

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究

周曼, 杨昌柱*, 濮文虹, 罗应东, 龚建宇

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 在 SBR 反应器中, 分别以絮状活性污泥培养的好氧颗粒污泥和直接接种的已稳定运行 1 a 的好氧颗粒污泥为对象, 对 2 种颗粒龄不同的颗粒污泥的形态、理化特性、对有机物降解能力以及微生物活性进行了比较研究. 结果表明, 小颗粒龄好氧颗粒的平均湿密度、污泥的比重和表示物理强度的完整系数(IC)分别为 $1.066 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.013 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 98.7%, 各指标均高于大颗粒龄好氧颗粒的 $1.026 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.010 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 98.4%, 两者的平均粒径分别为 1.9 mm 和 2.2 mm. 小颗粒龄好氧颗粒和大颗粒龄好氧颗粒的沉降速度分别为 $0.005 \sim 0.032 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.003 \sim 0.028 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 前者的 SVI 较低, 且两体系中好氧颗粒的沉降速度均随粒径的增大而增大. 两者对 COD 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率都保持在 90% 以上和 85% 左右, 从出水 COD 浓度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和周期试验来看, 小颗粒龄好氧颗粒对 COD 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果更好, 两者对 TP 的去除率分别维持在 40% ~ 90% 和 32% ~ 85%, 但两者对 TN 的去除效果相差不大, 去除率都在 80% 左右. 同时, 小颗粒龄好氧颗粒的异养菌比耗氧速率 (SOUR_H)、亚硝酸菌比耗氧速率 ($\text{SOUR}_{\text{NH}_4}$)、硝酸菌比耗氧速率 ($\text{SOUR}_{\text{NO}_2}$) 分别为 26.4 、 14.8 和 $11.2 \text{ mg}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$, 均大于大颗粒龄好氧颗粒的 25.2 、 14.4 和 $8.4 \text{ mg}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$. 综上所述, 好氧颗粒污泥由于颗粒龄的不同会具有明显不同的理化性质, 颗粒龄小的好氧颗粒具有更好的有机物降解能力、更高的微生物活性和更好的稳定性.

关键词: 好氧颗粒; 颗粒龄; 粒径; 理化性质; 稳定性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0896-07

Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age

ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, LUO Ying-dong, GONG Jian-yu

(College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the SBR reactor, we studied the different style, physicochemical characteristic, pollutants removal and microbial activity between the short age and long age aerobic granule, respectively. The short age aerobic granule was cultivated from activated floccules sludge and the other was gotten from aerobic granular sludge which was operated stably more than one year. The results indicated that the wet density, the specific gravity and integrated coefficient (IC) of the short age aerobic granule were $1.066 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.013 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and 98.7%, respectively. And that of long age were $1.026 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.010 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and 98.4%, respectively. All of them were higher than the long age aerobic granule. The mean diameters of them were 1.9 mm and 2.2 mm, respectively. The settling velocity of short age and long age aerobic granule were $0.005\text{-}0.032 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.003\text{-}0.028 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, and two kinds of aerobic granule settling velocity increased with the diameter increased. SVI of the former was lower. The COD removal rates of two aerobic granules were above 90%, and the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rates of them were about 85%. The results of the COD effluent concentration, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ effluent concentration and the pollutants concentration in a typical cycle indicated that the short age aerobic granule had better pollutants removal efficiency. The TP removal rates of them were between 40%-90% and 32%-85%, respectively. The TN removal rates of them were about 80%. The SOUR_H , $\text{SOUR}_{\text{NH}_4}$ and $\text{SOUR}_{\text{NO}_2}$ of the short age aerobic granule were 26.4, 14.8 and $11.2 \text{ mg}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$, respectively. And that of long age were 25.2, 14.4 and $8.4 \text{ mg}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$, respectively. In summary, the aerobic granule had significantly different physical and chemical characteristics because of different granule age, and the short age aerobic granule exhibited better pollutants removal ability, higher microbial activity and more stability than the long age aerobic granule.

