

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能

周娅¹, 买文宁^{1*}, 梁家伟², 代吉华², 牛颖¹, 李伟利¹, 唐启²

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 450001; 2. 河南君和环保科技有限公司, 河南 450001)

摘要: 基于硫自养反硝化作用, 寻求一种经济、快速、高效地污水脱氮工艺, 采用硫磺/硫铁矿组合进行自养反硝化脱氮试验, 以低 C/N 市政污水为处理对象, 分别考察温度, 硫磺与硫铁矿体积比和 HRT 等理化因素对反应器脱氮性能的影响。结果表明, 在进水 TN 质量浓度约 40 mg·L⁻¹ 条件下, 1 号反应器最佳 HRT 为 2.5 h, TN 去除率平均稳定在 72.2%, 出水 TN 约 10.55 mg·L⁻¹; 2 号反应器最佳 HRT 为 3.5 h, TN 平均去除率约 67.8%, 出水 TN 平均稳定至 12.90 mg·L⁻¹; 3 号反应器最佳 HRT 为 3.5 h, TN 平均去除率 60.6%, 出水 TN 稳定在 15.00 mg·L⁻¹ 左右。硫磺/硫铁矿自养反硝化系统比硫铁矿自养反硝化系统启动快; 该系统脱氮效率随着硫磺与硫铁矿体积比减小而降低; 该系统脱氮性能对温度的变化并不敏感, 脱氮性能优于单独以硫铁矿为硫源的自养反硝化系统; 系统中硫自养反硝化过程的主要功能菌属是 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus*, 在 3 个反应器所占比例为 1 号 > 2 号 > 3 号。

关键词: 硫磺/硫铁矿; 自养反硝化; 脱氮; 低 C/N 市政污水; 高通量测序; 微生物菌群

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1885-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201806237

Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System

ZHOU Ya¹, MAI Wen-ning^{1*}, LIANG Jia-wei², DAI Ji-hua², NIU Ying¹, LI Wei-li¹, TANG Qi²

(1. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China; 2. Henan Junhe Environmental Protection Technology Co., Ltd., Henan 450001, China)

Abstract: In order to search for an economical, rapid, and highly efficient nitrogen removal process for sewage, a sulfur/pyrite packed column reactor was fed with low C/N municipal sewage. The effects of temperature, the sulfur-to-pyrite volume ratio, and hydraulic retention time (HRT) on nitrogen removal were studied. The results showed that with an influent total nitrogen (TN) of 40 mg·L⁻¹, the optimal HRT of the No. 1 reactor was 2.5 h, and the removal rate and effluent concentration of TN were stable at 72.2% and 10.55 mg·L⁻¹, respectively. The optimal HRT of the No. 2 reactor was 3.5 h, and the removal rate and effluent concentration of TN were stable at 67.8% and 12.90 mg·L⁻¹, respectively. The optimal HRT of the No. 3 reactor was 3.5 h, and the removal rate and effluent concentration of TN were stable at 60.6% and 15.00 mg·L⁻¹, respectively. The sulfur/pyrite autotrophic denitrification system starts faster than the pyrite autotrophic denitrification system. Its nitrogen removal rate decreased with decreasing sulfur-to-pyrite volume ratio. The nitrogen removal performance of the system is not sensitive to temperature, and the denitrification performance is better than that of the system with pyrite alone as the sulfur source. The main functional bacteria in the system are *Sulfurimonas* and *Thiobacillus*, and the proportion of the sum of these two bacteria in the three reactors decreased from No. 1 to No. 3.

Key words: sulfur/pyrite; autotrophic denitrification; nitrogen removal; low C/N municipal sewage; high throughput sequencing; microbial community

我国每年生活污水产生量高达几百亿 t, 如果处理不达标排入外界环境, 过量的营养元素 N 会破坏水生态环境, 甚至影响人体和动物健康^[1~3]。我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)规定 TN < 15 mg·L⁻¹ 才符合一级 A 排放标准。敏感水体如京津地区往往对入流水质要求比一级 A 排放标准更为严格^[4], 故控制外排污水中 TN 含量是目前环保领域的重要任务^[5]。

近年来, 硫自养反硝化作用因无需外加碳源, 节约成本, 无二次污染, 产生污泥量少等优点成为脱氮领域的热点^[6~9]。目前针对硫自养反硝化研究的电子供体主要是单质硫, 袁玉玲等^[10]、Kong 等^[11]、李天昕等^[12]和 Sahinkaya 等^[13]相继在实验室阶段利用硫磺自养反硝化系统处理含氮污水, 探讨了硫自养

反硝化反应机制以及 HRT、pH、温度等对脱氮效果的影响。但工程应用中大规模使用硫磺会增加成本, 应考虑更经济的含硫物质作为电子供体。

硫铁矿是地壳中含量丰富且主要以矿物加工厂废弃物形式存在的硫化矿物, 价格低廉^[14], 已有研究证明硫铁矿可以作为电子供体, 将 NO₃⁻ 还原为 N₂^[14~16]。但是硫铁矿密度远大于硫磺, 在污水中不易被微生物利用, 造成反应器启动慢且脱氮性能差^[17]。Torrentó 等^[18]向接种了 *T. denitrificans* 的硫

