

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制

信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 在相同序批式活性污泥反应器(SBR)中分别加载 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 80、140、200 和 300 目不同粒径的磁性活性炭(反应器编号依次为 2、3、4、5 号), 同时以不投加磁性活性炭的 SBR 反应器(1 号)作为对照组, 研究各反应器污泥体积指数(SVI)、粒径分布特征、胞外聚合物(EPS)中胞外蛋白(PN)、胞外多糖(PS)的含量变化规律以及除污性能。结果表明, 不同粒径磁性活性炭对污泥颗粒化进程有一定的影响, 粒径过大、过小对促进污泥颗粒化进程的强化作用不明显, 当磁性活性炭的粒径为 140 目和 200 目时, 活性污泥很容易以其作为“成核”载体快速形成好氧颗粒污泥, 并且形成的颗粒污泥结构紧密, 沉降速率快。采用高斯函数分析污泥粒径分布和标准偏差发现, 反应器运行的第 50 d, 3 号和 4 号反应器内污泥平均粒径均达到了 $780 \mu\text{m}$ 以上, 明显高于其他反应器, 标准偏差分别为 $318.9 \mu\text{m}$ 和 $362.3 \mu\text{m}$, 两反应器内形成的颗粒污泥粒径较均匀, 处理系统较稳定。与此同时, 投加不同粒径的磁性活性炭均有利于促进污泥胞外蛋白质 PN 含量的增加, 对胞外多糖 PS 的含量影响不大; 但合适的磁性活性炭粒径(140 目和 200 目)越有利于污泥 PN 的分泌, 颗粒化程度明显的 3 号和 4 号反应器的 PN/PS 比值均高于其他 3 个反应器。磁性炭基好氧颗粒污泥的形成符合“惰性内核模型”。此外, 3 号、4 号反应器对废水 TN 和 TP 的去除率分别达到 50% 和 60% 以上, 均高于其他反应器。

关键词: 污泥颗粒化; 磁性活性炭; 好氧颗粒污泥; 粒径

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4679-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703163

Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System

XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, LIU Jie, FENG Mei, YU Ting-ting

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In this paper, $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ of magnetic activated carbon with different particle sizes being 80, 140, 200, and 300 mesh (numbered 2, 3, 4, 5) were inoculated into the same sequencing batch reactor (SBR). The sludge volume index (SVI), particle size distribution characteristics, changes of extracellular proteins (PN), polysaccharide (PS), and polymeric substances (EPS) and their decontamination capability were studied and compared with a control group without addition (numbered 1). The results show that different particle diameters of magnetic activated carbon have certain influences on the granulation process. For example, it is easier for activated sludge to form aerobic granular sludge (AGS) when particle size are 140 mesh and 200 mesh acting as an inner core. Under these conditions, the AGS has a close structure and good sedimentation characteristics. Gaussian distribution was adopted to analyze the characteristics of Tparticle size distribution and standard deviations. The average diameter of the sludge in 3# and 4# all reached $780 \mu\text{m}$ within 50 days, which was higher than other reactors, with the same standard deviations being $318.9 \mu\text{m}$ and $362.3 \mu\text{m}$ respectively, which is lower than 2# and 3#. Besides, the granular sludge formed in both reactors was uniform in size and stable in operation. Different particle sizes of magnetic activated carbon were beneficial for the enhancement of proteins (PN), especially those with appropriate diameters (140 and 200 mesh), but had little effects on polysaccharides (PS). The formation of aerobic granular sludge based-magnetic activated carbon was in accordance with the inert kernel model. Meanwhile, the PN/PS in 3# and 4# were obviously higher than other SBRs with the same removal rate of TN and TP reaching 50% and 60% respectively.

Key words: sludge granulation; magnetic activated carbon; aerobic granular sludge; particle size

好氧颗粒污泥 (AGS) 是微生物在一定的环境条件下自发凝聚、增殖形成的结构紧密、沉降性能良好的生物颗粒^[1]。与传统的活性污泥相比, 好氧颗粒污泥具有相对密度大、沉降速度快、污泥产率低^[2,3]、耐冲击负荷等优点^[4], 同时还具有较好的脱氮除磷性能, 在废水处理领域中具有较好的应用前途。但是好氧颗粒污泥快速颗粒化及其稳定运行一

直是限制其实际应用的最大瓶颈。国内外许多学者对促进好氧颗粒污泥形成因素进行了广泛研究^[5-9]。有研究表明, 虽然加入 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等无机金属

收稿日期: 2017-03-19; 修订日期: 2017-05-17

基金项目: 成都市科技惠民技术研发项目(2015-HM01-00477-SF); 四川省教育厅科研项目(17ZA0067)

作者简介: 信欣(1976~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为污染控制及资源化技术, E-mail: xx@cuit.edu.cn

离子有利于促进污泥的颗粒化,但是过高的金属浓度会使金属离子对微生物产生毒性,使污泥生物活性降低.近年来一些研究表明,一些惰性载体或者解体的颗粒污泥碎片等都可以作为好氧颗粒污泥形成的“成核”物质^[10,11].这些成核载体具有良好的表面性能,并有效增加其抗冲击负荷能力^[12],从而能增加好氧颗粒污泥的长期稳定运行性能.

