

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响

熊光城, 濮文虹*, 杨昌柱

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 在 SBR 反应器中以好氧颗粒和絮状活性污泥的混合污泥为接种污泥, 分两阶段进行好氧颗粒污泥的培养. 第一阶段在 3 个 SBR 反应器中分别接种 10%、15% 和 20% 的颗粒; 第二阶段在 3 个反应器中分别接种未经筛分、粒径 ≤ 1 mm 和粒径 > 1 mm 的颗粒, 接种比例均为 20%. 在培养过程中对各反应器中污泥形态、粒径变化、完全颗粒化时间以及有机物的降解能力进行了比较研究并对快速培养的作用机制进行了探讨. 结果表明, 第一阶段培养, 接种比例为 20% 的反应器完全颗粒化时间较短, 仅为 24 d; 第二阶段培养, 接种未经筛分颗粒的反应器完全颗粒化时间较短, 仅为 30 d. 两次培养的好氧颗粒均具有良好的沉降性能和去污效果, SVI 稳定在 $40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下, COD 去除率保持在 90% 以上. 预加好氧颗粒后好氧颗粒的形成过程分为两个阶段: 好氧颗粒加速解体阶段和好氧颗粒解体与快速形成阶段.

关键词: 好氧颗粒污泥; 比例; 粒径; SBR; 快速培养

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1472-07

Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules

XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu

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

Abstract: In the SBR reactor, the mixed traditional activated sludge and aerobic granules were used as seed sludge to cultivate aerobic granular sludge. The whole research can be divided into two phases. In the first stage, different proportions of aerobic granules (ten, fifteen and twenty percent) were added to three SBR reactors, respectively. In the second stage, aerobic granules of different sizes (unscreened, smaller than or equal to 1 mm in diameter, larger than 1 mm in diameter) were added to three SBR reactors with the proportion of twenty percent, respectively. During the cultivation, the morphological change of the sludge, variation of particle size, maturity time and removal rate of pollutants were studied. The mechanism of fast cultivation was also discussed. The results showed that the reactor with twenty percent aerobic granules had the shortest maturity time of 24 days in the first stage and the reactor with unscreened aerobic granules had the shortest maturity time of 30 days in the second stage. All the cultivated aerobic granules had a good settling property and detergency performance, with the SVI distinctly below $40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ and the COD removal rate staying above 90%. The formation of aerobic granules could be divided into two stages: the accelerated disintegration stage and the disintegration and rapid forming stage.

Key words: aerobic granular sludge; proportion; diameter; SBR; fast cultivation

好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)是在好氧条件下,通过微生物自凝聚作用形成的微生物聚集体.与传统活性污泥法相比好氧颗粒污泥具有沉降性能好、含水率低、处理效率高和可同步脱氮除磷等诸多优点,因此近年来好氧颗粒污泥已成为了国内外专家学者的研究热点^[1~5],更有专家学者预测在 21 世纪好氧颗粒污泥会逐步取代活性污泥法成为污水生物处理的主流技术^[6].

目前好氧颗粒污泥是通过接种污泥进行培养的,接种的污泥主要分为 3 种:①絮状活性污泥 目前好氧颗粒大多数都是通过这种方法培养的,但这种培养方法反应器启动时间很长,一般需要 1~2 个月,甚至更长^[7];②厌氧颗粒污泥 与接种絮状

活性污泥相比,培养速度略有加快,但并不明显^[8~11];③好氧颗粒和絮状活性污泥的混合污泥 采用这种方法培养好氧颗粒的文献报道还较少,根据已有的一些资料^[12~16]表明此种方法可以显著加快污泥的颗粒化进程,1 个月内就能实现完全颗粒化,但其快速培养的作用机制尚不清楚.本研究采用人工模拟废水分两次在 3 个 SBR 反应器中分别接种不同比例和不同粒径的好氧颗粒进行好氧颗粒污泥的快速培养.对培养过程中各反应器中的

收稿日期: 2012-07-09; 修订日期: 2012-09-12

作者简介: 熊光城(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: xgc_ok@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wenhongpu@yahoo.cn