收稿日期: 2018-06-30; 修订日期: 2018-10-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07602-001-001)

作者简介: 周娅(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 1217180728@qq.com

* 通信作者, E-mail: 18569915907@163.com

铁矿自养反硝化反应柱中通入模拟地下水,污水中 $35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 经过 200 d 才得以完全被降解.李芳芳等^[19]分别使用硫磺和硫铁矿为电子供体,硫铁矿反硝化脱氮系统启动运行 65 d 后,TN去除率只达到 19.2% ,且启动后系统最优HRT为 4 d ,进水TN负荷为 $0.075\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.故在节约成本的基础上,探索出启动快,HRT短的硫自养反硝化工艺十分必要.

本试验针对现有硫自养反硝化工艺成本高、启动慢的问题,将硫磺和硫铁矿组合进行脱氮,并探究温度、硫磺与硫铁矿体积比和HRT等各参数对硫磺/硫铁矿自养反硝化系统的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置

硫磺/硫铁矿自养反硝化装置如图1所示,反应器材质为圆柱形有机玻璃,总高度 57 cm ,有效高度 55 cm ,内径 4 cm ,有效容积 690 mL ,填充区高度 40 cm ,填充体积约 500 mL .硫磺和硫铁矿的粒径均为 $2\sim 5\text{ mm}$.进水由配水桶经蠕动泵从反应器底部连续进入,出水由上端出水口排出.

本试验共设3组反应器,1号、2号、3号反应器填充的硫磺/硫铁矿体积比分别为 $1:4$ 、 $1:6$ 、 $1:8$;1、2、3号反应器孔隙率均 50% 左右.

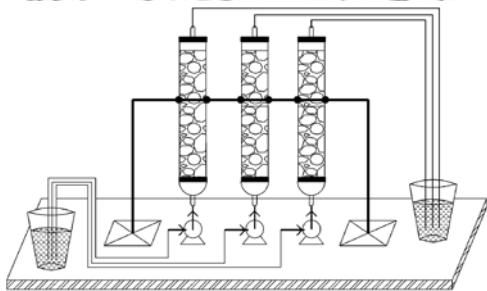


图1 硫自养反硝化试验装置示意
Fig. 1 Experimental device for the sulfur-based autotrophic denitrification process

1.2 试验用水

本试验用水取自郑州市某市政污水厂生化出水,水质指标见表1.

表1 郑州市某市政污水厂生化出水水质指标
Table 1 Biochemical effluent water quality indices of a municipal sewage plant in Zhengzhou

项目	数值	项目	数值
$\text{COD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$30\sim 45$	$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$35\sim 43.5$
$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$37\sim 44$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0\sim 4$
pH	$7.5\sim 8.1$	$\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	低于检出限

1.3 试验方法

本试验按照接种-挂膜顺序启动反应器,3个反

应器接种的污泥均采自郑州市某市政污水厂浓缩池的活性污泥,污泥浓度约 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,各接种污泥 100 mL .进水温度随季节天气变化,通过不断减少各个系统的HRT,即提高容积负荷,考察不同容积负荷下反应器的脱氮效率,以确定3个反应器所能达一级A排放标准的最短HRT和最大容积负荷.每间隔 24 h 取一次水样进行测定分析.

1.4 分析项目与测定方法

本试验分析需测定的指标及测定方法见表2.

表2 本试验过程中要检测的指标及测定方法
Table 2 Indicators and measurement methods to be utilized during the test

项目	测定方法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	纳氏试剂分光光度法(GB 7479-87)
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	紫外分光光度法(HJ/T 346-2007)
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	<i>N</i> -(1-萘基)-乙二胺分光光度法(GB 7493-87)
SO_4^{2-}	铬酸钡分光光度法(HJ/T 342-2007)
pH	便携式智能酸度计测定(GB 6920-86)

2 结果与讨论

2.1 启动阶段

本试验按照接种-挂膜常规顺序启动反应器.启动时,HRT 5 h ,进水TN浓度约 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.每天检测出水指标,如果连续 3 d 的TN去除率均达到 60% 以上,且填料表面覆盖一层棕黄色生物膜则认为反应器启动成功^[10].如图2所示,1号反应器在第 5 d 时,TN去除率就达到 67.5% ,并连续 3 d 稳定,即1号反应器能在 8 d 内迅速启动.2号反应器在第 12 、 13 、 14 d TN去除率均达到 60% 以上.3号反应器运行 16 d 后,TN去除率维持在 60% 以上.3个反应器启动时间不同,可能是由于硫磺密度较硫铁矿小,易被微生物利用.故在相同填充体积下,硫磺添加量越少,反应器启动越慢.