Key words: aerobic granule; granule age; diameter; physicochemical characteristic; stability

好氧颗粒污泥因具有良好的沉淀性能、低含水率、高生物量、密实的生物结构、耐冲击负荷和良好的脱氮除磷能力等优点, 已成为国内外研究热点^[1~5]. 但是好氧颗粒污泥不能长期稳定存在是该技术发展的障碍^[6~9]. 颗粒龄是指从好氧颗粒培养成熟起到运行至某一阶段时止的时间长度. 随着颗粒龄的增大, 颗粒粒径增长, 颗粒内部传质限制加剧, 空穴逐渐变大, 最终导致颗粒污泥的不稳定甚至结

构松散, 所以不同颗粒龄的好氧颗粒状态不同. 目前关于好氧颗粒污泥稳定性的研究主要集中在好氧颗粒运行条件的优化、抑制颗粒内部厌氧菌的活性以及如何形成结构密实的颗粒污泥等方面^[10~14]. 但是, 在颗粒污泥形成并稳定后, 由于颗粒龄的长短,

收稿日期: 2011-04-28; 修订日期: 2011-07-30

作者简介: 周曼(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: mfkjlc@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yangchzh169@163.com

颗粒污泥性能变化的研究还鲜见报道. 所以考察不同颗粒龄的好氧颗粒的各种特性对进一步分析好氧颗粒的稳定性和控制工艺的稳定运行具有一定的指导意义.

本研究在维持相同的进水基质、曝气量、温度等因素的条件下, 对稳定运行的 2 种不同颗粒龄的好氧颗粒的形态、理化特性和对有机物降解能力及微生物活性进行了比较, 以期为好氧颗粒污泥的稳定运行提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方案

采用完全相同的 2 个有机玻璃制成的圆柱体 SBR 反应器, 标记为 R_1 、 R_2 . 反应器内径 8 cm, 有效水深 160 cm, 有效容积 8 L, 体积交换率约为 50%. 反应器底部设置曝气装置进行曝气, 试验期间的气温变化范围为 5 ~ 10℃, pH 控制在 7.0 ~ 8.0 范围内. 试验装置如图 1 所示.

R_1 反应器中为由絮状活性污泥经过 65 d 左右培养成熟的小颗粒龄好氧颗粒, R_2 反应器中为直接接种的已稳定运行 1 a 的大颗粒龄好氧颗粒, 维持两反应器污泥浓度为 5 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 反应器 R_1 和反应器 R_2 运行模式如下: SBR 反应器运行通过人工控制, 每天运行 4 个周期, 运行周期设定为 6 h, 分别为: 进水 2 min、曝气 354 min、沉淀 3 min 和排水 1 min.

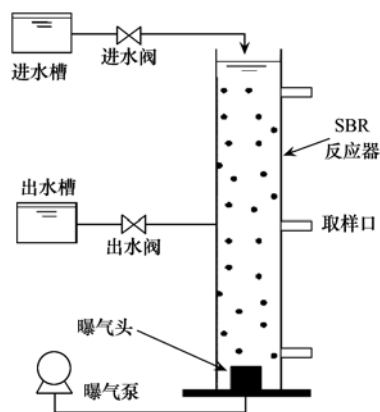


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR system

1.2 进水水质

试验中的进水采取人工模拟废水, R_1 和 R_2 的进水水质完全相同, 且 R_1 其水质指标与培养时期相同: $\text{NaAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1 395 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (即 COD 600

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 NH_4Cl 191 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 MgSO_4 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 29 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 55 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 分析方法

COD、 NH_4^+-N 、TN、TP、MLSS 和 SVI 采用国家标准分析方法测定^[15]; 颗粒污泥粒径分布采用标准筛筛分测定; 溶解氧和温度采用 JPB-607 型便携式溶解氧仪测定; pH 值采用 pHS-3B 精密 pH 计测定. 用数码相机观察颗粒污泥形态, SOUR_H 、 $\text{SOUR}_{\text{NH}_4}$ 及 $\text{SOUR}_{\text{NO}_2}$ 的测定采用标准方法^[16].

污泥湿密度的测定方法^[17]为: 取 100 mL 污泥置于带刻度的离心管中, 在 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 弃去上清液, 测定污泥质量和体积, 求出湿密度.

污泥沉降速度的测定方法为: 随机取 50 ~ 100 粒颗粒污泥, 测量粒径后逐一放入盛满清水的 1 L 量筒中, 测定其沉到筒底的时间, 计算不同粒径范围的颗粒污泥的沉速.

污泥比重的测定方法^[18]为: 取 10 mL 污泥 (沉降 30 min 后的), 用蒸馏水冲洗两遍, 置于预先用分析天平称量好的离心管内 (m_1), 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 弃上清液后称量 m_2 , 然后加入一定量 4℃ 蒸馏水, 在上述离心条件离心后, 立即称得 m_4 . 将泥与蒸馏水全部倾出后, 在离心管中注入同体积 4℃ 蒸馏水, 离心后称得 m_3 . 比重 = $\{[(m_2 - m_1) / ((m_3 - m_1) - (m_4 - m_2))] \} \times F$, 式中 F 为温度校正因子.

