

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.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验

张杰^{1,2}, 王玉颖¹, 李冬^{1*}, 刘志诚¹, 曹思雨¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 选用 SBR 反应器 R1 和 R2 接种污水处理厂活性污泥, 以生活污水为进水, 分别采用一次进水-曝气策略和多次进水-曝气策略运行, 对运行过程中粒径变化及处理效果进行研究。实验表明, 运行 56 和 39 d 后 R1 和 R2 成功实现污泥颗粒化; 稳定运行后 R1 和 R2 中出水 COD、TN 和 TP 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别为 29.7、13.7、0.31 和 19.2、8.1、0.37, 去除率分别为 87.7%、75.6%、95.1% 和 90.1%、85.6%、94.2%, 其中颗粒平均粒径达到 740 μm 和 791 μm 。结果表明, 相同运行时间下, R2 中的出水 NO_3^- -N 浓度和出水 TP 浓度低于 R1。运行后期, R1 和 R2 中 DPAO 占全部 PAOs 的比值由最初 11.17% 分别增至 25.47% 和 34.08%。与一次进水-曝气策略相比, 采用多次进水-曝气策略运行在启动初期系统内 NO_3^- -N 浓度较低, PAOs 受到的冲击更小, DPAO 富集情况更好, 除磷性能更好, 利于 AGS 的形成。

关键词: 好氧颗粒污泥 (AGS); 一次进水-曝气运行; 多次进水-曝气运行; 生活污水; 脱氮除磷

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1409-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909217

Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy

ZHANG Jie^{1,2}, WANG Yu-ying¹, LI Dong^{1*}, LIU Zhi-cheng¹, CAO Si-yu¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: SBR reactors R1 and R2 were used to inoculate activated sludge from a sewage treatment plant, and domestic sewage was used as the influent. The operation was carried out using a single and multiple influent-aeration operation strategy, respectively, and the particle size change and removal effect during the operation was studied. The results show that R1 and R2 successfully achieved sludge granulation after 56 days and 39 days of operation, respectively. The concentrations ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorus (TP) in the effluent of R1 and R2 after stable operation were 29.7, 13.7, 0.31, 19.2, 8.1, and 0.37, respectively. The removal rates were respectively 87.7%, 75.6%, 95.1%, and 90.1%, 85.6%, and 94.2%, and the average particle size of the particles reached 740 μm for R1 and 791 μm for R2. The results showed that for the same running time, the effluent NO_3^- -N concentration and TP concentration in R2 were lower than those in R1. In the later stage of operation, the ratio of denitrifying phosphorus-accumulating organisms (DPAO) to total phosphorus-accumulating organisms (PAOs) in R1 and R2 increased from an initial 11.17% to 25.47% and 34.08%, respectively. Compared with the one influent-aeration operation strategy, the multiple influent-aeration operation strategy had a lower concentration of NO_3^- -N in the initial stage of the startup, the PAOs received less impact, the DPAO enrichment was better, the phosphorus removal performance was better, and it helped to form aerobic granular sludge.

Key words: aerobic granular sludge (AGS); one influent-aeration operation strategy; multiple influent-aeration operation strategy; domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal

水体富营养化近年来在世界各地频繁发生, 导致大量水域出现水质恶化现象, 严重影响了居民健康及生态环境, 受到水环境领域研究人员的重视。水中氮和磷等营养元素含量较高是造成水体富营养化现象的关键原因, 因此去除污水中的氮素和磷源已经成为污水处理领域的重要任务。目前污水处理厂大多采用活性污泥法对污水进行处理, 因其具有处理效果好和能耗较低等优点得到广泛应用, 但在运行过程中发现普通活性污泥存在沉降性能较差和易发生污泥膨胀等问题。好氧颗粒污泥 (aerobic granular sludge, AGS) 是一种颗粒状活性污泥, 内部存在层状空间结构^[1], 单个颗粒能提供微生物所需

的好氧/缺氧/厌氧环境, 可以同时硝化、反硝化和除磷过程^[2,3], 具有沉降性能好^[4]和抗冲击负荷能力强^[5]等优点, 可以极大地降低运行成本, 在废水处理领域受到了极大的关注。荷兰、意大利和克罗地亚等国已将 AGS 工艺成功用于实际工程^[6,7], 并且运行效果良好。

研究人员通常采用一次进水-曝气策略, 通过在

收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2019-10-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07601-001)

作者简介: 张杰 (1938 ~), 男, 院士, 博士生导师, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: 6282031@163.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

周期内形成厌氧/好氧(A/O)的运行环境来培养颗粒污泥^[8-10],这样做的原因是聚磷菌(phosphate accumulating organisms, PAOs)的生长需要先在厌氧条件下吸收挥发性脂肪酸,将其转化为聚羟基链烷酸酯(poly-hydroxyalkanoates, PHA)并贮存在体内,再在好氧条件下氧化分解 PHA,用于充分吸收水中的磷酸盐^[11],以达到除磷的目的.但作者在采用一次进水-曝气策略下驯化絮状污泥以启动 AGS 工艺时,发现运行初期絮状污泥在好氧条件下无法形成反硝化所需的厌氧环境,反应器内会存在大量NO₃⁻-N,对 PAOs 厌氧释磷产生影响^[12-15].然而释磷过程是保证 PAOs 良好除磷性能的前提,且有研究表明,PAOs 释磷时会形成大量带正电的微粒^[16,17],能吸附带负电的细胞体,可以作为颗粒污泥的晶核;PAOs 除磷过程还会产生磷酸盐沉淀^[18,19],可作为细胞附着的内核,成为颗粒生长的“起点”^[20],两者均能够促进颗粒污泥的形成,对生活污水中快速颗粒化的实现具有重要作用.因此,笔者提出多次进水-曝气策略,在周期内进行多组进水、非曝气和曝气的组合,通过实现多次硝化反硝化,以降低系统中NO₃⁻-N浓度,减轻NO₃⁻-N对 PAOs 的抑制,提高除磷效果,以便在颗粒化初期利用除磷过程中产生的正电微粒和磷酸盐沉淀,促进颗粒污泥的形成,缩短污泥颗粒化过程所需

的时间.