污泥形态特征、粒径变化、完全颗粒化时间以及有机物的降解能力进行比较分析,并深入探讨其形成过程和作用机制,旨在为好氧颗粒污泥的快速培养和工程应用提供理论指导和参考。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与运行方案

试验装置如图 1 所示. 试验采用 3 个完全相同的有机玻璃制成的柱状 SBR 反应器(分别编号为 R1、R2 和 R3), 内径 8.4 cm, 有效水深 165 cm, 有效容积 9.1 L, 体积交换率约为 60%. 在反应器底部进行微孔曝气, 反应器每天运行 4 个周期, 每周期时间为 6 h, 其中进水 2 min, 排水 2 min, 沉淀时间为 3 ~ 13 min(随着培养进程逐步缩短), 其余时间曝气. 第一次培养期间气温变化范围为 13 ~ 29℃. 第二次培养期间气温变化范围为 0 ~ 23℃. 两次培养阶段各反应器中接种污泥情况见表 1, 其中比例皆为质量比. 第一阶段接种的好氧颗粒污泥形成条件为 COD 800 mg·L⁻¹、TN 40 mg·L⁻¹、TP 8 mg·L⁻¹. 第二阶段接种的好氧颗粒污泥形成条件为 COD 1 000 mg·L⁻¹、TN 50 mg·L⁻¹、TP 10 mg·L⁻¹. 两次培养接种的絮状活性污泥均取自武汉市龙王嘴污水处理厂曝气池. 第二阶段接种的好氧颗粒的粒径分布见表 2.

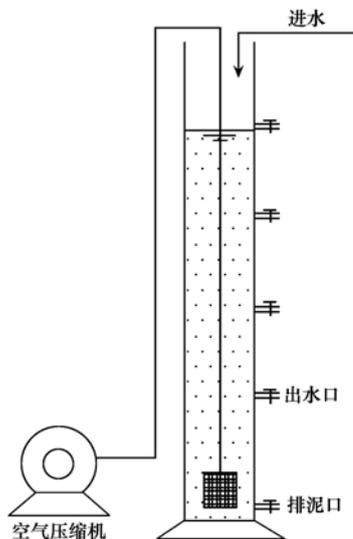


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR system

1.2 进水水质

试验中的进水采用人工模拟废水, 各反应器进水水质完全相同. 其水质指标为 NaAc 1 282 mg·L⁻¹ (COD 为 500、800、1 000 mg·L⁻¹ 根据后续

试验需求调整)、NH₄Cl 191 mg·L⁻¹ (TN 为 50 mg·L⁻¹)、KH₂PO₄ 44 mg·L⁻¹ (TP 为 10 mg·L⁻¹)、MgSO₄·7H₂O 27 mg·L⁻¹、Fe₂(SO₄)₃ 24 mg·L⁻¹、CaCl₂ 150 mg·L⁻¹.

表 1 不同阶段各反应器中接种污泥情况

Table 1 Component of seed sludge in different stages

时期	反应器	好氧颗粒污泥/%	絮状活性污泥/%
第一阶段	R1	10	90
	R2	15	85
	R3	20	80
第二阶段	R1	20	80
	R2	20 ($d \leq 1$ mm)	80
	R3	20 ($d > 1$ mm)	80

表 2 第二阶段接种好氧颗粒的粒径分布

Table 2 Particle size distribution of the aerobic granules for inoculation in the second stage

好氧颗粒粒径	$d > 1$ mm	$d \leq 1$ mm
所占比例/%	41.39	58.61

1.3 分析方法

COD、MLSS 和 SVI 采用国家标准分析方法^[17]测定, 颗粒粒径分布采用标准筛分测定. 用数码相机观察颗粒污泥形态. 污泥的湿密度采用陈雪松等^[18]的测定方法.

污泥沉降速度的测定方法为: 先取一定量的颗粒污泥用标准筛进行筛分, 然后从各粒径范围内随机取 50 ~ 100 粒颗粒污泥, 逐一放入盛满清水的 2 L 量筒(筒高 48 cm)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.