2 结果与分析

2.1 外观特征

R_1 中通过试验培养出的好氧颗粒污泥颗粒龄小, 结构密实, 形状呈圆球形或椭球形, 表面光滑, 颜色呈淡黄色, 表面孔隙率较小. 而 R_2 中直接接种的好氧颗粒污泥由于运行了 1 a, 颗粒龄大, 颗粒粒径较 R_1 中大, 部分颗粒呈现灰白色, 颗粒结构较松散 (图 2).

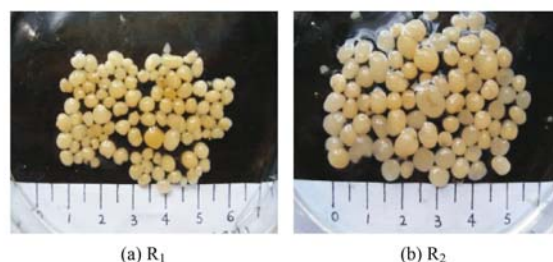


图 2 R_1 和 R_2 中好氧颗粒污泥的数码照片

Fig. 2 Photographs of the aerobic granular sludge in two reactors

2.2 密度、含水率、污泥比重和物理强度

经测定, R_1 中好氧颗粒污泥的平均湿密度为 $1.066 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, R_2 中好氧颗粒污泥的平均湿密度为 $1.026 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 与 Etterer 等^[19]的研究结果相似; R_2 的湿密度略低于 R_1 , 分析原因是^[20]: 粒径随着颗粒龄的增大而增大, 当粒径增长到一定程度后, 有机物向颗粒内部的扩散受限, 粒径较大的好氧颗粒内部细胞自溶形成中空小孔, 降低了污泥结构的密实程度, 从而使污泥湿密度下降; R_1 和 R_2 含水率分别为 93.3% 和 93.9%.

颗粒污泥的比重, 是影响颗粒污泥沉降性能的重要参数. 常规活性污泥絮体的比重介于 $1.002 \sim 1.006 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间^[21]. R_1 体系和 R_2 体系中好氧颗粒的比重分别为 $1.013 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.010 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 这表明 R_1 体系中的好氧颗粒均具有更致密的结构, 也再次验证了 R_1 中好氧颗粒的湿密度高于 R_2 .

颗粒污泥的物理强度用完整系数(IC)来表示, 即把颗粒污泥置于瓶中并放在平板摇床上, 以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度振摇 5 min, 瓶中剩余的结构完整的颗粒污泥量占起始污泥量的质量分数被定义为完整系数^[22]. 反应器稳定运行时期, 反应器 R_1 中好氧颗粒的 IC 值为 98.7%, R_2 中好氧颗粒的 IC 值为 98.4%, 说明好氧颗粒的物理强度较好, R_1 的物理强度略优于 R_2 . 颗粒污泥抵抗水力剥落的特性可用颗粒强度来表征^[1]. 说明颗粒龄小的好氧颗粒具有更高的抵抗外界水力剥落的能力, 结构更密实. 此外, 在反应器运行过程中, R_1 体系出水一直保持较为清澈, 而 R_2 体系的出水 SS 值都较高, 出水混浊. 这也说明了由于 R_2 中好氧颗粒的物理强度略小, 水流与颗粒之间的摩擦以及颗粒之间的碰撞使更多破碎污泥溶解在上清液中, 影响反应器的出水质量.

2.3 粒径分布

粒径是好氧颗粒污泥的重要特征参数之一, 对于污泥的沉降性能、传质特性以及生物活性具有显著的影响. 小颗粒龄的好氧颗粒和大颗粒龄的好氧颗粒的粒径分布情况见图 3. 小颗粒龄的好氧颗粒的粒径主要分布在 $0.6 \sim 4.0 \text{ mm}$, 平均为 1.9 mm . 大颗粒龄的好氧颗粒的粒径主要分布在 $1.4 \sim 4.0 \text{ mm}$, 平均为 2.2 mm .