其中,活性炭由于其具有较好的吸附性和价格低廉等优点,投加在水体中能够促进污泥的颗粒化进程,提高污水处理效能,因而被广泛地应用于污水处理系统中.高阳等^[13]在气升式内循环间歇式反应器(SBAR)加入了粒径为 830~1700 μm 的颗粒活性炭,研究发现加入颗粒活性炭可加速好氧颗粒污泥的颗粒化进程,缩短颗粒化时间,且污泥恢复活性的时间也比传统的活性污泥短,同时也能提高反应器对总氮(TN)的去除率.高景峰等^[14]研究表明在 SBR 系统启动初期加入一定比例的颗粒活性炭诱导 AGS 的形成是可行的.虽然上述研究表明污水生物处理系统中投加活性炭能促进污泥颗粒化,提高其除污性能,但是目前关于不同粒径活性炭对污泥颗粒化进程的影响报道不多;并且,如何对生物污泥系统中加入的活性炭回收重复利用又是一大难题.因此,本论文基于好氧颗粒污泥“成核假说”以及“微磁场生物效应”的基本原理,并从外加磁场对磁性材料加以分离重复利用角度考虑,在 SBR 系统中投加不同粒径的磁性活性炭,以单独的活性污泥系统为对照,从污泥形态变化、粒径分布特征、沉降性能等方面评价不同粒径磁性活性炭对 AGS 形成的影响,探讨磁性活性炭基好氧颗粒污泥的形成机制,以为推进好氧颗粒污泥进一步实际工程应用提供可靠的理论和实验依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置及运行方式

采用 5 个相同的序批式活性污泥反应器(SBR)(图 1),高径比为 2:1,有效容积为 1.5 L,空气压缩机通过砂芯曝气头提供曝气,并通过气体转子流量计控制气体流量.1 号反应器为单独的活性污泥系统(对照组),其他 4 个反应器分别在活性污泥反应器内投加 1.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 80 目(2 号)、140 目(3 号)、200 目(4 号)和 300 目(5 号)的磁性活性炭.反应器均置于 30℃ 的恒温水浴锅中运行,通过气体转子流量计调节曝气量为 300 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右(DO 约为

4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).1 d 运行 2 个周期,每个周期为 12 h,包括进水 0.5 h,曝气 8 h,沉淀时间(20~1 min)(根据运行时间逐步缩短),排水 0.5 h,剩余时间为静置,每次排水为反应器容积的 50%.

实验所用接种污泥取自成都科雅污水处理厂二期曝气池中的污泥,反应器中的污泥接种量约为反应器有效容积的 40%,接种后的污泥浓度(MLSS)为 4.279 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥体积指数(SVI)为 202.2 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$.

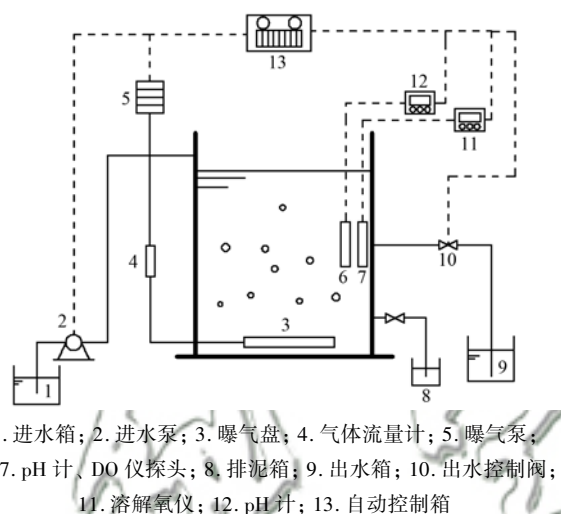


图 1 实验装置流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

1.1.2 磁性活性炭的制备^[15]

分别将不同粒径的活性炭浸没在 HNO_3 溶液中搅拌,洗涤过滤后于 105℃ 下在干燥箱中干燥过夜,得到改性活性炭.称取改性活性炭分散于 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 水溶液中超声溶解,将所得颗粒过滤干燥;干燥后的颗粒在纯氮气的氛围中于管式炉中煅烧,所得样品为磁性活性炭复合材料.

1.1.3 实验用水

本次实验中采用人工模拟废水为进水水质.其中葡萄糖、柠檬酸三钠提供碳源,硫酸铵提供氮源,磷酸二氢钾提供磷源,同时外加少量的 Fe^{2+} , Ca^{2+} , Cu^{2+} 等微量元素^[16].进水水质: $\rho(\text{COD})$ 为 120~240 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN})$ 为 40~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP})$ 为 2~4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 35~45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 维持在 7.0~7.2.

1.2 实验分析方法

1.2.1 水质和污泥指标分析方法

水质指标 COD、TN、TP、 NH_4^+-N 以及主要的污泥浓度 MLSS、MLVSS 和污泥体积指数 SVI 等的测定均采用国家标准方法^[17];污泥的形态外观用

相机进行观察, EPS 的提取采用离心方法, PN 采用修正的 Lowry 法测定^[18], PS 采用蒽酮-硫酸法测定^[19].

1.2.2 污泥粒径分析

采用高斯正态分布计算污泥的平均粒径与标准偏差^[20].

高斯函数拟合公式为:

$$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-\frac{(x-x_c)^2}{w^2}}$$

式中, y 为粒径分布函数; y_0 为 y 轴偏移量; A 为常数项; x 为污泥的粒径; x_c 为污泥平均粒径; w 为标准偏差, 反映了拟合后的曲线分布宽度.

