

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)

铝盐混凝除磷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,张洪助(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)

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

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 在 3 个 SBR (R1、R2、R3) 中分别培养好氧硝化颗粒污泥, R1 和 R2 分别采用进水氮负荷交替变化和进水碳氮负荷同步交替变化这 2 种新的培养方式, R3 采用传统的逐步提高氮负荷法. 对 R1、R2 和 R3 培养得到的硝化颗粒污泥在物理性状、污染物去除效能等方面进行对比分析. 结果表明, R1 和 R2 的培养方式明显缩短了培养时间, 70 d 左右成功培养出完全意义上的硝化颗粒(硝化菌的活性超过异养菌的活性), 而 R3 需 147 d. 采用进水碳氮负荷同步交替变化法快速培养出的颗粒外形更规则、硝化菌活性更高、脱氮性能更优, 稳定运行时氨氮和总氮去除率分别为 95% 和 70% 左右, 在理化性状和脱氮性能上明显优于其他 2 种. 对比发现, 在硝化颗粒污泥培养初期, 适当提高进水有机负荷, 能加快颗粒的形成及生长.

关键词: 好氧硝化颗粒; 氮负荷; 有机负荷; 交替变化; 快速培养

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1464-08

Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method

SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, LUO Ying-dong

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

Abstract: The nitrifying granular sludge was cultivated in three Sequencing Batch Reactors (SBR), R1, R2 and R3, respectively. There were two new cultivating methods applied in R1 and R2, which alternately changed the influent nitrogen loading and the influent carbon and nitrogen loading, respectively. The traditional method of step-increasing nitrogen loading was adopted in R3. The results showed that the full-sense nitrifying granular sludge could be cultivated successfully after 70 days in R1 and R2, while it took 147 days in R3. The denser granules with higher activity of nitrifying bacteria and better denitrifying performance could be rapidly obtained by alternately changing the influent carbon and nitrogen loading simultaneously. The removal rates of ammonia nitrogen and total nitrogen were about 95% and 70%, respectively, under the stable operation conditions. Overall, the physical and chemical properties of granules and the performance of denitrification were outstanding in R2. From the comparison results, it indicates that the increasing influent organic loading can speed up the formation of granules and their growth at the early cultivation stage.

Key words: aerobic nitrifying granular; nitrogen loading; organic loading; alternant change; rapid cultivation

近几年来有关硝化颗粒污泥的研究报道越来越多^[1-4], 目前国内外普遍采用逐步提高进水氮负荷的方法培养硝化颗粒污泥^[5-13]. 但该方法培养硝化颗粒污泥所需时间较长, 一般需 160 d 左右才能成功培养出完全意义上的硝化颗粒, 且培养成熟的颗粒粒径较小(1.2 mm 左右), 总氮去除效果不理想^[11-13], 限制了硝化颗粒污泥在处理高氨氮废水实际应用上的发展.

硝化菌是一种世代时间较长的自养菌, 对环境因子极为敏感, 细菌的生长和代谢通过一系列的生化反应得以实现, 生化反应绝大多数属于酶催化下的可逆反应, 无论反应过程多么复杂, 始终遵循着多体系化学平衡的基本规律, 即化学平衡移动原理^[11]. 因此反应条件发生变化时, 菌群就会调节自身的呼吸代谢途径, 以达到适应该微环境为止, 而一旦适应了这种稳定的环境, 回归平衡, 菌群活性又会降低. 所以要不断地给颗粒中菌种提供一个动态变

化环境, 使硝化菌的活性持续递增, 活性大大提高.

本研究结合硝化菌的生长特性, 采用 2 种新的培养措施, 即在 SBR 反应器中, 以进料负荷作为主要控制参数, 在好氧硝化颗粒污泥培养初期, 采用进水氮负荷交替变化和进水碳氮负荷同步交替变化这 2 种新的培养方式, 以期在较短时间内培养出好氧硝化颗粒. 考察了碳负荷交替变化和氮负荷交替变化的动态环境对异养菌和硝化菌活性的影响. 同时将所培养的硝化颗粒污泥与目前普遍采用的逐步提高氮负荷法培养的颗粒污泥在物理性状、污染物去除效能等方面进行对比分析, 探讨了交替负荷法培养好氧硝化颗粒污泥的优越性.

收稿日期: 2012-07-03; 修订日期: 2012-09-25

作者简介: 沈娜(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: Lucky_sn123@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: wenhongpu@yahoo.cn

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方案

在实验室条件下,采用 2 种不同的进料方式培养好氧硝化颗粒污泥,本试验所用的装置为圆柱形 SBR 反应器:高 200 cm,内径 8.4 cm,有效容积 9 L. 反应器底部装有曝气装置,为污泥系统提供溶解氧和搅拌的动力. 温度控制在 20℃ 左右,曝气强度以满足颗粒污泥能够完全悬浮于反应器内,溶解氧在 4.0~7.0 mg·L⁻¹ 内变化,pH 控制在 7.0~9.0 范围内. 试验装置如图 1 所示.