基于此,本研究选用两组 SBR 反应器(R1 和 R2)培养 AGS,R1 以一次进水-曝气策略运行,R2 以多次进水-曝气策略运行,通过研究污泥形态、粒径变化、EPS 和去除性能等参数,对比探究一次/多次进水-曝气策略对生活污水 AGS 工艺启动和运行的影响,以期为实际工程提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方式

本实验采用两组有机玻璃制成的 SBR 反应器(R1 和 R2),有效容积 12 L,换水比为 50%,通过转子流量计控制曝气量为 1.0 L·min⁻¹,用 PLC 控制进水、搅拌、曝气和出水.反应器每天运行 4 个周期,每周期 6 h,其中通过蠕动泵在相同转速下,以底部进水的方式进水 12 min,以保证两个反应器周期内进水量相同,厌氧反应 90 min,好氧反应 240 min,沉淀时间从 15 min 逐渐缩短为 3 min,出水和闲置共计 15 min.周期内运行参数如表 1 所示.

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥为北京市某污水处理厂二沉池回流污泥,R1 和 R2 初始 MLSS 分别为 3 539 mg·L⁻¹和 3 624 mg·L⁻¹.实验用水取自某小区化粪池的生活污水,具体水质指标如表 2 所示.

表 1 反应器运行参数/min

Table 1 Operating parameters of reactors/min

项目	进水	厌氧	好氧	进水	缺氧	好氧	进水	缺氧	好氧	出水、闲置
R1	12	90	240	—	—	—	—	—	—	15
R2	4	30	80	4	30	80	4	30	80	15

表 2 生活污水水质

Table 2 Water quality of domestic sewage

项目	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	pH
范围	40~70	35~60	<0.5	<2	130~300	<7	7.2~8.1

1.3 分析项目及方法

NH₄⁺-N采用纳氏试剂光度法测定;NO₂⁻-N采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定;NO₃⁻-N采用紫外分光光度法测定;MLSS 采用标准重量法测定;TN 采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;COD 和总磷的测定采用 5B-3B COD 多参数快速测定仪;污泥中 EPS 的提取采用热提取法^[21],PN 测定采用考马斯亮蓝法,PS 测定采用苯酚硫酸法;颗粒粒径测定采用 Mastersize 2000 型激光粒度分析仪,颗粒形态观察使用体式显微镜.

1.4 烧杯实验

本实验过程中定期考察污泥中反硝化聚磷菌(denitrifying poly-phosphorus accumulating organism, DPAO)的富集情况.测试方法如下:从反应器中取出 5 L 泥水混合物于烧杯,污泥清洗后去除上清液,加入水和丙酸钠后,恢复混合液体积至 5 L,使 COD 浓度为 300 mg·L⁻¹,厌氧搅拌 180 min.静置后倒弃上清液,加入水和磷酸二氢钾,恢复体积至 5 L,使 TP 浓度为 6 mg·L⁻¹,再平均分两份,对一份进行曝气,使其好氧反应,发生好氧吸磷;另一份加入硝酸

钾,使硝酸盐浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进行缺氧吸磷. 实验过程中定时取样测缺氧和好氧反应阶段的 TP 浓度.

2 结果与讨论

2.1 一次/多次进水-曝气策略对 AGS 形成及沉降性能的影响

图 1 所示为实验期间 R1 和 R2 内污泥粒径变化. R1 和 R2 接种污水处理厂絮状污泥,平均粒径为 $70 \mu\text{m}$,如图 2(a)所示. 随着反应器运行,R1 和 R2 分别在第 19 d 和第 11 d 出现细小颗粒. 经 56 和 39 d 后,R1 和 R2 的平均粒径达到 $340 \mu\text{m}$,认为 R1 和 R2 中实现污泥颗粒化^[22],成功启动 AGS 工艺. 培养 105 d 后,R1 和 R2 内颗粒稳定,平均粒径达到 $740 \mu\text{m}$ 和 $791 \mu\text{m}$,颗粒形态如图 2(b)和 2(c)所示,与 R1 相比,R2 中颗粒大小相近,形态更加圆润,结构密实. 由于 R2 采用多次进水-曝气策略,能在周期内多次为反硝化菌提供碳源,并在进水后进入厌氧段,为絮状污泥提供反硝化所需的厌氧环境,以便反硝化菌脱氮. 与 R1 采用的一次进水-曝气策略相比,多次进水-曝气策略降低了启动期间的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,减轻 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对 PAO 释磷的抑制,提高了除磷效果. 有研究表明,生物除磷过程中会形成磷酸盐沉淀^[18,19]和带正电的微粒^[16,17],可作为细胞附着的内核,成为颗粒生长的“起点”^[20]. 由此分析,启动期间 R2 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低于 R1,除磷效果更好,易产生磷酸盐沉淀和带正电的微粒,正电微粒能吸附带负电的细胞体,可作为颗粒污泥的晶核;磷酸盐沉淀可作为细胞附着的内核,与絮状污泥通过 EPS 黏附结合,形成聚集体,两者都可以促进颗粒污泥形成,故与 R1 相比,R2 的污泥颗粒化时间较短.