2 结果与讨论

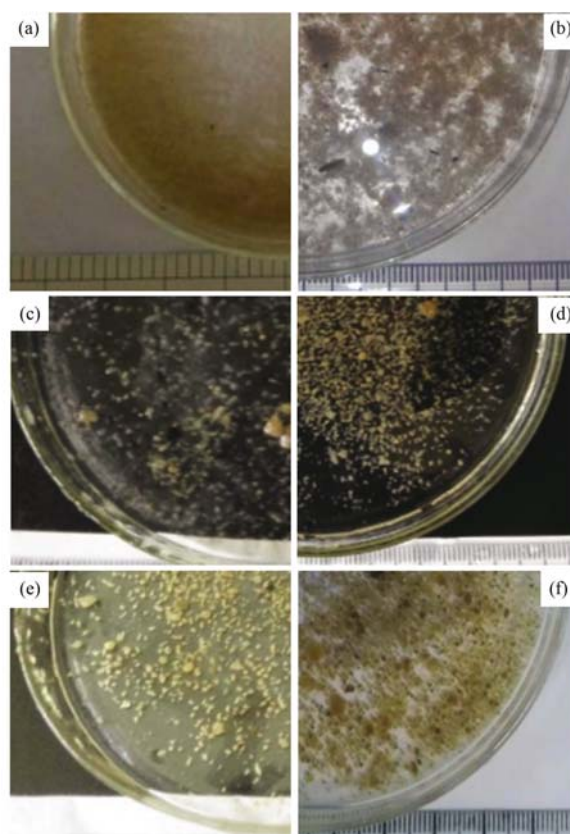
2.1 污泥指标变化

2.1.1 污泥形态变化

反应器接种污泥为絮状, 黄褐色[图 2(a)]. 运行 30 d 后各反应器相继出现污泥聚集形成颗粒污泥的现象. 1 号反应器中污泥沉降性能较接种污泥好, 开始聚集成团, 但形成的团状污泥结构较松散[图 2(b)]. 2 号反应器的污泥出现了少量结构紧密的颗粒污泥[图 2(c)], 但通过对反应器内部观察, 发现 2 号反应器投加的磁性活性炭的粒径相对较大, 部分沉于反应器底部, 不利于活性污泥将其作为“晶核”而快速形成颗粒污泥. 而投加 140 目和 200 目磁性活性炭的 3 号和 4 号反应器中形成了明显的好氧颗粒污泥, 其结构较紧密, 形成的颗粒污泥直径大多数在 0.6 ~ 0.8 mm 之间, 沉降性能最好[图 2(d)和图 2(e)]. 而投加 300 目磁性活性炭的 5 号反应器中, 污泥颗粒化程度比 1 号反应器高, 但明显低于 3 号和 4 号反应器[图 2(f)]. 因此, 从反应器内污泥颗粒化程度来看, 投加磁性活性炭的反应器均高于 1 号反应器. 同时, 投加不同粒径的磁性活性炭对污泥颗粒化程度的影响也有明显的不同. 80 目的磁性活性炭由于其粒径太大, 易沉降在反应器底部, 不利于作为污泥颗粒化“成核”载体; 300 目的磁性活性炭由于粒径过小, 部分活性炭容易漂浮在水面上, 初始排水时易被排走; 而 140 目和 200 目的磁性活性炭, 很容易以其为“晶核”形成好氧颗粒污泥, 并且形成的颗粒污泥结构紧密, 沉降速率快.

2.1.2 不同磁性活性炭对污泥粒径分布的影响

污泥的粒径分布是评价污泥颗粒化程度的一个重要指标. 采用高斯正态分布来分析各反应器颗粒



(a) 接种污泥; (b) ~ (f) 分别是 1、2、3、4 和 5 号反应器运行第 30 d 的污泥

图 2 污泥拍照外观形态

Fig. 2 Morphological observation of the sludge

化进程中污泥的粒径分布特征(图 3). 在各反应器启动运行的前 10 d 内, 污泥的粒径大部分在 0.2 mm 以下, 污泥呈絮状, 沉降性能差. 随着各反应器的运行, 反应系统内污泥的粒径分布开始出现不同的分布情况. 第 30 d 时, 1 号反应器内小于 0.2 mm 粒径的污泥仍然占多数; 相对于对照组, 2 号反应器内的污泥粒径有所增加, 多集中于 0.3 ~ 0.6 mm 之间; 而投加 140 目和 200 目磁性活性炭的 3 号和 4 号反应器内, 污泥粒径多集中在 0.6 ~ 0.8 mm 之间, 与此同时, 5 号反应器内污泥粒径多集中于 0.4 ~ 0.7 mm 之间. 可见, 相对于其他反应器, 3 号和 4 号反应器的污泥平均粒径稍大一点, 且这两个系统内颗粒污泥所占的体积分数较大, 污泥颗粒化程度较高, 表明该粒径范围内的磁性活性炭对污泥的颗粒化有较好的促进作用. 当反应器运行到第 50 d 时, 3 号和 4 号两反应器内污泥粒径大都达到 0.8 mm 以上, 污泥颗粒化已基本完成.

