成(属)相对丰度
Fig. 7 Taxonomic classification of the bacterial communities in CSTR under various HRT at the genus level

3 结论

(1) HRT 从 4 h 缩短至 1 h, CSTR 中颗粒污泥粒径分布发生显著变化. 随着 HRT 缩短, 粒径 < 0.3 mm 和粒径 > 1.6 mm 颗粒的质量分数分别由 17% 和 75% 逐渐下降至 5% 和 36%, HRT 为 1 h 时, 粒径为 0.3 ~ 0.8 mm 颗粒占比约达 50%.

(2) 缩短 HRT, CSRT 中亚硝化颗粒污泥性能稳定, 亚硝酸盐累积率稳定在 85% 以上, HRT 缩短至 1 h, 氨氮的去除率提高到 99%. 整个运行过程中, 颗粒结构更加密实, 无颗粒解体现象, MLSS 由 $5.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 粒径 < 0.8 mm 的颗粒, 氨氮比降解速率和亚硝酸盐比生成速率、硝酸盐比生成速率均高于粒径 > 0.8 mm 的颗粒污泥. 缩短 HRT 有利于大颗粒功能微生物活性提升, 在较长的 HRT 条件下, 粒径 < 0.8 mm 的颗粒污泥活性更高.

(4) 系统中变形菌门 (Proteobacteria) 占绝对优势, 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomomas*) 为代表的 AOB 在系统污泥中富集度高达 56% 以上, 缩短 HRT 有利于 AOB 的富集.

参考文献:

- [1] Kumwimba N M, Lotti T, Şenel E, *et al.* Anammox-based processes: how far have we come and what work remains? A review by bibliometric analysis[J]. *Chemosphere*, 2020, **238**: 124627.
- [2] Wang J F, Zhang Z Y, Qian F Y, *et al.* Rapid start-up of a nitrification granular reactor using activated sludge as inoculum at the influent organics/ammonium mass ratio of 2/1 [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **256**: 170-177.
- [3] 刘文如, 丁玲玲, 王建芳, 等. 低 C/N 比条件下亚硝化颗粒污泥的培养及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
Liu W R, Ding L L, Wang J F, *et al.* Granulation of granular nitrosation sludge at low C/N ratio [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
- [4] 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 等. CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4230-4236.
Yin F F, Liu W R, Wang J F, *et al.* Research on change process of nitrosation granular sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4230-4236.
- [5] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.
Wang J L, Zhang Z J, Wu W W. Research advances in aerobic granular sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [6] Liu Y Q, Zhang X, Zhang R, *et al.* Effects of hydraulic retention time on aerobic granulation and granule growth kinetics at steady state with a fast start-up strategy [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(1): 469-477.
- [7] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 919-934.
- [8] Torà J A, Moliné E, Carrera J, *et al.* Efficient and automated start-up of a pilot reactor for nitrification of reject water: from batch granulation to high rate continuous operation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **226**: 319-325.
- [9] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [10] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: precipitating calcium and iron salts in granular interiors [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8051-8057.
- [11] Tsuneda S, Ogiwara M, Ejiri Y, *et al.* High-rate nitrification using aerobic granular sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(3): 147-154.
- [12] Rosman N H, Nor Anuar A, Chelliapan S, *et al.* Characteristics and performance of aerobic granular sludge treating rubber wastewater at different hydraulic retention time [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **161**: 155-161.
- [13] Pan S, Tay J H, He Y X, *et al.* The effect of hydraulic retention time on the stability of aerobically grown microbial granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2004, **38**(2): 158-163.
- [14] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [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] Cydzik-Kwiatkowska A, Wojnowska-Baryła I. Nitrogen-converting communities in aerobic granules at different hydraulic retention times (HRTs) and operational modes [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, **31**(1): 75-83.
- [17] Xu S N, Wu D L, Hu Z Q. Impact of hydraulic retention time on organic and nutrient removal in a membrane coupled sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 12-20.
- [18] Beun J J, Hendriks A, van Loosdrecht M C M. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2283-2290.
- [19] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, **65**(2): 143-148.
- [20] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [21] Wang J F, Qian F Y, Liu X P, *et al.* Cultivation and characteristics of partial nitrification granular sludge in a sequencing batch reactor inoculated with heterotrophic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(21): 9381-9391.
- [22] Win T T, Kim H, Cho K, *et al.* Monitoring the microbial community shift throughout the shock changes of hydraulic retention time in an anaerobic moving bed membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **202**: 125-132.
- [23] Fernández B, Vilar A, Ben M, *et al.* Partial nitrification of wastewater from an aminoplastic resin producing factory [J]. *Water Science and Technology*, 2005, **52**(10-11): 517-524.
- [24] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by

- experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [25] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying granular systems; a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **74**(2): 178-186.
- [26] Zhang D C, Su H, Antwi P, *et al.* High-rate partial-nitritation and efficient nitrifying bacteria enrichment/out-selection via pH-DO controls: efficiency, kinetics, and microbial community dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 741-755.
- [27] 彭永臻, 孙洪伟, 杨庆. 短程硝化的生化机理及其动力学[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(5): 817-824.
- Peng Y Z, Sun H W, Yang Q. The biochemical reaction mechanism and kinetics of partial nitrification[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(5): 817-824.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019年11月19日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2018年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2018年度总被引频次11 644,影响因子2.130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)