从图 3 可知, R_1 体系中直径 $1.4 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的好氧颗粒体积占 R_1 中全部颗粒体积的 64.2%. R_2 体系中直径 $2.0 \sim 4.0 \text{ mm}$ 的好氧颗粒体积占 R_2 中全部颗粒体积的 68.5%. 与 R_2 体系中好氧颗粒相比,

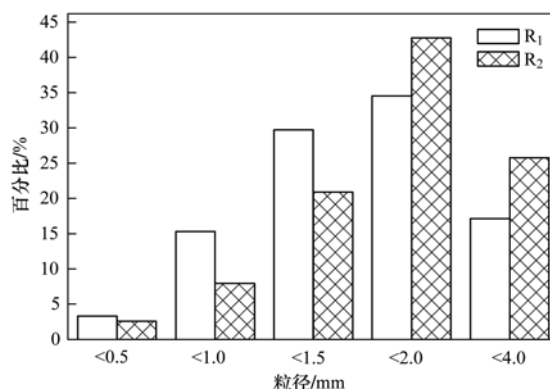


图 3 R_1 和 R_2 中好氧颗粒污泥的粒径分布

Fig. 3 Size distribution of aerobic granular sludge in two reactors

R_1 体系中好氧颗粒的粒径较小, 分析原因有二, 一是颗粒体积膨胀与颗粒污泥的结构以及菌种有一定的关系, 好氧颗粒表面以好氧硝化菌为主, 它们属于自养菌, 增殖速率低, 新陈代谢弱, 世代周期长. 而颗粒内部主要富集的以异养为主的兼氧-厌氧反硝化菌, 它们增殖速率快, 生命活动旺盛. 随着颗粒龄的增大, 颗粒内部异养菌生长逐渐向外延伸, 引起了好氧颗粒粒径的增加, 同时由于存在表面张力, 颗粒表面的自养菌群结构变得松散, 粒径变大. 二是因为好氧颗粒内部的反硝化菌不断将硝化产物硝酸盐和亚硝酸盐还原为 N_2 , 经由传质孔道排出, N_2 的不断生成在颗粒内部形成了较大的气压, 导致颗粒向外扩张, 粒径变大^[23].

2.4 沉降性能

由图 4 可知, 小颗粒龄的好氧颗粒 SVI 值低于大颗粒龄的好氧颗粒, 这说明了小颗粒龄的好氧颗粒结构致密, 沉降性能比大颗粒龄的好氧颗粒好. 分析原因有: 大颗粒龄的好氧颗粒粒径较大, 会导致传质效率低下, 使附着在颗粒表面的胞外聚合物利用率降低, 其疏水性减弱, SVI 值升高^[24], 从而导致了好氧颗粒沉降性能下降.

由图 5 可知, R_1 体系中好氧颗粒的沉降速度明显高于 R_2 中的好氧颗粒, 并且两体系中好氧颗粒的沉降速度均随粒径的增大而增大, R_1 体系中好氧颗粒的沉降速度为 $0.005 \sim 0.032 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, R_2 体系中好氧颗粒的沉降速度为 $0.003 \sim 0.028 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 好氧颗粒污泥的沉降速度与颗粒大小和结构有关^[25]. R_1 体系中的好氧颗粒粒径小、结构密实、湿密度大、颗粒强度大、污泥比重大, 沉降速度较大; 反之, R_2 体系中的好氧颗粒粒径大, 但密度小, 结构不够密实, 颗粒强度小, 污泥比重小, 沉降速度较小. 由于颗粒

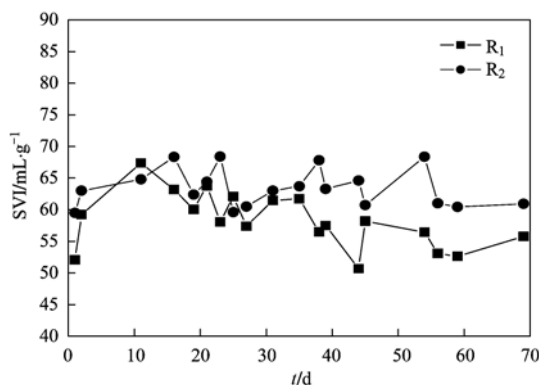


图4 两反应器运行阶段污泥 SVI 值的变化

Fig. 4 Variation of SVI during stable operation period in two reactors

龄的区别使得粒径、结构、湿密度、颗粒强度以及污泥比重不同, 从而对颗粒的沉降性能也有重要的影响.