各反应器运行阶段污泥粒径分布的高斯拟合及参数结果如图 3 和表 1 所示. 1 号反应器运行 10 d 时污泥平均粒径 x_c 为 168.4 μm , 反应进行 50 d 时,

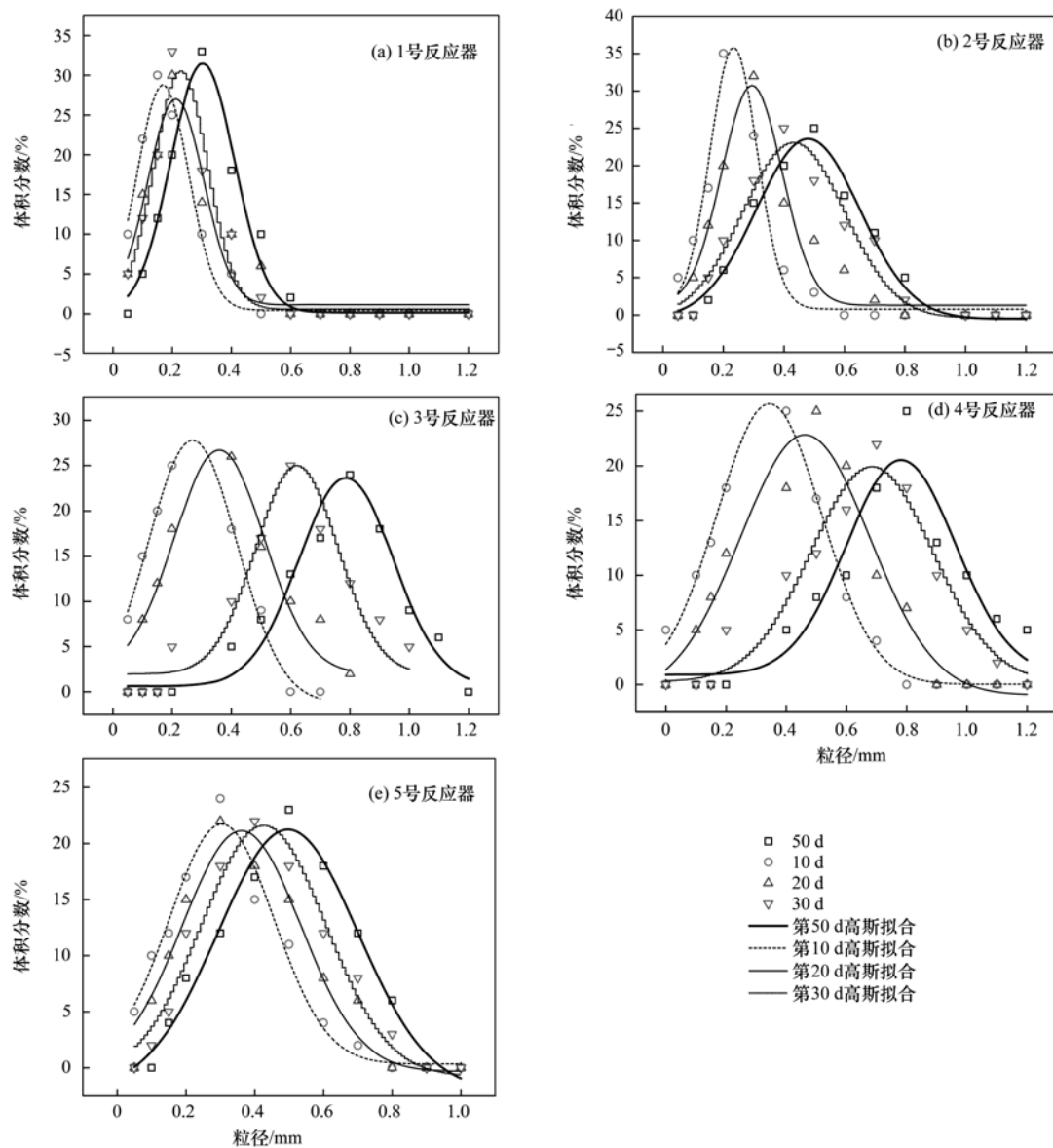


图3 各反应器内污泥粒径分布及高斯拟合

Fig. 3 Characteristics of particle size distribution and Gaussian distribution

污泥平均粒径 x_c 有所增大, 为 $302.7 \mu\text{m}$, 标准偏差 w 也由第 10 d 的 $174.5 \mu\text{m}$ 变为第 50 d 的 $216.2 \mu\text{m}$; 2 号反应器, x_c 由第 10 d 时的 $233.8 \mu\text{m}$ 增加到第 50 d 时的 $479.9 \mu\text{m}$, w 由 $155.3 \mu\text{m}$ 变到 $342.9 \mu\text{m}$; 3 号反应器, x_c 由 $268.8 \mu\text{m}$ 增加至 $786.6 \mu\text{m}$, w 由 $301.2 \mu\text{m}$ 增至 $318.9 \mu\text{m}$; 4 号反应器, x_c 由 $343.6 \mu\text{m}$ 增至 $781.5 \mu\text{m}$, w 由 $347.7 \mu\text{m}$ 增至 $362.3 \mu\text{m}$; 5 号反应器, 污泥平均粒径 x_c 由 $303.9 \mu\text{m}$ 增至 $496.8 \mu\text{m}$, w 由 $303.6 \mu\text{m}$ 增至 $406.7 \mu\text{m}$. 可见投加磁性活性炭反应器内的污泥的平均粒径均高于 1 号反应器, 同时投加不同粒径磁性活性炭反应器的污泥粒径分布也有一定差别. 将 50 d 时各反应器内的污泥粒径进行比较, 发现 3 号

和 4 号反应器内的污泥平均粒径均在 $780 \mu\text{m}$ 左右, 高于其他反应器, 而两反应器的标准偏差分别为 $318.9 \mu\text{m}$ 和 $362.3 \mu\text{m}$, 相对于其他投加磁性活性炭的 2 号和 5 号反应器内的标准偏差较小, 说明 3 号和 4 号反应器内形成的颗粒污泥粒径较均匀, 颗粒污泥较稳定.