2 结果与分析

2.1 预加不同比例好氧颗粒培养好氧颗粒污泥

本次培养总共历时 24 d. 刚开始培养时由于大部分接种的都是絮状活性污泥, 所以污泥呈黑褐色, 在曝气时可以观察到好氧颗粒在反应器中分布很均匀. 在试验过程中将污泥进行过滤(滤网孔径为 0.3 mm), 过滤前后污泥浓度的比值定义为颗粒化率, 用来表征污泥的颗粒化程度. 培养进行到第 5 d 时观察到 3 个反应器中污泥颜色变淡, 呈现出略微地黄色. 第 6 d 时 3 个反应器中的污泥颜色已经完全变为了淡黄色. 第 7 d 时发现 3 个反应器中均出现了 0.3 mm 以上形状规则、界面光滑清晰的小颗粒. 这与文献[12 ~ 14]的研究结果一致. 反应器运行到第 9 d 观察到有部分较大的颗粒开始解体, 反应器中出现了碎片状的污泥. 经过 15 d 的培养之

后,好氧颗粒已经成为了反应器中污泥的主要存在形式. 为了进一步加速颗粒化的进程,在第 16 d 时培养进入减负荷阶段^[19],将进水 COD 从 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器运行至 24 d 时,R3 中污泥 MLSS 达到 5 700 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,颗粒化率达到 96% 左右,基本实现了完全颗粒化. 此时 R3 中颗粒的平均粒径约为 1.5 mm,沉降速度为 39.5 $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$,湿密度为 1.058 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,SVI 为 19.3 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 这表明预加好氧颗粒培养出的好氧颗粒污泥结构密实,沉降性能良好. 反应器 R1 和 R2 中污泥的颗粒化率也分别达到了 87% 和 71% 左右,不过其 MLSS 分别为 1 802 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3 167 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,R1 中污泥浓度远低于 R2,所以综合来看 R2 的培养效果优于 R1.

培养过程 3 个反应器中污泥的 MLSS 和 SVI 变化情况见图 2. 其中显示在培养初期,3 个反应器中的 MLSS 相差不大. 运行至第 9 d 将沉降时间降为 5 min 之后,3 个反应器中的 MLSS 出现了明显的差别. 3 个反应器中 MLSS 情况为 R3 > R2 > R1. 此后 3 个反应器中的 MLSS 一直保持了这种规律直到培养结束. 从 3 个反应器中污泥的 SVI 变化情况可以看出,R3 反应器中 SVI 从第 9 d 之后明显低于 R1 和 R2 反应器. 这说明在第 9 d 之后 R3 反应器中污泥的沉降性能明显优于 R1 和 R2. 分析原因是预加入好氧颗粒之后,大量的絮状活性污泥富集在好氧颗粒表面生长. 由于好氧颗粒的沉降性能明显优于絮状活性污泥,大量絮状活性污泥富集在好氧颗粒的表面之后,就会使得污泥系统的整体沉降性能变好,而接种的好氧颗粒的量越多,好氧颗粒表面的絮状活性污泥就会越多,从而污泥系统的整体沉降性能就会越好.

2.2 预加不同粒径好氧颗粒培养好氧颗粒污泥

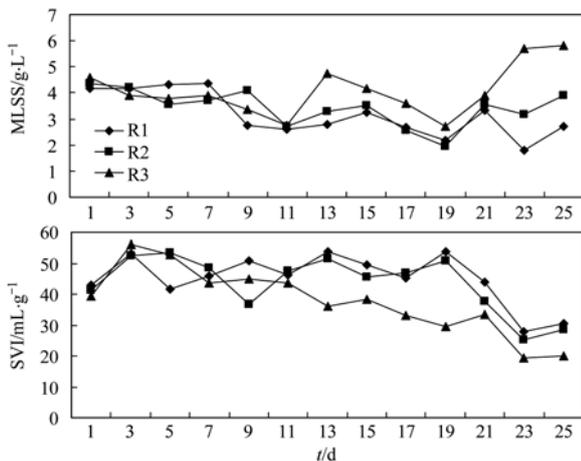


图2 培养第一阶段反应器中 MLSS 和 SVI 变化
Fig. 2 Changes of MLSS and SVI in the first stage

本试验 3 个反应器中接种比例相同,采用第一步试验所得的较优接种比例 20%. 在各反应器中分别预加不同粒径好氧颗粒研究其对好氧颗粒污泥形成的影响,整个培养过程历时 30 d.