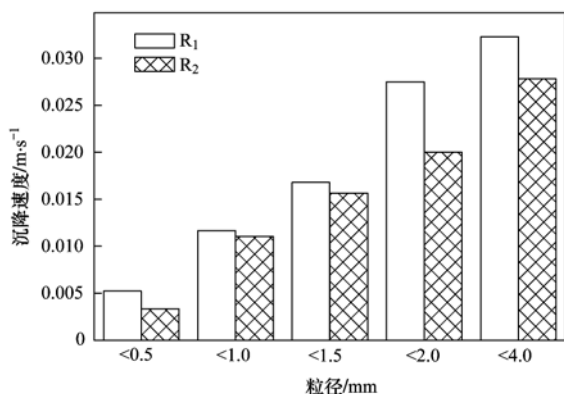
图5 R_1 和 R_2 中不同粒径好氧颗粒污泥的沉降速度

Fig. 5 Settling velocity of aerobic granular sludge with different size in two reactors

2.5 处理效果

2.5.1 反应器对污染物的去除效果

反应器稳定运行期间进水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 TP 分别为 600 、 50 及 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 好氧颗粒对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的去除效果见图 6.

由图 6(a) 可知, 稳定运行期间, 2 种不同颗粒龄的好氧颗粒对 COD 的去除率都保持在 90% 以上, 小颗粒龄的好氧颗粒的出水 COD 浓度在 $38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 而大颗粒龄的好氧颗粒的出水 COD 浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 小颗粒龄的好氧颗粒污泥对 COD 的去除效果更好.

由图 6(b) 可知, 2 种不同颗粒龄的好氧颗粒均具有较好的脱氮能力, 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率均可达到 85% 左右, R_1 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 维持在 $2 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, R_2

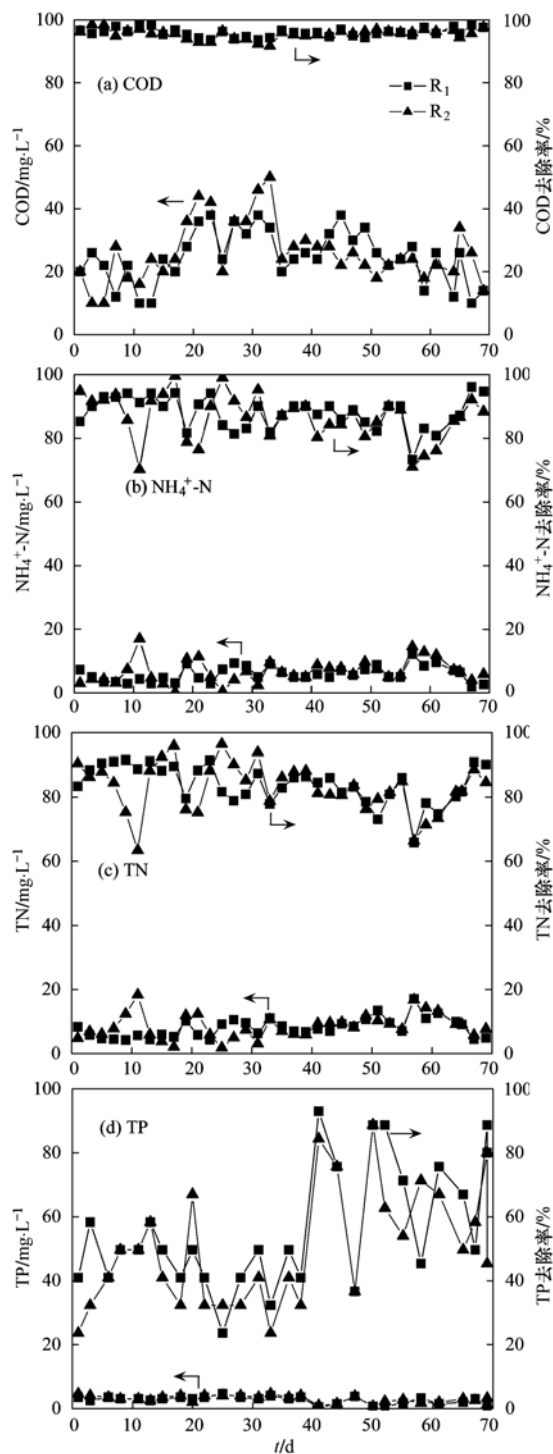
图6 R_1 和 R_2 运行过程中污染物的去除效果

Fig. 6 Performance of two reactors operation for the pollutants removal

出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 维持在 $3 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 小颗粒龄的好氧颗粒污泥对氨氮的去除效果更好更稳定. 分析原因是: 好氧颗粒污泥脱氮的处理效果与颗粒粒径有关^[26,27]. 小颗粒龄的好氧颗粒粒径普遍比大颗粒龄的好氧颗粒粒径小, 比表面积较大, 曝气阶段溶解