2.1.3 污泥 SVI 指标

污泥体积指数 (SVI) 是对污泥沉降性能评价的一个重要指标, SVI 值越低, 表明污泥的沉降性能就越好. 本实验中, 各反应器运行过程中 SVI 的变化如图 4 所示. 各反应器接种污泥的污泥体积指数 SVI 均为 $202.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着各反应器不断运行, 前 30 d 内, 反应系统中污泥体积指数 SVI 都呈明显下

表 1 高斯曲线描述粒径分布拟合参数/ μm

Table 1 Size distribution of aerobic granules fitted using the Gauss function/ μm

时间/d	1 号		2 号		3 号		4 号		5 号	
	均值 x_c	离散度	均值 x_c	离散度	均值 x_c	离散度	均值 x_c	离散度	均值 x_c	离散度
10	168.4	174.5	233.8	155.3	268.8	301.2	343.6	347.7	303.9	303.6
20	212	187.8	294.5	199.5	358.6	303.4	462.5	429.4	361.7	344.6
30	223.6	180.6	426.9	335.6	616.2	276.9	678.6	403.6	421.6	360.8
50	302.7	216.2	479.9	342.9	786.6	318.9	781.5	362.3	496.8	406.7

降趋势; 相对于 1 号、2 号和 5 号反应器, 3 号和 4 号反应器内污泥体积指数 SVI 下降幅度最大, 第 30 d 时, 3 号、4 号反应器内的污泥的 SVI 值分别降到了 $40.32 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 $38.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥的沉降性能较其他反应器的要好, 这和前面 3 号与 4 号反应器内的污泥形态变化结果一致, 即投加 140 目与 200 目的磁性活性炭能明显提高污泥的沉降性能, 加快污泥颗粒化进程. 在反应器运行到第 70 d 时, 3 号、4 号反应器内污泥 SVI 值分别为 $28.5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 $28.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显低于其他反应器.

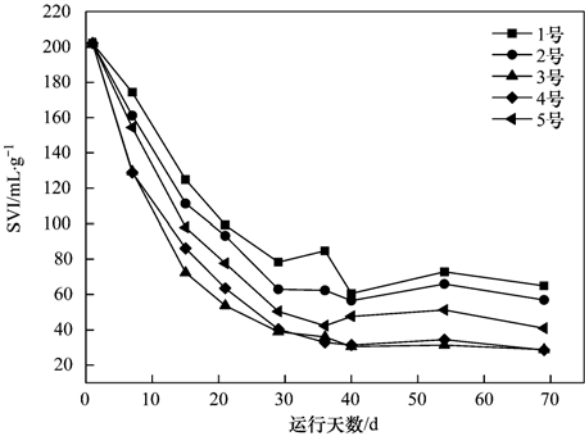


图 4 污泥体积指数 SVI 变化

Fig. 4 Changes in the SVI during operation of the reactor

2.1.4 污泥 EPS 中 PN 和 PS 的含量变化

胞外聚合物 (EPS) 是微生物在新陈代谢过程中分泌的高分子有机物, 主要包括胞外蛋白质 (PN) 和胞外多糖 (PS). 本实验中, 各反应器内污泥的 PN、PS 含量以及 PN/PS 比值的变化如图 5 所示. 接种污泥的 PN 含量为 $54.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随着反应时间的进行, 各反应器内的 PN 都呈逐渐升高的趋势, 投加磁性活性炭的各 SBR 系统中污泥的 PN 均高于 1 号反应器. 反应器运行到第 30 d 时, 1、2、3、4 和 5 号反应器污泥 PN 含量分别为 130.28、160.37、189.65、199.37 和 $171.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 并且, 污泥中的 PN 含量随着投加磁性活性炭粒径的减小呈先增加明显, 后增加缓慢的趋势 [图 5(a)]. 各反应器接种污泥的 PS 为 $18.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随着各反应器的运