培养过程中定期观察污泥的形态变化. 污泥形态变化见图 3. 从中可以看出在培养过程中污泥颜色逐步从黑褐色变为淡黄色,最后变为黄褐色. 接种的好氧颗粒形状规则,有清晰、光滑的外廓. 随着培养的进行,好氧颗粒的表面不再光滑,形状也开始变得不规则,通过肉眼可以明显地观察到大量絮状活性污泥富集在好氧颗粒表面进行生长. 推测原因可能一方面好氧颗粒是多孔状结构^[20]具有极大的吸附性能,另一方面好氧颗粒表面具有较高的疏水性^[21],而较高的疏水性将诱导细胞间相互结合^[22],此外好氧颗粒是一个微生物聚合物,而絮状活性污泥也是微生物,它们之间有很好的相容性,所以絮状活性污泥很容易在好氧颗粒的表面富集生长. 在培养的第 9 d,3 个反应器中颗粒污泥不同程度地发生了解体. 在 19 d 时对 3 个反应器中的解体颗粒污泥进行了拍照,见图 4. 解体后的好氧颗粒呈壳片状,部分还未解体的好氧颗粒形状也极其不规则. 推测原因可能为大量的絮状活性污泥富集在好氧颗粒表面生长,将好氧颗粒表面的孔道堵塞,使得营养物和溶解氧均不能渗透到颗粒的内部,这样颗粒内部的微生物就会发生自溶现象^[23],从而形成空洞. 随着空洞的逐步扩大,最终在剪切力的作用下,好氧颗粒解体. 3 个反应器均观察到了大量的解体颗粒污泥碎片,这说明预加入的好氧颗粒无论是大颗粒还是小颗粒在培养过程中都出现了解体现象. 这与部分研究学者^[12~14]得出的结论不符. 随后在培养的过程中颗粒污泥碎片逐渐减少,污泥颗粒化率逐步提高. 解体后的好氧颗粒和絮状活性污泥一起在剪切力等选择压作用下逐步形成新的好氧颗粒污泥^[24]. 在 30 d 时 3 个反应器污泥的颗粒化率分别达到了 94%、70% 和 87% 左右. R1 反应器污泥基本实现了完全颗粒化,R2、R3 反应器还需进一步培养. 综合来看培养效果是 R1 优于 R3 优于 R2. R1 完全颗粒化时间较第一次培养略长,这可能是因为第二次培养时气温较第一次低,污泥驯化生长较慢.

反应器培养过程中各反应器污泥浓度和沉降性能变化见图 5. 从中可以看出整个培养过程中 3 个反应器 MLSS 和 SVI 变化情况基本上是同步的. 反应器启动时污泥浓度均为 5 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在培养初