氧可迅速扩散到颗粒外层,为硝化反应提供有利条件,使得反应进行较为充分,利于硝化过程的进行。

由图 6(c) 可知, 2 种不同颗粒龄的好氧颗粒对 TN 的去除效果相差不大, 甚至 R_1 对 TN 的去除效果有时会低于 R_2 对 TN 的去除效果, 这主要是因为 R_1 体系中形成的好氧颗粒粒径小, 氧很容易渗透到颗粒内部, 阻碍了反硝化菌的生长, 同时颗粒内部厌氧区域的减少, 也极大地抑止了反硝化反应的进行, 使得硝化反应产物的硝酸盐、亚硝酸盐无法全部转化为 N_2 , 又由于 TN 是 NH_4^+-N 和 NO_x-N 的总和, 所以 NH_4^+-N 和 NO_x-N 的变化同时影响 TN 的变化, 从而影响了 R_1 体系对 TN 的去除效果。

由图 6(d) 可见, 小颗粒龄的好氧颗粒对 TP 的去除率维持在 40% ~ 90%, 而大颗粒龄的好氧颗粒对 TP 的去除率维持在 32% ~ 85%。这可能是由于好氧颗粒内聚磷菌主要分布好氧颗粒内部^[28], 受到好氧颗粒径向扩散的限制。小颗粒龄的好氧颗粒粒径较小, 径向物质扩散阻力较小, 有利于溶解氧和营养物质的传递, 使得 R_1 体系的 TP 的去除效果较 R_2 要高。

2.5.2 好氧颗粒稳定运行期间单个周期的运行特性

图 7(a) 为 R_1 和 R_2 两体系在一个典型周期内 COD 的变化情况。前 30 min R_1 体系中 COD 的降解速率比 R_2 体系快, 此时两体系对 COD 的去除率分别达到 72% 和 69%。运行 60 min 后, 两反应器内都基本完成了对 COD 的降解。

分析原因有: 小粒径的颗粒由于比表面积较大, 在反应前期对 COD 的吸附作用较强。在 COD 总的去除率上, 小颗粒龄的好氧颗粒略好于大颗粒龄的好氧颗粒, 这也论证了颗粒粒径较大限制底物的传质, 不利于对底物的降解。

图 7(b) 为同一个周期内溶解氧的变化情况。前 30 min DO 浓度下降得非常快, R_1 中 DO 浓度比 R_2 中下降得快很多。原因是在反应初期 COD 浓度很高, 碳源丰富, R_1 体系中因为颗粒粒径较小, 基质的传质效果更好, COD 的渗透深度更深, 所以对溶解氧的消耗速率更快。随着反应的进行, COD 浓度下降, 耗氧速率逐渐降低, 反应器中 DO 逐渐提高。反应末期, 由于碳源不足, 微生物又进入饥饿状态, 反应器中的溶解氧均接近饱和。