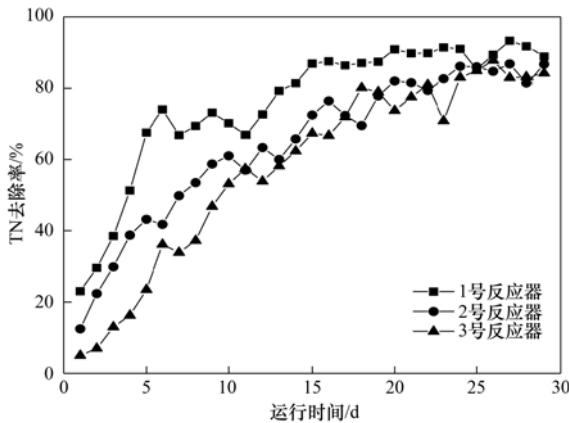


图2 反应器的启动阶段
Fig. 2 Start-up stage of the reactor

2.2 温度对脱氮性能的影响

反应器在室内持续运行 74 d ,水温随季节天气

变化. 污水生物处理的实质是微生物利用体内的酶进行生化反应从而降解水中污染物, 而低温条件下, 不适合微生物生长, 微生物代谢能力下降, 产酶减少, 进而降低污染物的降解速度. 为考察温度对脱氮性能的影响, 选取 1 号反应器, HRT 5 h, 结果如图 3 所示, 随着温度逐渐升高, 系统对 TN 的去除率大体也呈现逐渐增加的趋势, 当水温在 17℃ 左右时, 1 号反应器 TN 去除率可以稳定维持在 85% 以上. 但是由图 3 可知此脱氮系统对温度的变化并不敏感, 可能是由于反应器处在启动阶段, 内部体系不稳定; 也可能是由于启动时间在冬季, 低温条件下不适合微生物生长, 微生物代谢速度缓慢.

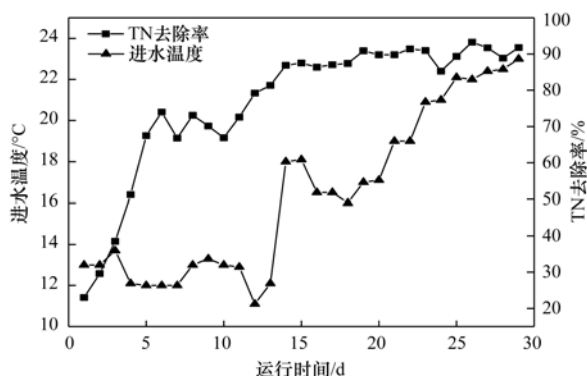


图 3 温度对反应器脱氮性能的影响

Fig. 3 Influence of temperature on the denitrification performance of the reactor

2.3 硫磺与硫铁矿体积比对脱氮性能的影响

由于微生物对硫磺和硫铁矿的利用程度不同, 1、2、3 号反应器的脱氮性能因硫磺与硫铁矿体积比产生了差异, 如图 4 所示. 1 号反应器不仅比 2 号、3 号反应器启动快, 而且对 TN 的去除率始终高于 2 号和 3 号反应器, 可能是由于硫磺添加量充足, 自养反硝化菌对硫单质利用率高于硫铁矿, 微生物活性高, 降解污染物能力强. 此外还可以发现 2 号和 3 号反应器的脱氮性能差别不大, HRT 为 2.5 h 时, 后期稳定阶段中 3 号反应器脱氮效率甚至高于 2 号反应器. 推测是因为在初始阶段, 这两个反应器里面的硫铁矿脱氮作用小, 主要依靠硫单质进行自养反硝化作用脱氮, 运行 50 d 后, 2 号和 3 号反应器填充的硫磺随着负荷提高被消耗损失一部分, 硫铁矿表面可能慢慢富集更多的自养反硝化菌, 硫铁矿自养反硝化作用增强.

2.4 HRT 对脱氮性能的影响

HRT 作为一项表征工艺运行的重要指标, 决定着工艺运行成本的高低^[20], 故在满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 排放标准前提下, 缩短 HRT 可节约一定的经济成本.

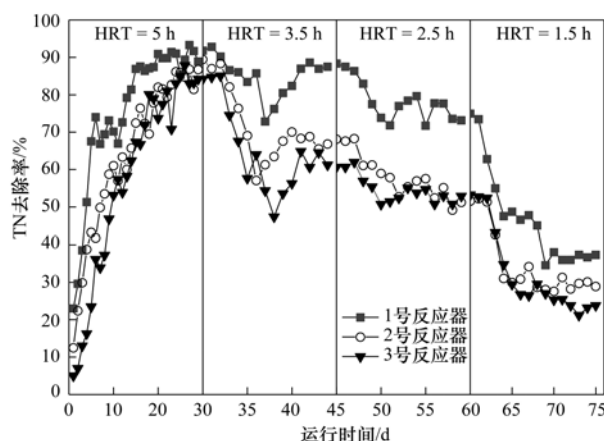


图 4 硫磺与硫铁矿的体积比对反应器脱氮性能的影响

Fig. 4 Effect of sulfur-to-pyrite volume ratio on the denitrification performance of reactor