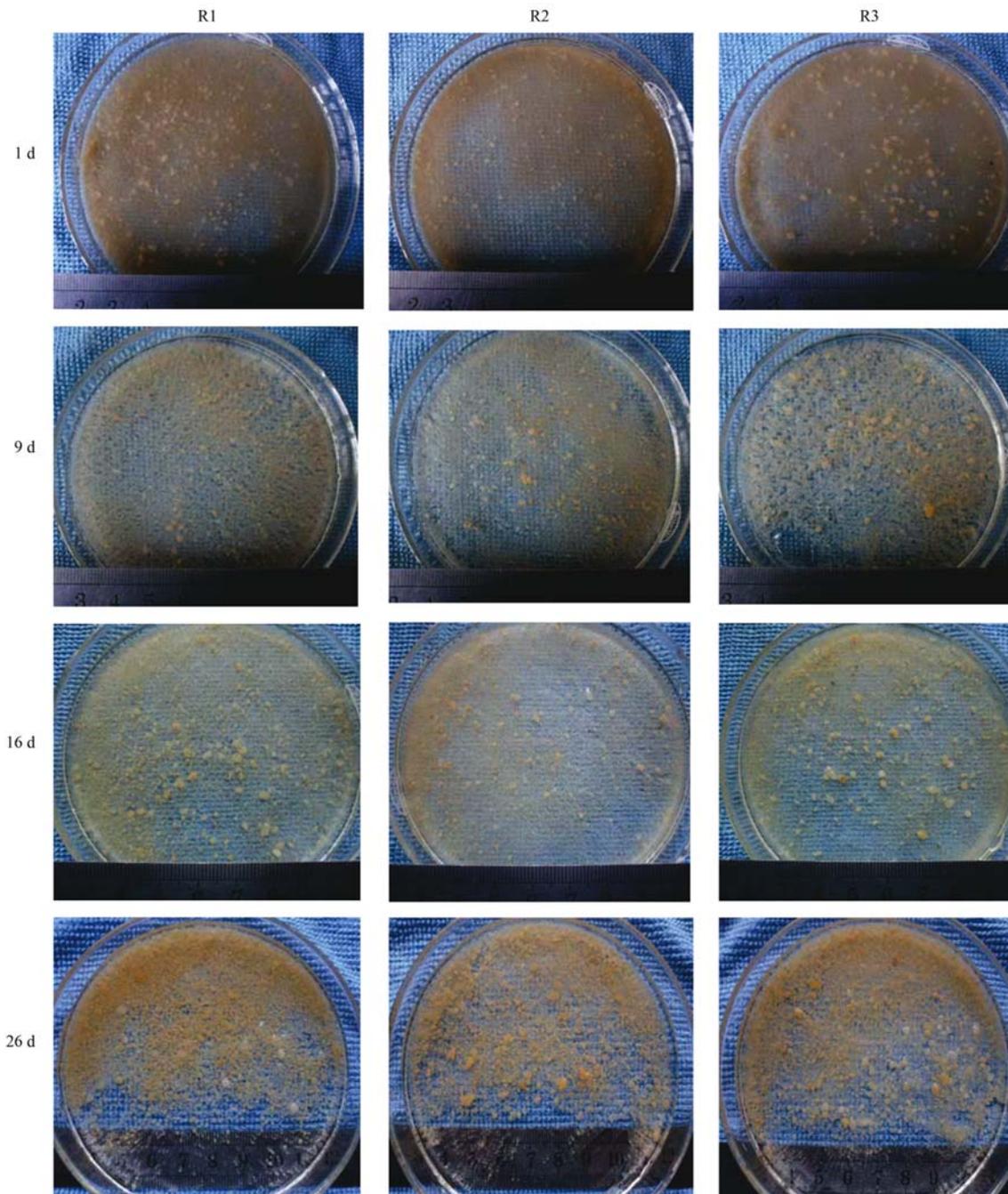


图3 不同时期反应器中污泥形态

Fig. 3 Sludge morphology at different stages in the reactor

期由于絮状活性污泥的大量生长,造成污泥整体沉降性能恶化,SVI从开始的 $40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至接近 $70 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,导致大量污泥被排出反应器造成MLSS有所下降,3个反应器污泥浓度均降至 $3\,500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.之后一方面好氧颗粒不断解体,另一方面絮状活性污泥却在剪切力的作用下沉降性能不断改善,这样在逐渐缩短沉降时间的时候使得污泥浓度波动比较明显.第23 d时将沉降时间缩短为3 min,同时培养进入减负荷阶段,进水COD从1 000

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降为 $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时污泥沉降性能出现短暂恶化,污泥浓度下降至 $3\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,SVI升高至 $55 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右.随后随着颗粒化率的不断提高,反应器中的MLSS迅速升高,SVI逐渐降低,最终MLSS稳定在 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,SVI稳定在 $40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下.