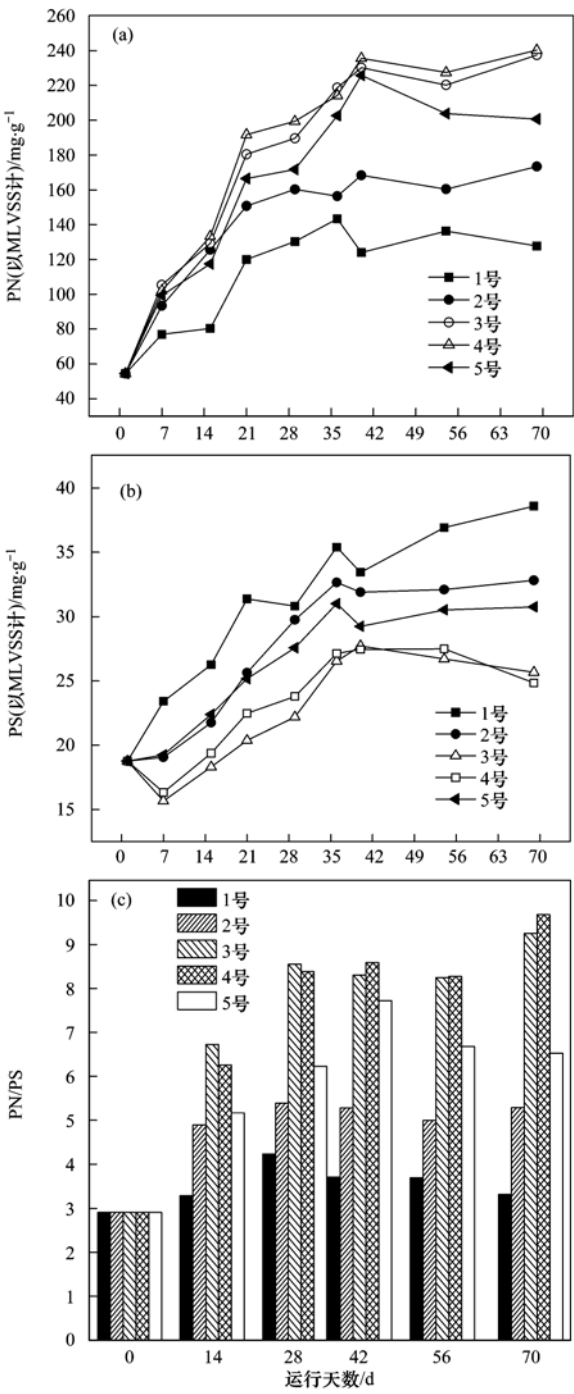


图 5 各反应器污泥 PN、PS 含量及 PN/PS 的变化

Fig. 5 Changes of PN, PS, and PN/PS ratio

行, 各反应器内污泥的 PS 也呈逐步升高的趋势, 但

是增加幅度不是很大,第30 d时,投加140目和200目磁性活性炭的3号和4号的反应器内污泥PS的含量分别为22.19和23.78 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,低于其他3个反应器[图5(b)]. 通过进一步对各反应器PN/PS的比值[图5(c)]分析发现,随着反应器的不断运行,颗粒化程度明显的3号和4号反应器的PN/PS的比值均高于其他3个反应器,第30 d时,其PN/PS的比值分别为8.55和8.38,而此时1、2和5号反应器的PN/PS值分别为4.24、5.39和6.23. 实验结果表明,一方面,投加磁性活性炭有利于促进污泥胞外蛋白质PN,对胞外多糖PS的含量影响不大,合适的磁性活性炭粒径(140目和200目)更有利于污泥PN的分泌,PN含量越多,越有利于污泥颗粒化. 另一方面,PN/PS比值越高,其对应的污泥反应器内颗粒程度越高,说明较高的PN/PS比值有利于污泥的颗粒化及颗粒污泥的稳定维系.

2.2 除污性能的影响

各反应器对污水中COD、TN和TP的去除效果见图6. 各反应器对COD的去除效率都很高,反应器运行初期,各反应器COD的去除率基本保持在90%左右,相差不是很大[图6(a)],而各反应器对TN和TP的去除率相差比较明显[图6(b)和图6(c)]. 各反应器对废水TN的去除率在反应初期都较低,差别也不是很大,但是随着反应器的连续运行,各反应器对废水TN的去除率都有所上升;同时伴随着3号和4号反应器颗粒化程度的不断提高,第30 d后,3号和4号反应器对废水TN的平均去除率均达到50%以上,明显高于1号和2号反应器[图6(b)]. 反应器运行刚开始时,1号反应器对TP的去除率明显低于其他各组反应器,这说明系统中投加了不同粒径的磁性活性炭能明显增加对污水处理系统中TP的去除率效果;随着反应器的继续运行,各反应器内污泥的颗粒化不同,导致其对总磷的去除效果差别越来越明显. 反应器运行末期,3号与4号反应器对TP去除效率平均达到了60%以上,明显高于其他反应器[图6(c)]. 一定粒径磁性活性炭的加入能提高SBR系统的除污性能,尤其是明显提高反应器去除氮、磷的性能. 其原因在于:一是因为磁性活性炭的吸附和污泥微生物氧化分解的协同作用,磁性活性炭的大量微孔吸附了废水中的污染物质,为微生物群的生长繁殖提供了高浓度的营养源,而微生物代谢过程中产生的酶和辅酶又被吸附和富集在磁性活性炭的孔隙中,这样就会促使附着在磁性活性炭上的微生物和污染物质接触时

间变长有利于污染的分解或转化;二是因为以磁性活性炭为“晶核”形成的好氧颗粒污泥,其独特的空间立体结构形成了好氧-厌氧的微观区域环境,有利于实现同步脱氮除磷;再者,投加磁性活性炭组的各反应器在反应器后期均明显高于对照组1号反应器,说明随着各反应器的不断运行,各反应器内投加的磁性活性炭的微磁学效应发挥重要的作用,合适的磁学效应可以加快活性污泥的硝化速率^[21],改变了反应器内关键脱氮除磷菌群的组成^[22],并有利改善颗粒污泥处理系统的稳定性^[23].