由图 5 可知, 随着 HRT 缩短, 3 个反应器的脱氮效果变差. 将反应器按照 HRT 不同分为 4 个阶段讨论. 第一阶段, HRT 5 h, 运行 29 d, 1 号反应器的 TN 去除率平均维持在 91%; 2 号和 3 号反应器分别稳定在 84% 和 82% 左右. 出水 TN 平均稳定在 3、5.67 和 6.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- 未出现积累. 同时从图 5 中发现氨氮部分降解, 归因于细菌繁殖利用氨氮作为氮源, 也可能是由于进水中含有少量溶解氧, 部分氨氮发生硝化反应. 与其他试验结果相比 1 号反应器在第一阶段 TN 去除率偏低, 可能有两个原因: 第一, 是由于本试验运行时间在冬季, 酶活性不高, 微生物代谢污染物速度较慢, 且低温对硝酸盐还原酶的抑制作用大; 第二, 单质硫在水中的溶解度极低, 在 20℃ 下仅为 5 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 硫自养反硝化菌不能够充分利用硫单质^[21,22]. 第二阶段, 运行至 30 d 时, 将 HRT 调至 3.5 h, 进水 TN 负荷从 0.192 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 升至 0.274 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 运行 12 d 后, 1 号反应器的 TN 去除率从 91% 降至 87.7%, 出水 TN 升高至 4.98 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2 号反应器 TN 去除率降低至 67.8%, 出水 TN 平均稳定至 12.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 3 号反应器 TN 去除率降至 60.6%, 出水 TN 稳定在 15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 在第二阶段运行期间, 3 个反应器均出现了明显的 NO_2^- 积累, 1 号反应器可能是由于电子供体不足或者混合效果不好, 再加上较厚的生物膜影响了微生物和电子供体之间的传质^[23]; 2 号反应器是在第二阶段初期出现 NO_2^- 积累, 可能是在刚缩短 HRT 时, 微生物不能够完全适应环境, 造成反硝化效果差, 运行一段时间后, NO_2^- 积累现象消失; 3 号反应器出现 NO_2^- 积累可能是由于 HRT 比较短, NO_2^- 反硝化为 N_2 的时间不足, 以致于反硝化反应进行不完全^[17]. 第三阶段, 反应器运行至第 45 d 时, HRT 由 3.5 h 降至 2.5 h,