由图6可知在整个培养过程中3个反应器对COD的去除效果相差不大,COD去除率一直稳定在90%以上,这表明好氧颗粒污泥和好氧颗粒与絮状

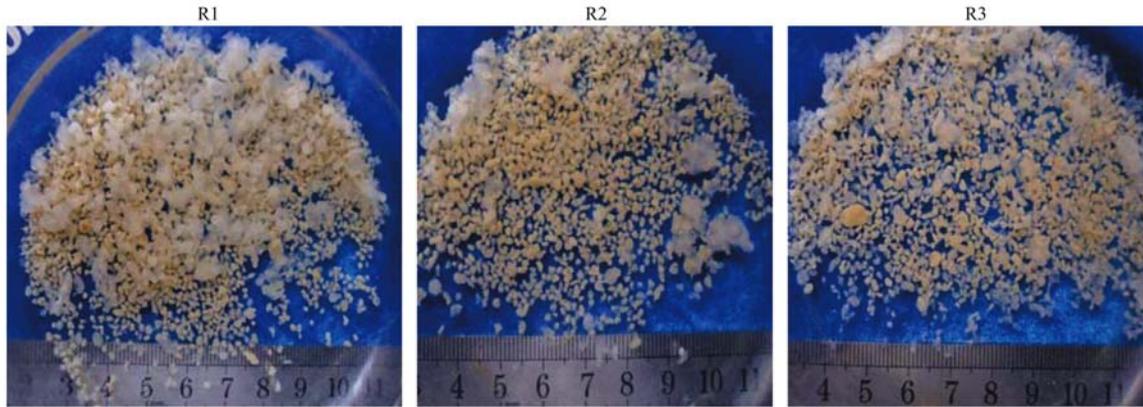


图 4 解体中的好氧颗粒污泥

Fig. 4 Disintegration of aerobic granular sludge

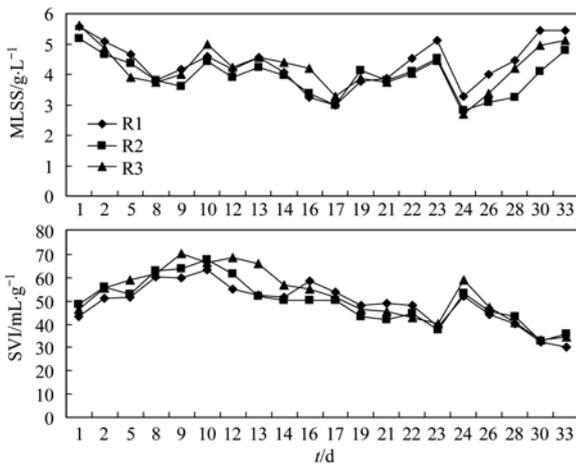


图 5 培养第二阶段反应器中 MLSS 和 SVI 变化

Fig. 5 Changes of MLSS and SVI in the second stage

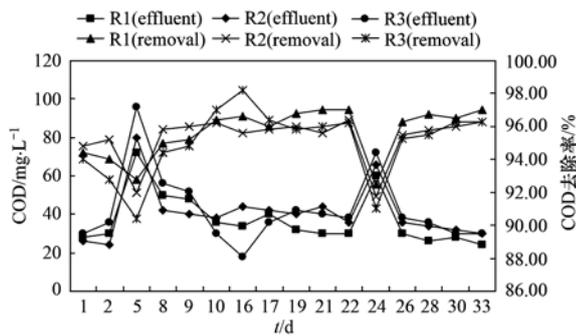


图 6 培养第二阶段反应器 COD 去除效果

Fig. 6 COD removal performance in the second stage

活性污泥的混合污泥都对 COD 具有较好的去除效果. 在第 5 d 和 24 d 时 3 个反应器出水 COD 浓度均较高,可能是由于污泥浓度大幅下降所致.

培养的过程中也对各反应器的颗粒化率和 1 mm 以上颗粒百分比进行了测定,如图 7 所示. 在培养的前 9 d 内 3 个反应器中的颗粒化率一直稳步升高. 推测原因为一方面随着沉降时间的缩短,选择