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是微生物在生理活动中分泌的胞外黏性物质,主要由蛋白质(PN)和多糖(PS)组成^[23]. 有研究发现 EPS 通过减少细胞表面的负电荷^[24],将两个相邻的细胞进行物理连接^[25],对 AGS 的形成和稳定性

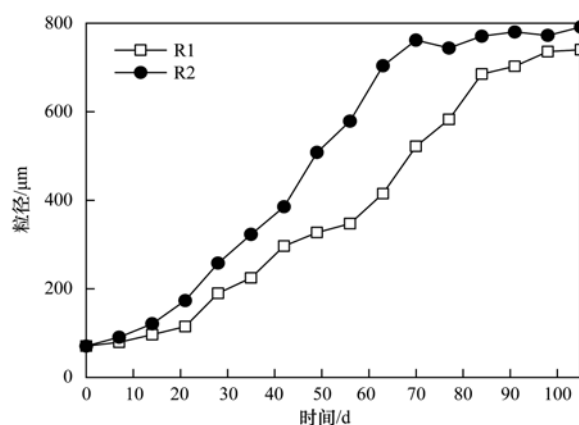


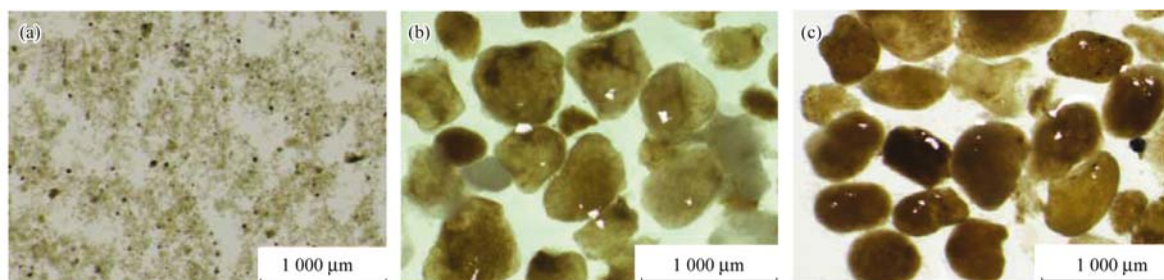
图 1 运行期间 R1 和 R2 反应器中颗粒平均粒径变化

Fig. 1 Variation of particle size during the operation in R1 and R2

有重要意义,为此本研究研究了运行期间 PN、PS 和 PN/PS 的变化规律,结果如图 3 所示.

在启动阶段(0~56 d 和 0~39 d),R1 和 R2 中的 PN、PS 和 PN/PS 呈上升趋势,PN 从接种初期的 $3.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加至 $7.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $9.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,PS 由 $7.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增至 $7.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $8.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,PN/PS 由 0.43 增至 1.04 和 1.14. 颗粒形成后(57~105 d 和 40~105 d),PN 和 PS 含量与 PN/PS 值基本稳定,表明 R1 和 R2 系统运行稳定. 实验表明在颗粒化阶段,相较于 PS 含量变化,PN 含量大量增加,表明 PN 在颗粒化过程中可能起主要作用,这与 Su 等^[26]的研究结果一致,分析原因为 PN 具有大量带负电荷的氨基酸^[27],PN 含量的增加不仅可以降低细菌细胞的表面负电荷,减少细胞之间的静电排斥^[28],促进细胞与细胞的相互作用,并通过吸附有机和无机材料形成了交联网络^[29],从而促成颗粒的形成. 结果表明(图 3),在相同运行时间下,与 R1 相比,R2 中微生物分泌的 PN 和 PS 更多,PN/PS 处于较高水平,多次进水-曝气策略更利于污泥聚集,从而提高了颗粒的沉降性能,促进颗粒污泥的形成.

由于启动 AGS 工艺采用了逐渐缩短沉降时间的方式,会淘洗出部分沉降性能差的污泥,因此本研究还研究了实验期间 MLSS 和 SVI 的变化趋势,结



(a)为接种污泥;(b)和(c)为第 105 d 时 R1 和 R2 中的污泥

图 2 污泥显微镜照片

Fig. 2 Microscopy images of sludges

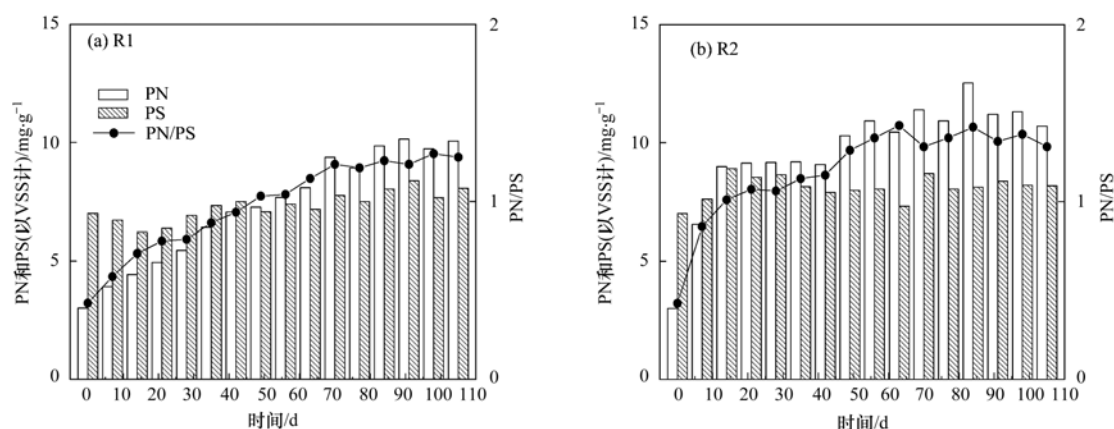


图3 运行期间 R1 和 R2 的 EPS 和 PN/PS 变化

Fig. 3 Variations of EPS and PN/PS during operation in R1 and R2

果如图4所示,接种污泥的SVI值为 $60.13 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, R1 和 R2 中接种的污泥浓度为 $3539 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3624 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于启动阶段 R1 和 R2 的沉降时间是逐渐缩短的,排出沉降速度慢的污泥,保留了沉降性能好的污泥. SVI 数值能够反映污泥的沉降性能,SVI 值较低代表污泥的沉降性能较好^[30],因此在启动阶段 R1 和 R2 的 MLSS 和 SVI 均呈现下降的趋势. R1 和 R2 中在第 19 d 和第 11 d 出现细小颗粒,这些颗粒会将系统中絮状污泥黏附在自身表面,将絮状污泥持留下来^[31],对 AGS 的形成具有重要作用. 由于相