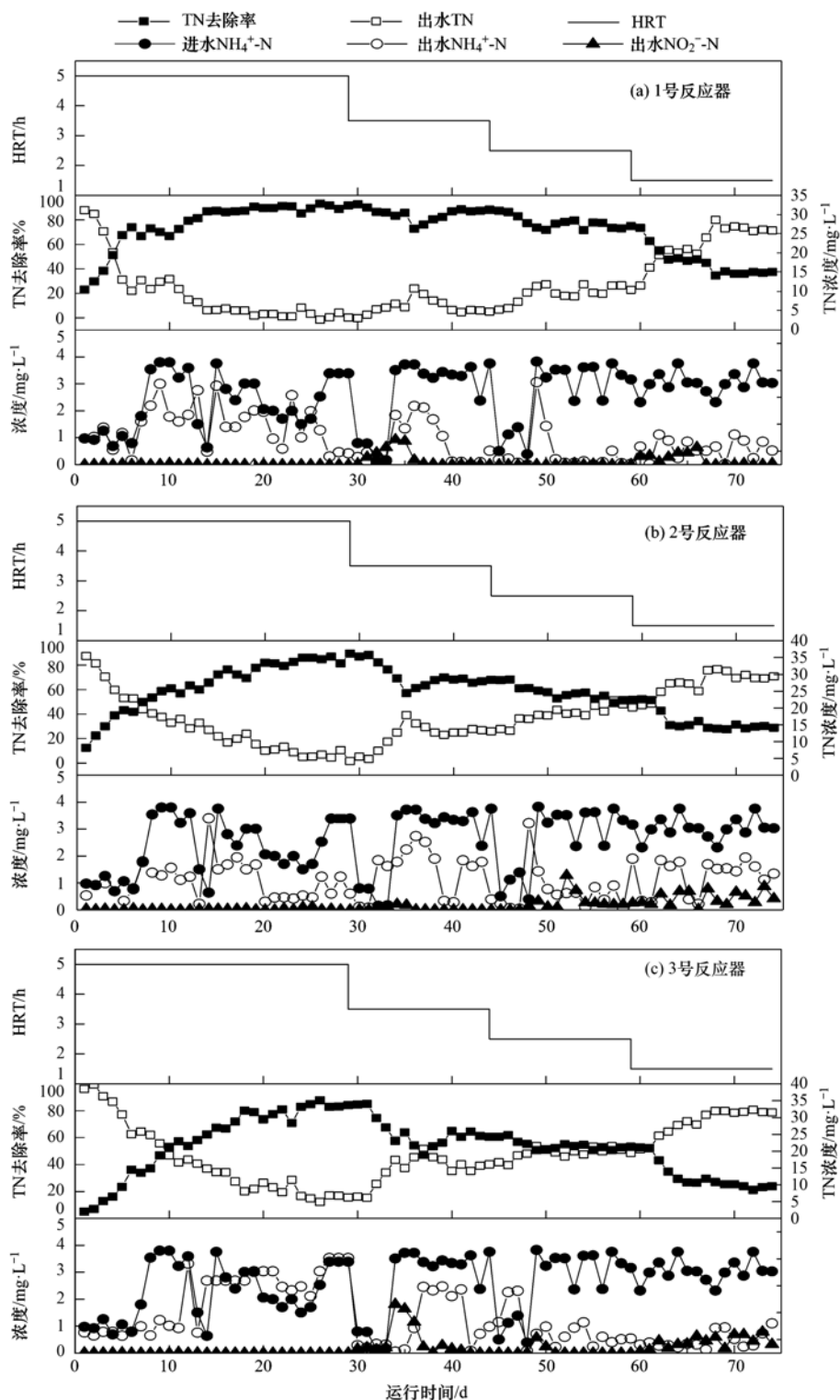


图5 HRT对1号、2号和3号反应器脱氮性能的影响

Fig. 5 Influence of HRT on the nitrogen removal performance of the No. 1, No. 2, and No. 3 reactors

进水 TN 负荷提升至 $0.384 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 1 号反应器运行至第 58 d 时, TN 去除率达到 73.6%, 并在接下来几天中趋于稳定, 出水 TN 由 $4.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $11.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2 号反应器 TN 去除率从 67.8% 降至 52%, 出水 TN 由 $12.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $20.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 脱氮性能下降较快, 可能是由于较高的容积负荷对反应器中微生物的冲刷效果明显, 一些没

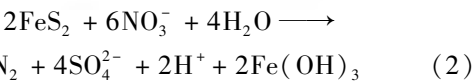
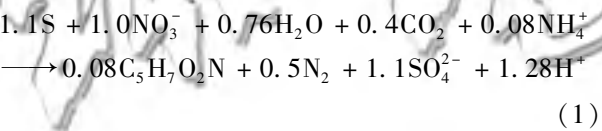
有附着在填料上的微生物随水流流出反应器, 造成系统中生物量减少, 影响了反硝化速率^[23]. 3 号反应器 TN 去除率稳定维持在 51.8%, TN 升高至 $20.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 可见, 2 号、3 号反应器出水水质已不能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 排放标准. 第四阶段, 反应器运行至第 60 d 时, 将 HRT 缩短至 1.5 h, 进水

TN 负荷从 $0.384\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 升高至 $0.640\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 1 号反应器脱氮性能变化极大, TN 去除率几乎降低一半, 平均稳定在 36.6%, 出水 TN 急剧升高至 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除了容积负荷对微生物的影响之外, 随着反硝化过程的进行, 硫磺和硫铁矿颗粒逐渐被消耗, 较细小的填料会因为负荷的升高而被水流带走, 进而影响反应器的脱氮性能^[24], 而且由于 HRT 太短, 系统中出现了 NO_2^- 积累.

综上所述, 本试验 1 号反应器最佳 HRT 为 2.5 h、最高进水负荷 $0.384\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 2 号、3 号反应器最佳 HRT 为 3.5 h、最高进水负荷 $0.274\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 但是 2 号反应器 TN 去除率高于 3 号反应器, 脱氮性能优于 3 号反应器.

2.5 SO_4^{2-} 生成量与 NO_3^- 去除量的关系

本试验在反应器 HRT 为 5、3.5 和 2.5 h 时, 分别选取运行稳定后 5 d 的数据来探讨 SO_4^{2-} 生成量与 NO_3^- 去除量的关系. SO_4^{2-} 生成量大小可以直观地反映出硫自养反硝化作用的强弱. 如图 6 所示, 各反应器内 SO_4^{2-} 生成量均随 HRT 的缩短而呈现出下降的趋势, 反硝化作用变差, 同时通过 SO_4^{2-} 生成量验证了 1 号反应器脱氮能力最强, 2 号和 3 号反硝化作用差异小, 2 号反应器脱氮性能稍优于 3 号反应器. 以硫磺和硫铁矿为硫源的自养反硝化化学计量式如下^[25]:



由公式(1)和(2)可以计算出, 理论上以硫磺为电子供体的自养反硝化每去除 1 g NO_3^- 会产生 7.54 g SO_4^{2-} , 以硫铁矿为电子供体的自养反硝化每去除 1 g NO_3^- 生成 4.57 g SO_4^{2-} . 本试验考察了 SO_4^{2-} 生成量与 NO_3^- 去除量的关系, 如图 7 所示. 各反应器的 SO_4^{2-} 生成量与其 NO_3^- 去除量均线性相关. 由图 7 中数据表明, 1、2、3 号反应器每去除

1 g NO_3^- 分别生成约 6.43、5.03、4.84 g 的 SO_4^{2-} , 均处于硫铁矿自养反硝化系统和硫磺自养反硝化系统之间.