压的加大,部分絮状活性污泥被排出了反应器;另一方面大量的絮状活性污泥被富集在了好氧颗粒表面. 在第 9 d 时颗粒化率从高到低依次为 R2、R1 和 R3. 这可能是因为 3 个反应器中接种的颗粒污泥粒径不同所致. 相对于小颗粒而言大颗粒更容易解体,因此第 9 d 时 R3 中出现解体的颗粒污泥最多,R2 中最少. 但是此时 3 个反应器颗粒化率并没有出现很明显的差别,这可能说明在被大量絮状活性污泥堵塞孔道之后虽然大颗粒出现解体的概率较高,但这种差别并不是很明显. 这与传统好氧颗粒污泥的解体情况显然不同^[25~28]. 从第 10 d 左右之后 R1 中的颗粒化率一直保持最高,第 19 d 时 R3 中的颗粒化率首次超过 R2,之后一直保持在 R2 之上. 推测原因为 R2 中好氧颗粒集中解体时间略晚于 R3,使得 R3 中颗粒污泥快速形成阶段开始时间早于 R2,从而导致 R2 中颗粒化率在后期被 R3 超过. 在培养过程中 1 mm 以上颗粒百分比 R2 始终处于最低,R3 中 1 mm 以上颗粒百分比在培养前期一直

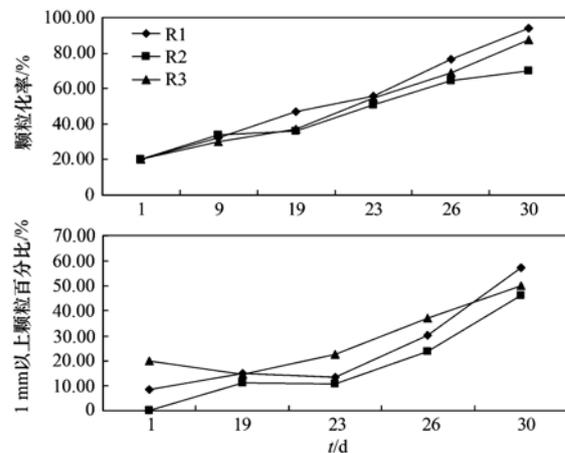


图 7 培养第二阶段反应器中粒径分布变化情况

Fig. 7 Particle size distribution in the second stage

保持最高,但在培养后期 R1 逐步超过了 R3. 因为 R1 中接种的为未经筛分的颗粒污泥,大颗粒和小颗粒并存,这样就不会出现颗粒集中解体的现象,从而导致 R1 反应器中的污泥浓度在培养后期一直保持稳定,较高的污泥浓度更有利于颗粒污泥的形成,所以 R1 的颗粒化率在培养后期会超过 R3,最终以最短的时间实现完全颗粒化.

3 讨论

部分学者^[12-14]对预加好氧颗粒可以加速颗粒化进程的机制进行了一定的探索. 他们的研究表明预加入的好氧颗粒无须经历破碎过程,加入颗粒中的部分小颗粒可以通过聚集微生物形成大颗粒使得较大颗粒形成较快,从而可以大大缩短好氧颗粒的培养过程. 而本研究第一部分试验表明预加入的好氧颗粒在培养过程中发生了解体,第二部分试验则证明了大颗粒和小颗粒在培养过程中均发生了解体. 因为预加入的好氧颗粒在培养过程中如果只是大颗粒发生解体,那么由于在培养过程中大颗粒需经历先解体然后以其解体碎片作为晶核形成较大颗粒直至培养成熟这一过程,而小颗粒不需经过解体阶段,其可以直接作为晶核形成较大的颗粒直至培养成熟,所以这样就可以推测出接种小颗粒最多的反应器启动时间应该最短. 而这与第二部分的试验结果显然不符.

综合本研究中的试验现象和结果可知预加好氧颗粒可以加速颗粒化进程的作用机制就是预加的好氧颗粒在好氧颗粒污泥的培养过程中充当了载体作用. 预加好氧颗粒后好氧颗粒污泥的培养过程可以分为以下两个阶段.

第一阶段为好氧颗粒的加速解体阶段. 这一阶段大量的絮状活性污泥会富集在预加入的好氧颗粒表面进行生长. 这样一方面会使得反应器中污泥系统的整体沉降性能得到改善,另一方面当富集在好氧颗粒表面的大量絮状活性污泥生长到一定程度之后,好氧颗粒表面的孔道就会被堵塞,使得营养物和溶解氧不能渗透到颗粒的内部,导致颗粒内部微生物出现自溶现象. 这一阶段大概历时 9 d 左右,经过 5 d 左右的培养絮状活性污泥就会由黑褐色变为淡黄色,好氧颗粒在这一阶段粒径会有略微的增大,颗粒表面变得不再圆滑.