同运行时间下 R2 中颗粒粒径大于 R1,颗粒更致密,所以 R2 污泥沉降性能优于 R1,故在第 19 d 缩短沉降时间时, R1 比 R2 中流失了更多的污泥. 此后, MLSS 不再下降,系统内颗粒结构逐渐完整,粒径不断变大,沉降性能得到改善,SVI 值逐渐降低,MLSS 开始有所上升. 由于 R2 采用多次进水-曝气策略运行,刺激系统内微生物产生了较多的 PN,改善了颗粒的沉降性能,因此在相同运行时间下, R2 的 SVI 值是低于 R1 的,表明相较于一次进水-曝气策略,多次进水-曝气策略运行下形成的颗粒沉降性能更强.

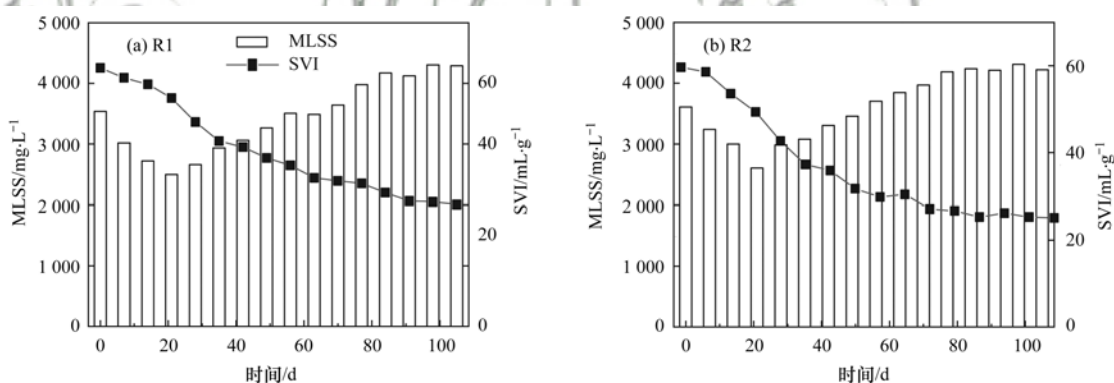


图4 R1 和 R2 运行期间 MLSS 和 SVI 的变化

Fig. 4 Variation of MLSS and settling performance during the operation

2.2 一次/多次进水-曝气策略对系统污染物处理性能的影响

2.2.1 R1 和 R2 的 COD 和 TP 去除性能

图5和图6分别表示了运行期间 R1 和 R2 的进、出水 COD、TP 浓度及去除率的变化情况. 接种初期, R1 和 R2 对 COD 和 TP 去除率较低,出水浓度较高,经一段时间的适应和驯化,功能菌对有机物的利用能力得到恢复,对环境逐渐适应,出水 COD 和 TP 浓度逐渐降低. 由于 R1 和 R2 分别在第 19 d 和第 11 d 出现细小颗粒,为快速获得成熟的 AGS,于是第 19 d 时缩短沉降时间至 3 min. R1 和 R2 中含

有较多的絮状污泥,所以缩短沉降时间后,排出较多沉降性能不佳的絮状污泥,其中可能含有大量富磷污泥,但是 R1 和 R2 排出的富磷污泥中含有较多 PAOs,所以 R1 和 R2 的 TP 去除率出现了先增加后下降的趋势,且观察到 R1 和 R2 分别经历了 33 d 和 17 d 出水 TP 浓度降至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,表明 R1 中除磷性能恢复的时间比 R2 长,一是因为 R1 比 R2 排出含有 PAO 的絮状污泥多, R1 中 PAOs 富集所需的时间比 R2 长,二是因为这一阶段 R1 和 R2 中污泥粒径较小,曝气时氧气的传递性较好,单个颗粒内部厌氧区可能很小,同步硝化反硝化 (simultaneous

nitrification-denitrification, SND)能力还不完善,因此 R1 中好氧硝化形成的 NO_3^- -N无法在好氧条件下被反硝化去除掉,而 R2 中采用多次进水-曝气的运行策略,在周期内可以提供多次厌氧和好氧环境,实现多次实现硝化反硝化,降低了 NO_3^- -N浓度,因此推测 R1 中 NO_3^- -N浓度对 PAO 的抑制程度是大于 R2 的,这一阶段实验结果表明,与一次进水-曝气的运行策略相比,多次进水-曝气策略运行下 PAO 受到 NO_3^- -N的冲击更小,除磷性能更好,可在颗粒化初期实现较低的出水 TP 浓度。

R1 和 R2 中 AGS 启动后,与运行初期相比,颗粒粒径增大,颗粒内部的层状空间结构逐渐完整,能够实现 SND,因此 R1 内后续的好氧环境下硝化形成的 NO_3^- -N可通过 SND 被去除, NO_3^- -N浓度有所降低,一定程度上减轻了 NO_3^- -N对 PAOs 的抑制程度.除此之外,AGS 的层状空间结构也对 PAOs 也起到了一定的缓冲保护作用,因此颗粒化后 R1 和 R2 的出水 COD 和 TP 浓度能够稳定保持在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,处理效果稳定,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的一级 A 标准。