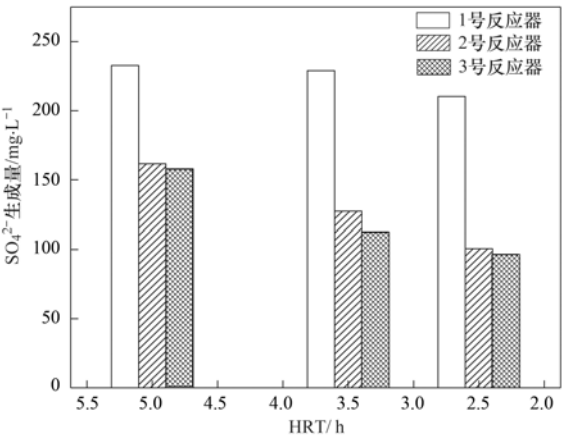


图 6 SO_4^{2-} 生成量与 HRT 的关系
Fig. 6 Relationship between the production of SO_4^{2-} and HRT

2.6 微生物菌群分析

通过提取 1、2 和 3 号反应器微生物样品的 DNA, 并扩增 16S rDNA 某个可变区, 采用高通量测序仪 HiSeq 对其进行测序.

2.6.1 菌群物种多样性分析

多样性指数是评价微生物群落丰度和均匀度的综合指标. 通常用 Chao1 指数表示群落丰度, 值越大, 群落丰度越大; Shannon 指数预测微生物分类多样性, 数值越大, 群落物种多样性越高. Simpson、Dominance 和 Equitability 指数是常用来评估均匀度的指标. 其中 Simpson 指数越小, 表明 OTUs 的丰度分部越均匀; Dominance 和 Equitability 指数值越小, 表明物种丰度分布呈现出越高的偏向. 表 3 显示, 2 号反应器虽微生物丰度比 1 号高, 但其物种多样性及分布均匀度都不及 1 号反应器, 3 号反应器微生物群落丰度和均匀度都相对较差, 可能是由于 3 号反应器硫磺添加量最少, 这使得 3 号反应器里面的反硝化菌群因得不到充足的基质导致生长受到抑制, 故脱氮性能相对较差.

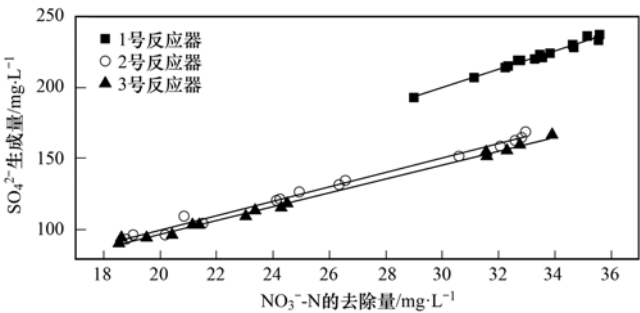


图 7 SO_4^{2-} 生成量与 NO_3^- -N 去除量的关系

反应器	1号	2号	3号
方程	$y = a + bx$	$y = a + bx$	$y = a + bx$
权重	不加权	不加权	不加权
截距	2.023 5	-3.087 62E-5	3.087 62E-5
斜率	2.023 5	2.023 5	2.023 5
残差平方和	31.254 8	83.389 75	46.607 78
P	0.991 47	0.995 75	0.997 79
$R^2(\text{COD})$	0.983 02	0.991 53	0.995 59
调整后 R^2	0.981 72	0.990 88	0.995 25

Fig. 7 Relation between the output of SO_4^{2-} and the removal of NO_3^- -N

表 3 样品的物种丰度和均匀度分析

Table 3 Species abundance and distribution of the samples

反应器	Chao1 指数	Shannon_2 指数	Simpson 指数	Dominance 指数	Equitability 指数
1 号	444.9	7.03	0.016 2	0.984	0.799
2 号	458.5	7.02	0.019 1	0.981	0.794
3 号	435.6	6.74	0.026	0.974	0.769

2.6.2 菌群结构组成分析

通过 HiSeq 高通量测序平台对 1、2 和 3 号反应器内的微生物进行分类学分析,作出属级分类水平菌群结构相对丰度图,如图 8 所示. 3 个样品的微生物主要类群(相对丰度大于 1%)有 *Sulfurimonas*、*Thiobacillus*、*Treponema*、*Longilinea*、*Latescibacteria* _ *genera* _ *incertae* _ *sedis*、*Nitrospira*、*Geobacter* 和 *Geothrix*. 其中与硫自养反硝化过程有关的主要功能

菌属是 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus*; *Sulfurimonas* (硫单孢菌属)是一种兼性厌氧的化能自养菌,可将硫、硫化物或氢为电子供体进行反硝化作用^[20]; *Thiobacillus* (硫杆菌属)为革兰氏阴性菌,又称硫氧化细菌,是目前被研究最多的用于 NO_3^- -N 还原的专性自养厌氧菌^[20]. 而 3 个反应器中微生物主要功能菌属所占比例为 1 号 > 2 号 > 3 号,进一步表明 3 个反应器脱氮效果为 1 号 > 2 号 > 3 号.