第二阶段为好氧颗粒的解体和快速形成阶段. 这一阶段形成了中空结构的好氧颗粒在剪切力等作用下发生解体. 解体之后,絮状活性污泥又会富集

在好氧颗粒解体碎片上生长,最后在剪切力等选择压的作用下逐步实现颗粒化. 这一阶段大概历时 15 ~ 20 d 左右,此阶段反应器中污泥的颗粒化率不断提高.

4 结论

(1) 采用预加好氧颗粒这种方法培养好氧颗粒污泥时,预加好氧颗粒的比例越大,培养速度越快.

(2) 接种比例相同时预加未经筛分的好氧颗粒培养好氧颗粒污泥较预加粒径 > 1 mm 或 ≤ 1 mm 的培养效果更好.

(3) 预加入的好氧颗粒无论是大颗粒还是小颗粒在培养过程中均发生了解体.

(4) 预加好氧颗粒这种方法培养好氧颗粒污泥培养过程可以分为两个阶段:好氧颗粒加速解体阶段和好氧颗粒解体和快速形成阶段.

参考文献:

- [1] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22** (7): 533-563.
- [2] 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.
- [3] 周曼, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 896-902.
- [4] 苏馈足, 邓秀坤, 郑丽, 等. 好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2773-2779.
- [5] 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.
- [6] De Bruin L M M, De Kreuk M K, Van der Roest H F, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49** (11-12): 1-7.
- [7] Morgenrth E, Sherden T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [8] 胡林林, 王建龙, 文湘华, 等. SBR 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 74-77.
- [9] Hu L L, Wang J L, Wen X H, *et al.* The formation and characteristics of aerobic granules in sequencing batch reactor (SBR) by seeding anaerobic granules [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(1): 5-11.
- [10] 蔡建波. 好氧颗粒污泥的优化培养研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006. 49-61.
- [11] 王震, 何青, 赵晴, 等. 好氧颗粒污泥技术用于味精废水处理的研究 [J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(5): 1-4.
- [12] 杨麟. 好氧颗粒污泥快速培养及其去除生物营养物特性的研

- 究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007. 37-60.
- [13] 沈祥信, 李小明, 杨麟, 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.
- [14] 廖青, 李小明, 杨麟, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养以及胞外多聚物对颗粒化的影响研究[J]. 工业用水与废水, 2008, **39**(4): 13-19.
- [15] 汪浩东. 低温条件下好氧颗粒污泥快速培养及其稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 18-31.
- [16] 宋志伟, 潘月军, 程晓霞, 等. 接种污泥对好氧污泥颗粒化影响的实验研究[J]. 黑龙江科技学院学报, 2011, **21**(1): 6-15.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水分析监测方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 105-285.
- [18] 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.
- [19] 史晓慧, 刘芳, 刘虹, 等. 进料负荷调控培养好氧颗粒污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1026-1032.
- [20] Zheng Y M, Yu H Q. Determination of the pore size distribution and porosity of aerobic granules using size-exclusion chromatography[J]. Water Research, 2007, **41**(1): 39-46.
- [21] 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.
- [22] Liu Y, Wang Z W, Tay J H. A unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. Biotechnology Advances, 2005, **23**(5): 335-344.
- [23] 田永强. 微生物自溶现象研究进展[J]. 微生物学杂志, 1997, **17**(2): 52-60.
- [24] 王新华, 张捍明, 杨凤林, 等. 解体好氧颗粒污泥修复[J]. 大连理工大学学报, 2010, **50**(2): 183-187.
- [25] 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.
- [26] Tay J H, Pan S, He Y, *et al.* Effect of organic loading rate on aerobic granulation. I: Reactor performance [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(10): 1094-1101.
- [27] Li Z H, Kuba T, Kusuda T. The influence of starvation phase on the properties and the development of aerobic granules [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **38**(5): 670-674.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行