图 7(c) 为同一周期内 NH_4^+-N 和 TN 的变化情况。周期开始初期, 体系内底物浓度迅速增加, 颗粒污泥表面的硝化菌快速进行硝化反应, 将体系内的

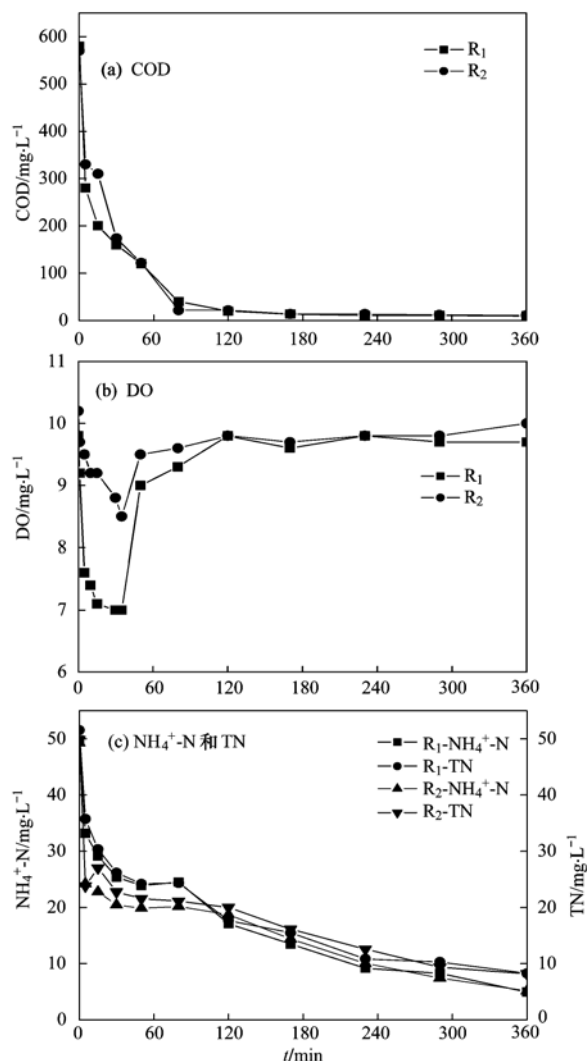


图 7 R_1 和 R_2 典型周期内各污染物浓度变化

Fig. 7 Time profile of the pollutants concentration in a typical cycle of the two reactors

NH_4^+-N 迅速降解。但是在曝气以后的 1 h 内, NH_4^+-N 浓度的下降速度明显慢于 COD 浓度的下降速度, 随着 COD 的逐渐去除, NH_4^+-N 浓度才迅速降低, 说明硝化反应开始进行。这是因为在好氧段开始以后, 颗粒中异养菌与自养菌之间对溶解氧存在竞争, 由于硝化细菌等自养菌群在有机物大量存在时无法占到优势, 因此造成了硝化反应的延迟^[29,30]。两种不同颗粒龄的好氧颗粒对 NH_4^+-N 和 TN 的去除效果相差不大。

2.6 好氧颗粒污泥的活性

在活性污泥法处理技术中, 比耗氧速率 SOUR 是评价污泥微生物代谢活性的一个重要指标。表 1 为 R_1 和 R_2 反应器中对 2 种好氧颗粒的 SOUR 进行的比较。SOUR_H 表示异养菌的比耗氧速率, SOUR_{NH₄}

表示亚硝酸菌的比耗氧速率, $SOUR_{NO_2}$ 表示硝酸菌的比耗氧速率. 由表 1 可见, R_1 体系好氧颗粒的 $SOUR$ 比 R_2 中高, 说明小颗粒龄的好氧颗粒污泥的活性比大颗粒龄的好氧颗粒污泥的活性高.

表 1 R_1 和 R_2 中的 $SOUR / mg \cdot (h \cdot g)^{-1}$

Table 1 $SOUR$ in two reactors/ $mg \cdot (h \cdot g)^{-1}$

类别	$SOUR_H$	$SOUR_{NH_4}$	$SOUR_{NO_2}$
R_1	26.4	14.8	11.2
R_2	25.2	14.4	8.4

3 讨论

好氧颗粒系统崩溃的前兆常表现为: 对污染物的去除能力下降, 颗粒粒径较大, 外观颜色发白, 结构松散, 甚至部分解体, 沉降性能恶化, 微生物活性很低. 试验结果表明, 小颗粒龄的好氧颗粒粒径较小, 结构更加密实, 微生物的活性更高, 对污染物的去除能力也高于大颗粒龄的好氧颗粒. 充分说明小颗粒龄的颗粒污泥的稳定性高于大颗粒龄的颗粒污泥, 即随着系统的运行, 颗粒龄的增加, 系统的稳定性会逐渐降低. 这种“规律性”导致目前的好氧颗粒污泥系统十分脆弱, 不能长期稳定运行, 阻碍了好氧颗粒污泥工艺的实际推广应用.

因此, 如何通过改变操作运行方式, 改良工艺, 从而增强颗粒污泥的稳定性, 减小甚至消除颗粒龄对好氧颗粒污泥稳定性的影响, 成为了颗粒污泥工艺下一阶段的研究重点.

4 结论

(1) 小颗粒龄好氧颗粒的湿密度为 $1.066 g \cdot cm^{-3}$, 污泥比重为 $1.013 g \cdot cm^{-3}$, 物理强度为 98.7%, 平均粒径为 1.9 mm, 沉降速度分布在 $0.005 \sim 0.032 m \cdot s^{-1}$, $SOUR_H$ 、 $SOUR_{NH_4}$ 、 $SOUR_{NO_2}$ 分别为 26.4、14.8 和 $11.2 mg \cdot (h \cdot g)^{-1}$; 大颗粒龄好氧颗粒的湿密度为 $1.026 g \cdot cm^{-3}$, 污泥比重为 $1.010 g \cdot cm^{-3}$, 物理强度为 98.4%, 平均粒径为 2.2 mm, 沉降速度分布在 $0.003 \sim 0.028 m \cdot s^{-1}$, $SOUR_H$ 、 $SOUR_{NH_4}$ 、 $SOUR_{NO_2}$ 分别为 25.2、14.4 和 $8.4 mg \cdot (h \cdot g)^{-1}$. 小颗粒龄好氧颗粒较大颗粒龄好氧颗粒粒径小、结构密实、沉降速度快、微生物活性更高.