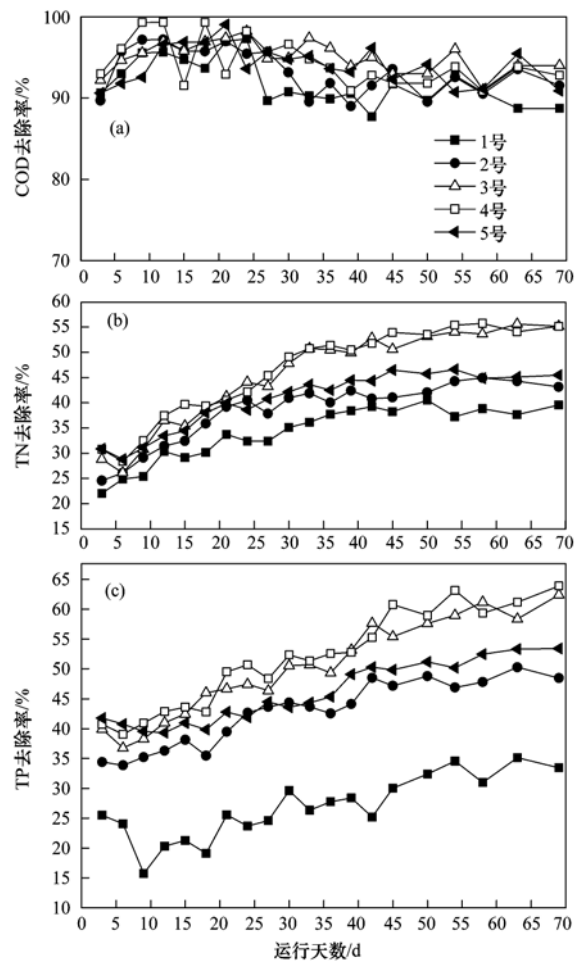


图6 反应器对污水中COD、TN和TP的去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of COD, TN, and TP

2.3 SBR系统中加载磁性活性炭对污泥颗粒化影响机制的讨论

本实验中加载不同粒径磁性活性炭的反应器内污泥平均粒径均高于对照组,呈现出较明显促进污泥颗粒化的现象. 活性污泥系统中加载载体材料促进污泥颗粒化进程可用“惰性内核模型”来解释^[14]. 投加的磁性活性炭主要从两个方面影响活性污泥. 一方面,可作为污泥颗粒化的“成核”载体,反应器

内有大量的胚胎颗粒污泥产生后,随之反应系统内的水力条件形成的气、液、固微环境发生了变化,胚胎颗粒污泥之间相互碰撞的机会增多;加上污泥胞外聚合物 EPS 含量的增加,会增进污泥细胞之间的相互粘连,尤其是胞外蛋白 PN 的显著增加,能改变污泥表面的相对疏水性,从而增加污泥之间的凝聚作用,促使胚胎颗粒污泥能更快地聚集成更大的颗粒污泥。另一方面,磁性活性炭的投加会影响活性污泥系统中微生物的种群、活性和数量。磁性活性炭具有良好的比表面积,有利于富集生长速率较慢的硝化细菌等脱氮菌群,从而避免因传质阻力引起的污泥颗粒内部分裂,可提高好氧颗粒污泥系统的稳定性;再者,良好的磁学效应,能提高污泥系统微生物活性和新陈代谢作用,从而达到提高系统脱氮除磷的处理效果。

目前,虽然有一些关于加载惰性载体促进污泥颗粒化的研究报道^[21~23],但是关于加载不同粒径的磁性活性炭载体对污泥颗粒化的影响鲜有报道。本研究表明,不同粒径的磁性活性炭对污泥的性能及颗粒化程度方面存在一定的差异。载体粒径过大、过小都不利于其作为好氧颗粒污泥快速成核的有效载体,其原因在于:若粒径过大,部分磁性活性炭会沉在反应器底部,从而导致活性污泥与载体的接触碰撞机会减少,不利于微生物在载体表面附着生长,不易形成以磁性活性炭为内核的颗粒污泥。从水力学条件出发,若加载该粒径范围的磁性活性炭,要达到比较好的污泥颗粒化效果,可能会通过增加曝气量、水力剪切力等途径增加污泥和载体之间的接触和碰撞,这样势必会引起能耗的增加。若粒径过小,在反应启动初期,其部分载体会浮于反应器水体表面,随着反应器的出水而流失,加上载体粒径过小,其比表面积越大,微生物在其表面的生长也会受到一定的限制,从而导致污泥颗粒化进程缓慢。

3 结论

(1) SBR 系统中加载磁性活性炭有利于好氧颗粒污泥的形成。磁性活性炭粒径大小对好氧颗粒污泥的形成有一定的影响;载体粒径过大、过小都不利于其作为好氧颗粒污泥快速成核的有效载体;粒径为 140 目和 200 目磁性活性炭有利于好氧颗粒污泥的形成。