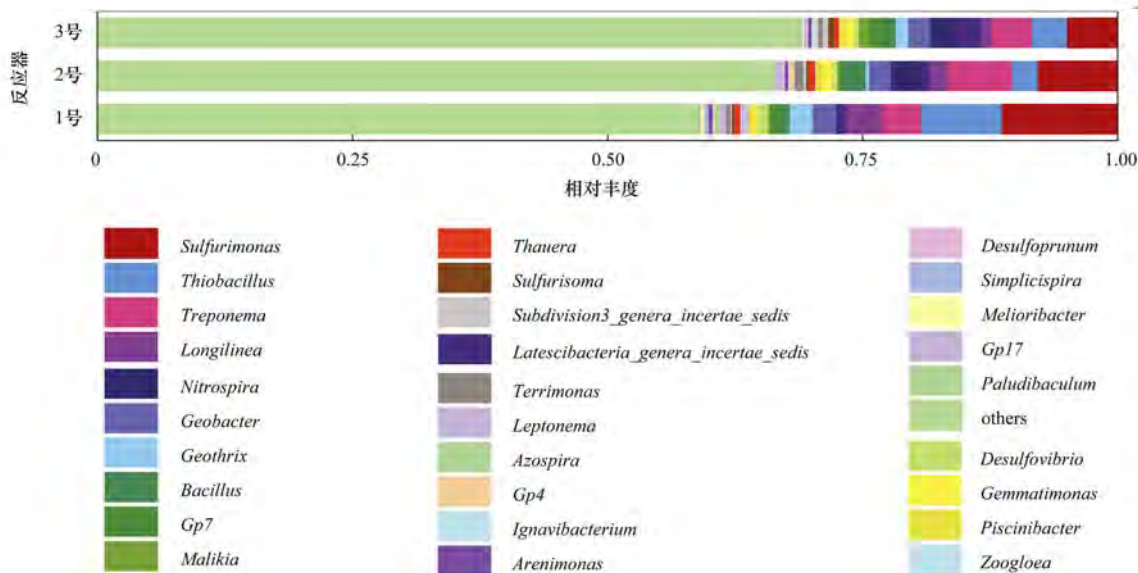


图 8 微生物在属级水平的相对丰度

Fig. 8 Relative abundance of species in the samples at the genera level

3 结论

(1) 硫磺-硫铁矿自养反硝化系统比硫铁矿自养反硝化系统启动快. 冬季室温 13℃ 左右, 1 号反应器 8 d 内能迅速启动, 2 号和 3 号反应器成功启动分别需要 14 d 和 16 d.

(2) 本次试验中, 自养反硝化系统受温度影响并不是很大.

(3) 1、2 和 3 号反应器 TN 去除率在同一 HRT 下依次下降, 同一反应器的脱氮性能随着 HRT 的缩短逐渐变差. 本试验 1、2 和 3 号反应器的最佳 HRT 分别为 2.5、3.5 和 3.5 h, 最高进水 TN 负荷分别达到 0.384、0.274 和 0.274 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(4) 3 个系统的 SO_4^{2-} 生成量均与 NO_3^- 去除量呈线性相关, SO_4^{2-} 生成量都低于硫磺自养反硝化系统.

(5) 高通量测序结果表明, 2 号反应器群落丰度比 1 号高, 但物种多样性及分布均匀度都劣于 1 号反应器, 3 号反应器微生物群落丰度和均匀度都相对较差. 硫自养反硝化过程的主要功能菌属是 *Sulfurimonas* 和 *Thiobacillus*, 而 3 个反应器中主要功能菌属所占比例为 1 号 > 2 号 > 3 号.

参考文献:

- [1] 付炳炳, 潘建新, 马景德, 等. 采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3262-3270.
Fu B B, Pan J X, Ma J D, et al. Evaluation of advanced nitrogen removal from coking wastewater using sulfide Iron-containing sludge as a denitrification electron donor [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3262-3270.
- [2] Ceconet D, Devecseri M, Callegari A, et al. Effects of process operating conditions on the autotrophic denitrification of nitrate-contaminated groundwater using bioelectrochemical systems[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613-614: 663-671.
- [3] 周健, 黄勇, 刘忻, 等. 硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮

- 条件控制研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1061-1069.
- Zhou J, Huang Y, Liu X, *et al.* Element sulfur autotrophic denitrification combined anaerobic ammonia oxidation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1061-1069.
- [4] 任争鸣, 刘雪洁, 苏晓磊, 等. 硫自养反硝化深度脱氮中试研究[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(19): 31-35.
- Ren Z M, Liu X J, Su X L, *et al.* Sulfur-based autotrophic denitrification process for advanced nitrogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2016, **32**(19): 31-35.
- [5] Kostrotyia A, Papirio S, Frunzo L, *et al.* Elemental sulfur-based autotrophic denitrification and denitrification; microbially catalyzed sulfur hydrolysis and nitrogen conversions [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **211**: 313-322.
- [6] Li R H, Morrison L, Collins G, *et al.* Simultaneous nitrate and phosphate removal from wastewater lacking organic matter through microbial oxidation of pyrrhotite coupled to nitrate reduction[J]. Water Research, 2016, **96**: 32-41.
- [7] Li H B, Zhou B H, Tian Z Y, *et al.* Efficient biological nitrogen removal by Johannesburg-Sulfur autotrophic denitrification from low COD/TN ratio municipal wastewater at low temperature[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(9): 5027-5035.
- [8] 袁莹, 周伟丽, 王晖, 等. 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1835-1844.
- Yuan Y, Zhou W L, Wang H, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1835-1844.
- [9] Sahinkaya E, Dursun N. Use of elemental sulfur and thiosulfate as electron sources for water denitrification[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2015, **38**(3): 531-541.
- [10] 袁玉玲, 李睿华. 硫磺/石灰石自养反硝化系统脱氮除磷性能研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2041-2046.
- Yuan Y L, Li R H. Performance of nitrogen and phosphorus removal of sulfur/limestone autotrophic denitrification system [J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 2041-2046.
- [11] Kong Z, Feng C P, Chen N, *et al.* A soil infiltration system incorporated with sulfur-utilizing autotrophic denitrification (SISSAD) for domestic wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2014, **159**: 272-279.
- [12] 李天昕, 邱诚翔, 徐昊, 等. 硫/石灰石自养反硝化处理低碳高氮城市污水的工艺[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(3): 1062-1066.
- Li T X, Qiu C X, Xu H, *et al.* Low carbon and high nitrogen concentration municipale wastewater treatment with sulfur/limestone autotrophic denitrification technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(3): 1062-1066.
- [13] Sahinkaya E, Yurtsever A, Aktaş Ö, *et al.* Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **268**: 180-186.
- [14] 张菁, 李睿华, 李杰, 等. 石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3445-3450.
- Zhang J, Li R H, Li J, *et al.* Limestone and pyrite-limestone constructed wetlands for treating river water [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3445-3450.
- [15] Yang Y, Chen T H, Morrison L, *et al.* Nanostructured pyrrhotite supports autotrophic denitrification for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from secondary effluents [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, **328**: 511-518.
- [16] Tong S, Rodriguez-Gonzalez L C, Feng C P, *et al.* Comparison of particulate pyrite autotrophic denitrification (PPAD) and sulfur oxidizing denitrification (SOD) for treatment of nitrified wastewater [J]. Water Science & Technology, 2017, **75**(1-2): 239-246.
- [17] 蒲骄阳. 硫铁矿自养反硝化去除地下水中硝酸盐的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [18] Torrentó C, Cama J, Urmeneta J, *et al.* Denitrification of groundwater with pyrite and *Thiobacillus denitrificans* [J]. Chemical Geology, 2010, **278**(1-2): 80-91.
- [19] 李芳芳, 施春红, 周北海, 等. 硫磺和黄铁矿为填料的生物滤池自养反硝化强化处理二沉尾水[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1693-1700.
- Li F F, Shi C H, Zhou B H, *et al.* Enhanced treatment of secondary effluent via autotrophic denitrification biofilter process using sulfur and pyrite as fillings [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(11): 1693-1700.
- [20] 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 等. 新型硫磺复合填料强化再生水深度脱氮除磷[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4309-4315.
- Zhou Y Q, Hao R X, Liu S Y, *et al.* Improving nitrogen and phosphorus removal from reclaimed water using a novel Sulfur/Iron composite filler [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4309-4315.
- [21] 姚鹏程, 袁怡, 龙震宇, 等. 新型单质硫自养生物膜反应器脱氮性能研究[J]. 现代化工, 2018, **38**(5): 181-186.
- Yao P C, Yuan Y, Long Z Y, *et al.* Study on denitrification performance of a new elemental sulfur autotrophic biofilm reactor [J]. Modern Chemical Industry, 2018, **38**(5): 181-186.
- [22] Steudel R, Holdt G. Solubilization of elemental sulfur in water by cationic and anionic surfactants [J]. Angewandte Chemie International Edition, 1988, **27**(10): 1358-1359.
- [23] 刘续, 周伟丽, 董晓静, 等. 水力负荷对微污染水自养反硝化的影响[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(5): 45-49.
- Liu X, Zhou W L, Dong X J, *et al.* Influence of hydraulic loading on sulfur-based autotrophic denitrification of micro-polluted water [J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(5): 45-49.
- [24] 马航, 朱强, 朱亮, 等. 单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2235-2242.
- Ma H, Zhu Q, Zhu L, *et al.* Effect of element sulfur particle size and type of the reactor on start-up of sulfur-based autotrophic denitrification reactor [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2235-2242.
- [25] Pu J Y, Feng C P, Liu Y, *et al.* Pyrite-based autotrophic denitrification for remediation of nitrate contaminated groundwater [J]. Bioresource Technology, 2014, **173**: 117-123.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)