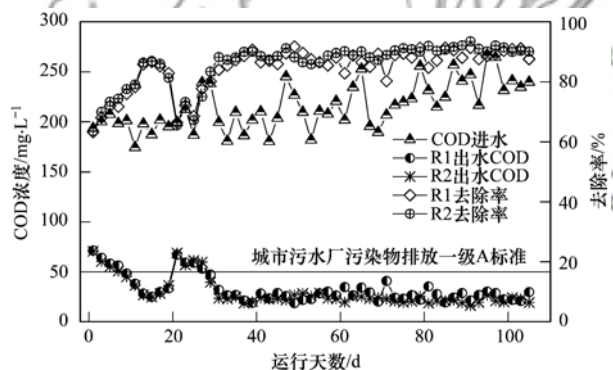


图5 运行过程中 COD 浓度变化

Fig. 5 Variation of COD concentration during the operation

2.2.2 R1 和 R2 的脱氮性能

运行期间,R1 和 R2 的 TN 去除率整体呈现上

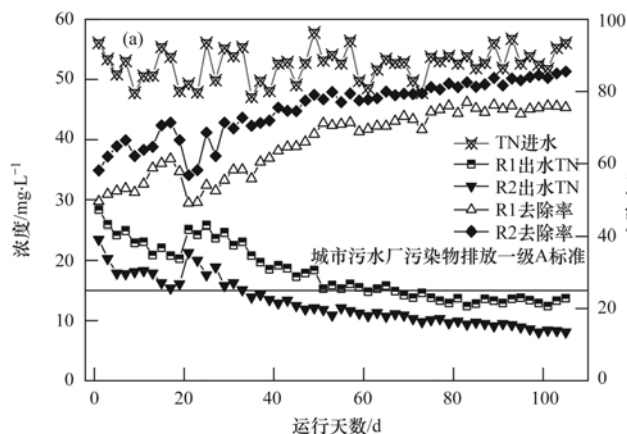


图7 运行期间氮去除效果变化

Fig. 7 Variation of nitrogen removal efficiency during the operation

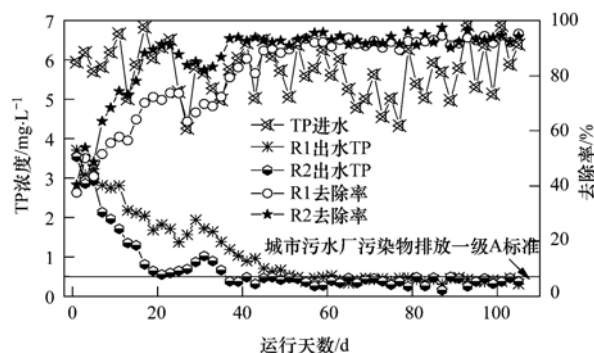
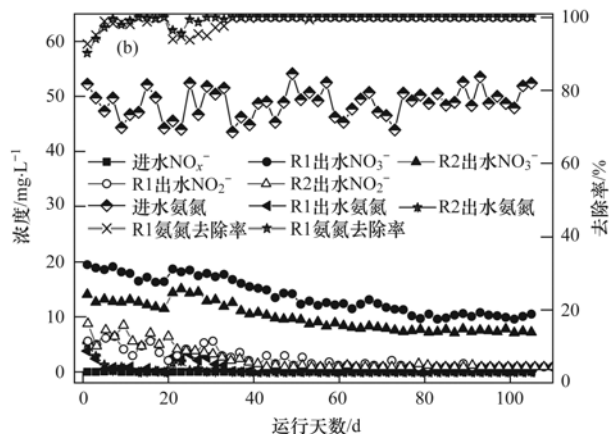


图6 运行过程中 TP 浓度变化

Fig. 6 Variation of TP concentration during the operation

升趋势,且 R2 的 TN 去除率大于 R1. 对比图 7 可知,出水 TN 中含有大量 NO_3^- -N成分,反硝化脱去 NO_3^- -N的程度对获得较低的出水 TN 浓度具有重要意义.启动阶段(0~56 d 和 0~39 d),R1 和 R2 接种污水处理厂回流污泥,反应器初期以絮状污泥为主. R1 以一次进水-曝气的策略运行时,运行初期絮状污泥在好氧条件下不能提供反硝化所需的厌氧环境,因此 R1 出水中含有大量 NO_3^- -N, TN 去除率较低; R2 以多次进水-曝气策略运行时,周期内会进行 3 组厌氧环境和好氧环境的交替运行,通过多次硝化和反硝化作用,有效降低了反应器内 NO_3^- -N含量,所以接种初期 R1 的出水 NO_3^- -N浓度比 R2 高.第 19 d 缩短沉降时间,R1 比 R2 中流失了更多的污泥,这些污泥中含有大量硝化细菌和反硝化细菌,因此 R1 和 R2 的脱氮性能均出现一定程度的下降.大部分硝化细菌属于自养菌,世代时间较长^[32],故 R1 中脱氮性能恢复时间比 R2 长。

AGS 工艺启动后(57~105 d 和 40~105 d),颗粒粒径增大,好氧条件下由于氧气传递受限,单个颗粒污泥内部具有厌氧区和缺氧区,具备 SND 能力.由于 DO 在 AGS 内具有一定的传质深度^[33,34],因此与粒径较小的 AGS 相比,粒径较大的 AGS 内部缺