(2) 小颗粒龄的好氧颗粒均具有良好的有机物降解能力, 稳定运行期间对 COD 、 NH_4^+-N 及 TP 的去除率分别维持在 90%、85% 和 40%~90%, 降解效率比大颗粒龄的好氧颗粒高. 但两者对 TN 的去除

效果相差不大, 去除率都在 80% 左右. 大颗粒龄的好氧颗粒由于粒径大, 使传质阻力较大, 致使对污染物的降解效率较低.

(3) 随着运行时间的增加, 大颗粒龄的好氧颗粒中有机物向颗粒内部扩散受限, 导致颗粒污泥内部出现空腔, 使其理化性质发生较大的变化, 有机物降解能力降低, 稳定性能也有所降低.

参考文献:

- [1] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al.* Aerobic granulation under the combined hydraulic and loading selection pressures [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7444-7449.
- [2] Wang J F, Wang X, Zhao Z G, *et al.* Organics and nitrogen removal and sludge stability in aerobic granular sludge membrane bioreactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **79**(4): 679-685.
- [3] You Y, Peng Y, Yuan Z G, *et al.* Cultivation and characteristic of aerobic granular sludge enriched by phosphorus accumulating organisms [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [4] Shi X Y, Yu H Q, Sun Y J, *et al.* Characteristics of aerobic granules rich in autotrophic ammonium-oxidizing bacteria in a sequencing batch reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **147**(2-3): 102-109.
- [5] 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.
- [6] Mo Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [7] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S J, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [8] Schwarzenbeck N, Borges J M, Wilderer P A. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **66**(6): 711-718.
- [9] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 919-934.
- [10] Kim I S, Kim S M, Jang A. Characterization of aerobic granules by microbial density at different COD loading rates [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(1): 18-25.
- [11] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Activity and structure of stored aerobic granules [J]. *Environmental Technology*, 2007, **28**(11): 1227-1235.
- [12] Wang X H, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Long-term storage and subsequent reactivation of aerobic granules [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(17): 8304-8309.
- [13] Lee C C, Lee D J, Lai J Y. Amylase activity in substrate

- deficiency aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **81**(5): 961-967.
- [14] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Functional consortium from aerobic granules under high organic loading rates [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3465-3470.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水分析检测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 105-285.
- [16] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 19th ed. Washington: American Public Health Association, 1998.
- [17] 陈雪松, 夏四清, 刘贵春. SBR 好氧颗粒污泥的理化性质研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(9): 99-102.
- [18] 王凯军, 贾立敏. 城市污水生物处理新技术开发与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 5-46.
- [19] Etterer T, Wilderer P A. Generation and properties of aerobic granular sludge[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(3): 19-26.
- [20] Hulshoff Pol L W, De Castro Lopes S I, Lettinga G, *et al.* Anaerobic sludge granulation [J]. *Water Research*, 2004, **38**(6): 1376-1389.
- [21] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程[M]. (第三版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. 95.
- [22] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors[J]. *Environmental Technology*, 2002, **23**(8): 931-936.
- [23] 周军. 两种类型反应器内好氧颗粒污泥性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. 72.
- [24] 龙向宇, 龙腾锐, 唐然. 胞外聚合物及其表面性质对活性污泥沉降性的影响[J]. *城市环境与城市生态*, 2008, **21**(3): 15-20.
- [25] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 273-281.
- [26] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(6): 761-769.
- [27] De Kreuk M K, Picioreanu C, Hosseini M, *et al.* Kinetic model of a granular sludge SBR: influences on nutrient removal[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **97**(4): 801-815.
- [28] 刘丽, 任婷婷, 徐得潜, 等. 高强度好氧颗粒污泥的培养及特性研究[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(4): 360-364.
- [29] Cassidy D P, Belia E. Nitrogen and phosphorus removal from an abattoir wastewater in a SBR with aerobic granular sludge[J]. *Water Research*, 2005, **39**(19): 4817-4823.
- [30] Wang F, Lu S, Wei Y J, *et al.* Characteristics of aerobic granule and nitrogen and phosphorus removal in a SBR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 1223-1227.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人