(2) SBR 系统中加载不同粒径的磁性活性炭对污泥粒径分布有一定影响。投加 140 目和 200 目磁性活性炭的 3 号和 4 号反应器内的污泥平均粒径均

高于其他反应器;两反应器的标准偏差较小,形成的颗粒污泥粒径较均匀,颗粒污泥较稳定。

(3) 活性污泥系统中加载磁性活性炭材料促进污泥颗粒化进程可用“惰性内核模型”来解释。一方面,磁性活性炭可作为污泥颗粒化的“成核”载体;另一方面,磁性活性炭良好磁学效应能增强微生物活性和新陈代谢作用,提高反应系统脱氮除磷性能。

参考文献:

- [1] 梁梦晓,倪晋仁. SBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 502-512.
Liang M X, Ni J R. Cultivation and characteristics of aerobic granular sludge in sequencing batch reactor[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(4): 502-512.
- [2] Nanchaiah Y V, Venugopalan V P. Denitrification of synthetic concentrated nitrate wastes by aerobic granular sludge under anoxic conditions[J]. Chemosphere, 2011, 85(4): 683-688.
- [3] Lotito A M, Fratino U, Mancini A, et al. Effective aerobic granular sludge treatment of a real dyeing textile wastewater[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012, 69: 62-68.
- [4] 陈冉妮,高景峰,郭建秋,等. 好氧颗粒污泥同步脱氮除磷的常温启动和低温维持[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2995-3001.
Chen R N, Gao J F, Guo J Q, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by aerobic granular sludge at normal and low temperatures[J]. Environmental Science, 2009, 30(10): 2995-3001.
- [5] Jiang H L, Tay J H, Liu Y, et al. Ca^{2+} Augmentation for enhancement of aerobically grown microbial granules in sludge blanket reactors[J]. Biotechnology Letters, 2003, 25(2): 95-99.
- [6] 刘绍根,孙菁,徐锐. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对好氧污泥快速颗粒化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 168-176.
Liu S G, Sun J, Xu R. Effects of Ca^{2+} and Mg^{2+} on rapid granulation of aerobic sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 168-176.
- [7] 巢少峰,冒文娟,郑晓英,等. Cu^{2+} 对好氧颗粒污泥理化特性的影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 399-403.
Chao S F, Mao W J, Zheng X Y, et al. Analysis of influence of Cu^{2+} on physicochemical characteristics of aerobic granular sludge[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 399-403.
- [8] 郑晓英,吴颜科,陈卫,等. $\text{Zn}(\text{II})$ 长期作用对好氧颗粒污泥基本性能与污染物去除功效的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 49-53.
Zhen X Y, Wu Y K, Chen W, et al. Long-term effects of $\text{Zn}(\text{II})$ on properties and pollutant removal efficiencies of aerobic granular sludge[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 49-53.
- [9] 金雪瓶,邓风. Ce^{3+} 对好氧颗粒污泥培养的影响[J]. 化工环保, 2013, 33(2): 103-107.
Jin X P, Deng F. Effect of Ce^{3+} on cultivation of aerobic granular sludge[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2013, 33(2): 103-107.

- [10] Wang S G, Gai L H, Zhao L J, *et al.* Aerobic granules for low-strength wastewater treatment: formation, structure, and microbial community[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(7): 1015-1020.
- [11] Zhou J H, Zhao H, Hu M, *et al.* Granular activated carbon as nucleating agent for aerobic sludge granulation: effect of GAC size on velocity field differences (GAC versus flocs) and aggregation behavior[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **198**: 358-363.
- [12] Zhou D D, Liu M Y, Gao L L, *et al.* Calcium accumulation characterization in the aerobic granules cultivated in a continuous-flow airlift bioreactor[J]. *Biotechnology Letters*, 2013, **35**(6): 871-877.
- [13] 高阳, 徐晓晨, 徐光景, 等. 活性炭为载体好氧颗粒污泥培养及性能研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, **23**(5): 25-28.
- Gao Y, Xu X C, Xu G J, *et al.* Research on cultivation and performance of aerobic granular sludge using activated carbon as carrier[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, **23**(5): 25-28.
- [14] 高景峰, 张倩, 王金惠, 等. 颗粒活性炭对 SBR 反应器中好氧颗粒污泥培养的影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, **20**(3): 345-354.
- Gao J F, Zhang Q, Wang J H, *et al.* Enhanced aerobic sludge granulation in sequencing batch reactor by granular activated carbon augmentation [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, **20**(3): 345-354.
- [15] Shahamat Y D, Farzadkia M, Nasser S, *et al.* Magnetic heterogeneous catalytic ozonation: a new removal method for phenol in industrial wastewater [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2014, **12**(1): 50.
- [16] Xin X, Lu H, Yao L, *et al.* Rapid formation of aerobic granular sludge and its mechanism in a continuous-flow bioreactor[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2017, **181**(1): 424-433.
- [17] 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.
- [18] 宁正祥. 食品成分分析手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- [19] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [20] 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.
- [21] Tomska A, Wolny L. Enhancement of biological wastewater treatment by magnetic field exposure[J]. *Desalination*, 2008, **222**(1-3): 368-373.
- [22] Li A J, Li X Y, Yu H Q. Aerobic sludge granulation facilitated by activated carbon for partial nitrification treatment of ammonia-rich wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **218**: 253-259.
- [23] Li B, Huang W L, Zhang C, *et al.* Effect of TiO₂ nanoparticles on aerobic granulation of algal-bacterial symbiosis system and nutrients removal from synthetic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **187**: 214-220.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)