氧反应区大^[35],反硝化效率更高,利于实现 SND. 由于 R2 中颗粒污泥的粒径大于 R1,故 R2 脱氮效率高于 R1,所以 AGS 工艺启动后 R1 的出水 NO_3^- -N 浓度比 R2 中的高,R2 出水 TN 浓度满足规范要求的时间也比 R1 提前. AGS 工艺稳定运行后,R1 和 R2 中出水 TN 浓度平均为 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均低于我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的一级 A 标准 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2.3 一次/多次进水-曝气策略对 DPAO 富集程度的影响

DPAO 以 NO_3^- -N 为电子受体过量吸磷,在除磷的同时,达到反硝化脱氮的目的,可以缓解异养菌对碳源的竞争,实现“一碳两用”,节省了能源^[36,37]. 由于 DPAO 在厌氧和缺氧条件下进行生理活动,笔者推测 DPAO 是否会在颗粒内部缺氧区富集. 文献[38]认为缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率之比代表了 DPAO 占全部 PAOs 的比值,能反映系统中 DPAO 增殖情况,因此笔者在运行期间每隔 20 d,通过烧杯实验的方法,测得缺氧和好氧条件下磷酸盐浓度变化,并计算了缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率之比.

如图 8 所示,种泥中 DPAO 占全部 PAOs 的质量分数为 11.17%,经过 100 d 的运行,R1 和 R2 中 DPAO 增殖至 22.47% 和 34.08%,可知两种方式运

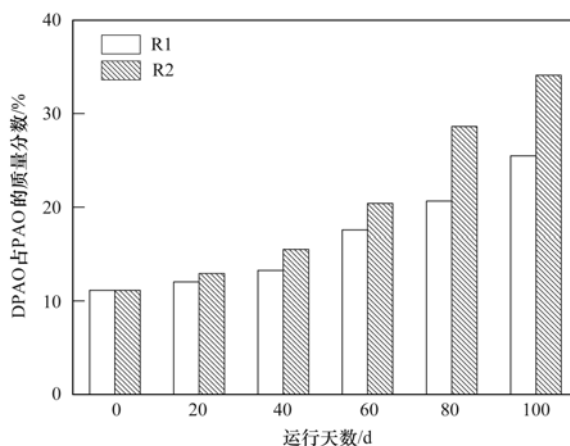


图 8 运行期间 DPAO 富集程度变化

Fig. 8 Variation of DPAO richness during the operation

行下均能富集 DPAO,且 R2 中 DPAO 富集的情况比 R1 好,分析原因为 R1 采用一次进水-曝气的策略运行时,周期内前期厌氧段内系统中底物充足,后期好氧段内基质浓度较低,硝化细菌将 NH_4^+ -N 氧化后,微生物耗氧量下降,因此在较长的好氧段中 DO 会大量上升,氧气通过 AGS 表面孔隙进入颗粒内部,减小了颗粒内部缺氧区和厌氧区体积,影响了 DPAO 的生存空间;而 R2 采用多次进水-曝气的运行策略,周期中不会存在较长时间的连续曝气,并且周期内多次提供基质,与 R1 相比,R2 的运行策略

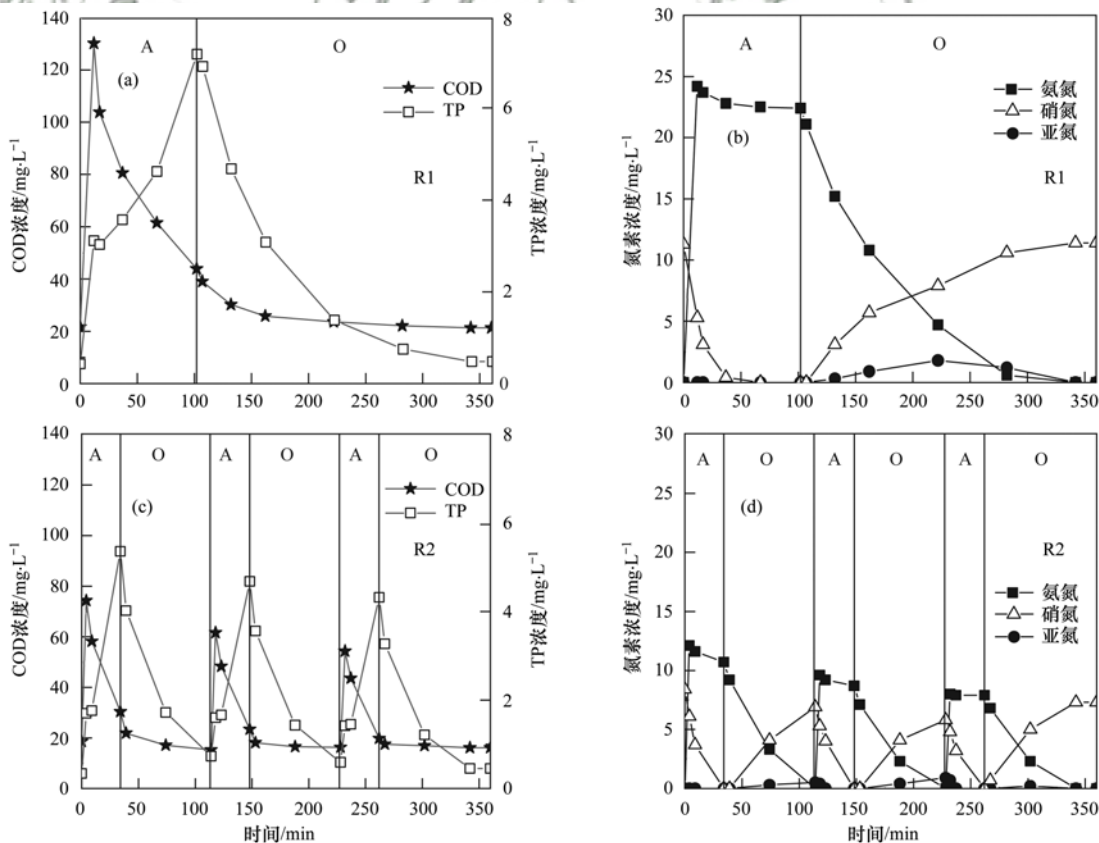


图 9 第 91 d R1 和 R2 周期内污染物浓度变化

Fig. 9 Variations of concentrations of pollutants in R1 and R2 on 91st day

能够提高微生物活性,增加对氧气的消耗量,对反应器中 DO 起到一定的控制作用,确保了好氧条件下颗粒内部缺氧区和厌氧区的分布,这与 Bassin 等^[39]的研究结果一致,其发现较低 DO 浓度可以保证好氧环境中 AGS 内部的缺氧区和厌氧区体积,促进了 DPAO 增殖。与 R1 相比,R2 运行时反应器中 DO 相对较低,颗粒内部为 DPAO 提供适宜的厌氧和缺氧生存环境,有利于 DPAO 富集。

2.4 稳定运行时典型周期内污染物浓度变化

图 9 所示为 R1 和 R2 在第 91 d 任意一个周期内 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TP 和 COD 的浓度变化。R1 采用底部厌氧进水的方式向反应器中提供基质,随后开始厌氧反应阶段,由于 R1 内含有充足的碳源,可进行彻底的反硝化作用,因此厌氧阶段进行 55 min 后 R1 中 NO_3^--N 浓度为 0,此后 R1 内 PAOs 释磷过程不再受到 NO_3^--N 抑制,PAOs 能将胞内多聚磷酸盐 (poly-P) 分解,以磷酸盐的形式释放在水中,并将碳源转化以 PHA 形式储存在体内,以便好氧条件下进行吸磷,因此观察到厌氧段 TP 浓度上升,好氧段 TP 浓度下降。生活污水有机物成分复杂,微生物能快速消耗利用的碳源较少,所以 R1 中 COD 浓度由 $130.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $43.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,待反应进入好氧段时,微生物可以利用的碳源已所剩无几, NO_3^--N 在 DPAO 作用下得到部分去除后,反硝化菌受到碳源限制而不再进行反硝化过程,系统中 NO_3^--N 浓度不断上升,至周期末期时 NO_3^--N 浓度为 $11.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

而 R2 中出水 NO_3^--N 浓度低于 R1,这得益于 R2 采用的多次进水-曝气的运行策略:周期初以厌氧进水的方式向微生物提供基质,在反硝化结束后系统由缺氧环境恢复为厌氧环境,为 PAOs 释磷提供条件,曝气后 NH_4^+-N 经硝化作用转化为 NO_3^--N ,经 DPAO 作用能够去除部分 NO_3^--N 后,由于反应器内碳源匮乏,反硝化菌摄取不到碳源,反硝化作用暂停,所以观察到 NO_3^--N 浓度上升,至好氧段末期系统内的 NO_3^--N 浓度分别为 $6.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。好氧段结束后,再以厌氧进水的方式为反硝化菌脱氮和 PAO 释磷提供碳源和适宜的厌氧条件,随后再进入厌氧环境,以此方式向系统内多次提供碳源,以便对氮素进行反硝化作用,故 R2 周期末为 $7.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过这种方式良好地处理了系统内 TN 和 TP,获得了良好的脱氮除磷效果。

3 结论

(1) 相同运行时间下,R2 中 PN 和 PS 含量多于 R1,PN/PS 和污泥粒径也处于较高水平。R1 和 R2

分别经过 56 d 和 39 d 后成功启动 AGS 工艺;运行 105 d 后,R1 和 R2 内颗粒污泥的平均粒径达到 $740 \mu\text{m}$ 和 $791 \mu\text{m}$,R2 中颗粒形态更圆润,表明多次进水-曝气策略能促进颗粒污泥的形成,有利于提高颗粒粒径。

(2) R1 和 R2 内颗粒污泥成熟后,对 COD、TP 和 TN 具有良好的处理效果,出水水质均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

(3) 颗粒化过程中,R2 中出水 NO_3^--N 浓度和出水 TP 浓度普遍低于 R1,表明与一次进水-曝气运行相比,多次进水-曝气运行下 PAO 受到 NO_3^--N 的冲击更小,除磷性能更好。

(4) 运行 100 d 后,R1 和 R2 中 DPAO 占全部 PAO 的比值由最初 11.17% 分别增至 25.47% 和 34.08%,表明多次进水-曝气策略下运行,颗粒内部更适宜 DPAO 生存,有利于 DPAO 富集。

参考文献:

- [1] Franca R D G, Pinheiro H M, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation [J]. *Biotechnology Advances*, 2018, **36**(1): 228-246.
- [2] Zhang Q G, Hu J J, Lee D J. Aerobic granular processes: current research trends [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **210**: 74-80.
- [3] Pishgar R, Dominic J A, Sheng Z Y, *et al.* Influence of operation mode and wastewater strength on aerobic granulation at pilot scale: startup period, granular sludge characteristics, and effluent quality [J]. *Water Research*, 2019, **160**: 81-96.
- [4] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, **91**(1): 168-175.
- [5] Peyong Y N, Zhou Y, Abdullah A Z, *et al.* The effect of organic loading rates and nitrogenous compounds on the aerobic granules developed using low strength wastewater [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, **67**: 52-59.
- [6] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2009, **43**(3): 751-761.
- [7] Pronk M, De Kreuk M K, De Bruin B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. *Water Research*, 2015, **84**: 207-217.
- [8] Muda K, Aris A, Salim M R, *et al.* The effect of hydraulic retention time on granular sludge biomass in treating textile wastewater [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 4711-4721.
- [9] Henriot O, Meunier C, Henry P, *et al.* Improving phosphorus removal in aerobic granular sludge processes through selective microbial management [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **211**: 298-306.
- [10] 李冬,王樱桥,李帅,等. 生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1878-1884.
- [11] Li D, Wang Y Q, Li S, *et al.* Impact of actual domestic sewage and simulated wastewater on an aerobic granular sludge system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1878-1884.
- [11] Wang X C, Chen Z L, Kang J, *et al.* The key role of inoculated sludge in fast start-up of sequencing batch reactor for the

- domestication of aerobic granular sludge [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **78**: 127-136.
- [12] Zou J T, Li Y M, Zhang L L, *et al.* Understanding the impact of influent nitrogen concentration on granule size and microbial community in a granule-based enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **177**: 209-216.
- [13] 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 等. 低 C/N (<3) 条件下 SNEDPR 系统启动及其脱氮除磷特性研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2960-2967.
- Zhen J Y, Yu D S, Wang X X, *et al.* The nutrient removal characteristic of SNEDPR system during start-up and steady operation phases treating low C/N (<3) sewage [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2960-2967.
- [14] 余宏刚. 污泥回流过程中缺氧处理对脱氮除磷的影响 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- Yu H G. Effect of anoxic treatment on nitrogen and phosphorus removal in sludge reflux process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [15] 陈斌. 工业园区污水处理厂改良型 A²/O 的设计与运行 [J]. *水处理技术*, 2019, **45**(5): 129-131.
- Chen B. Design and operation of improved A²/O in sewage treatment plant in industrial park [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, **45**(5): 129-131.
- [16] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro-to micro-scale [J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [17] 王然登, 彭永臻, 吴昌永, 等. 强化生物除磷体系中颗粒污泥的形成及机理探讨 [J]. *化工学报*, 2011, **62**(1): 214-219.
- Wang R D, Peng Y Z, Wu C Y, *et al.* Formation of granular sludge and its mechanism in enhanced process of biological phosphorus removal [J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(1): 214-219.
- [18] Wan C L, Lee D J, Yang X, *et al.* Calcium precipitate induced aerobic granulation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **176**: 32-37.
- [19] Guo Y, Zhang B, Zhang Z Q, *et al.* Enhanced aerobic granulation by applying the low-intensity direct current electric field via reactive iron anode [J]. *Water Research*, 2019, **149**: 159-168.
- [20] Bassin J P, Winkler M K H, Kleerebezem R, *et al.* Improved phosphate removal by selective sludge discharge in aerobic granular sludge reactors [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, **109**(8): 1919-1928.
- [21] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [22] 李冬, 王樱桥, 张杰, 等. 高径比对生活污水好氧颗粒污泥系统的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(1): 141-148.
- Li D, Wang Y Q, Zhang J, *et al.* The impact of height/diameter ratio on aerobic granular sludge (AGS) system in domestic sewage [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 141-148.
- [23] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular Polymeric Substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [24] Zhang L L, Feng X X, Zhu N W, *et al.* Role of extracellular protein in the formation and stability of aerobic granules [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **41**(5): 551-557.
- [25] Pol L W H, De Castro Lopes S I, Lettinga G, *et al.* Anaerobic sludge granulation [J]. *Water Research*, 2004, **38**(6): 1376-1389.
- [26] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(8): 2818-2827.
- [27] Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2127-2139.
- [28] Tsuneda S, Jung J, Hayashi H, *et al.* Influence of extracellular polymers on electrokinetic properties of heterotrophic bacterial cells examined by soft particle electrophoresis theory [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2003, **29**(2-3): 181-188.
- [29] 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.
- [30] 李鹏. 不同污泥沉降性能条件下污泥质量浓度对 SV 与 SVI 测定值的影响 [J]. *市政技术*, 2014, **32**(1): 124-127.
- Li P. Effect of sludge concentration on the value of SV and SVI under different condition of sludge sedimentation performance [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2014, **32**(1): 124-127.
- [31] 沈祥信, 李小明, 杨麒, 等. 预加好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2467-2472.
- Shen X X, Li X M, Yang Q, *et al.* Acceleration of the formation of aerobic granules in SBR by inoculating mature aerobic granules [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(11): 2467-2472.
- [32] 孙金凤. 硝化菌的筛选与扩增培养技术研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
- Sun J F. Study on selection and amplification of nitrifying bacteria culture technology [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012.
- [33] 董峰, 张捍民, 杨凤林. 数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 181-190.
- Dong F, Zhang H M, Yang F L. Modeling formation of aerobic granule and influence of hydrodynamic shear forces on granule diameter [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 181-190.
- [34] 梁东博, 卞伟, 王文啸, 等. 低温条件下好氧颗粒污泥培养及其脱氮性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 634-640.
- Liang D B, Bian W, Wang W X, *et al.* Aerobic granular sludge formation and nutrients removal characteristics under low temperature [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 634-640.
- [35] 张树军, 李定昌, 高景峰, 等. SBR 反应器中不同粒径成熟好氧颗粒污泥的分形表征 [J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(2): 691-696.
- Zhang S J, Li D C, Gao J F, *et al.* Fractal characteristics of mature aerobic granular sludges with different particle sizes in a sequencing batch reactor [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(2): 691-696.
- [36] He Q L, Zhou J, Wang H Y, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an A/O/A sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 1-8.
- [37] Wang Y Y, Geng J J, Peng Y Z, *et al.* A comparison of

- endogenous processes during anaerobic starvation in anaerobic end sludge and aerobic end sludge from an anaerobic/anoxic/oxic sequencing batch reactor performing denitrifying phosphorus removal[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **104**: 19-27.
- [38] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31** (3): 471-478.
- [39] Bassin J P, Kleerebezem R, Dezotti M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures[J]. *Water Research*, 2012, **46**(12): 3805-3816.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)