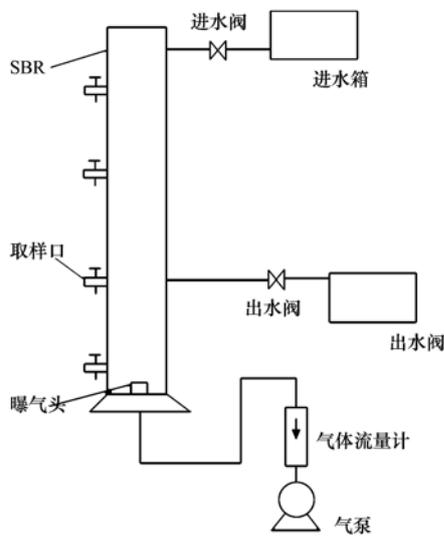


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Sketch map of the SBR

接种污泥取自传统市政污水处理厂——武汉市龙王嘴污水处理厂. 好氧硝化颗粒污泥的培养过程经历 150 d,每天运行 4 个周期,每个周期 6 h,包括进水、曝气、沉淀、排水这 4 个阶段,其中进水 1 min(停曝);排水 2 min;沉淀时间随着污泥的颗粒化逐步缩短:0~7 d 为 20 min,8~42 d 为 10~5 min,43~125 d 为 4 min,126 d 以后为 3~2 min,其余时间进行曝气. 换水率为 60%.

1.2 分析方法

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 及 TN 均采用国家标准分析方法测定^[14]; 污泥浓度采用标准重量法测定; 颗粒污泥粒径分布采用标准筛分测定; 使用数码照相机观察和记录颗粒形态,蛋白质测定采用考马斯亮蓝试剂法,多糖测定采用蒽酮试剂法; SOUR_H、SOUR_{NH₄} 和 SOUR_{NO₂} 分别代表异养菌,氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂)的比耗氧速率,测定采用标准方法^[15].

1.3 进水水质

进水为人工模拟合成废水,分别以醋酸钠,氯化铵为进水碳源和氮源,R1 进水 COD 控制在 500 mg·L⁻¹后增加至 800 mg·L⁻¹(在试验过程中为保持反应器内有足够的生物量,故后期进水 COD 浓度增加至 800 mg·L⁻¹,具体原因见 2.3 节的说明). N/COD 在 10/100、20/100 及 30/100 之间交替变化; R2 进水 COD 浓度在 500、800 和 1 000 mg·L⁻¹之间交替变化,同时 N/COD 在 10/100、20/100 及 30/100 之间交替变化; R3 进水 COD 控制在 500 mg·L⁻¹后增加至 800 mg·L⁻¹,N/COD 由 5/100~30/100 逐步提高. 磷酸二氢钾 40 mg·L⁻¹,氯化钙 150 mg·L⁻¹,硫酸铁 30 mg·L⁻¹,碳酸钠浓度等于氯化铵浓度,具体操作见表 1 和表 2(其中 N/COD 表示进水氨氮浓度和进水 COD 浓度的比值).

表 1 R1 和 R2 进水 N/COD 的具体操作

| 运行天数 <i>t</i> /d | R1 (N/COD) | R2 (N/COD) |
|------------------|---------------|---------------|
| 1~11 | 10/200~25/500 | 10/200~25/500 |
| 12~14 | 50/500 | 100/1 000 |
| 15~17 | 100/500 | 160/800 |
| 18~22 | 150/500 | 150/500 |
| 23~25 | 100/500 | 160/800 |
| 26~28 | 50/500 | 100/1 000 |
| ... | ... | ... |
| 74~88 | 320/800 | 320/800 |
| 89~91 | 200/800 | 300/1 000 |
| 92~133 | 240/800 | 240/800 |
| 134~150 | 150/500 | 240/800 |

表 2 R3 进水 N/COD 的具体操作

| 运行天数 <i>t</i> /d | R3 (N/COD) |
|------------------|---------------|
| 1~11 | 10/200~25/500 |
| 12~17 | 50/500 |
| 18~27 | 75/500 |
| 28~45 | 100/500 |
| 46~64 | 125/500 |
| 65~73 | 150/500 |
| 74~91 | 320/800 |
| 92~150 | 240/800 |

2 结果与讨论

2.1 污泥形态变化

以 R2 反应器内污泥的发育情况为例,依据污泥形态的变化和污染物去除效率的稳定性,培养过程可分为 4 个阶段(见表 3),各个阶段 R2 中污泥的颜色及形态变化如图 2 所示,污泥外观颜色逐渐加深,第 17 d,首次发现粒径为 0.3 mm 左右的细小颗

粒,成熟后的颗粒最大粒径约为 5.0 mm.

表 3 R2 中好氧硝化颗粒污泥发育过程

| 运行阶段 | 絮体 积累期 | 初生颗粒 形成期 | 颗粒 成长期 | 颗粒 成熟期 |
|---------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 运行天数/d | 1~14 | 15~42 | 43~130 | 131~150 |
| 污泥颜色 | 灰黑色 | 土黄色 | 棕黄色 | 棕黄色 |
| 颗粒直径/mm | — | 0.3~0.6 | 0.6~1.8 | >1.8 |

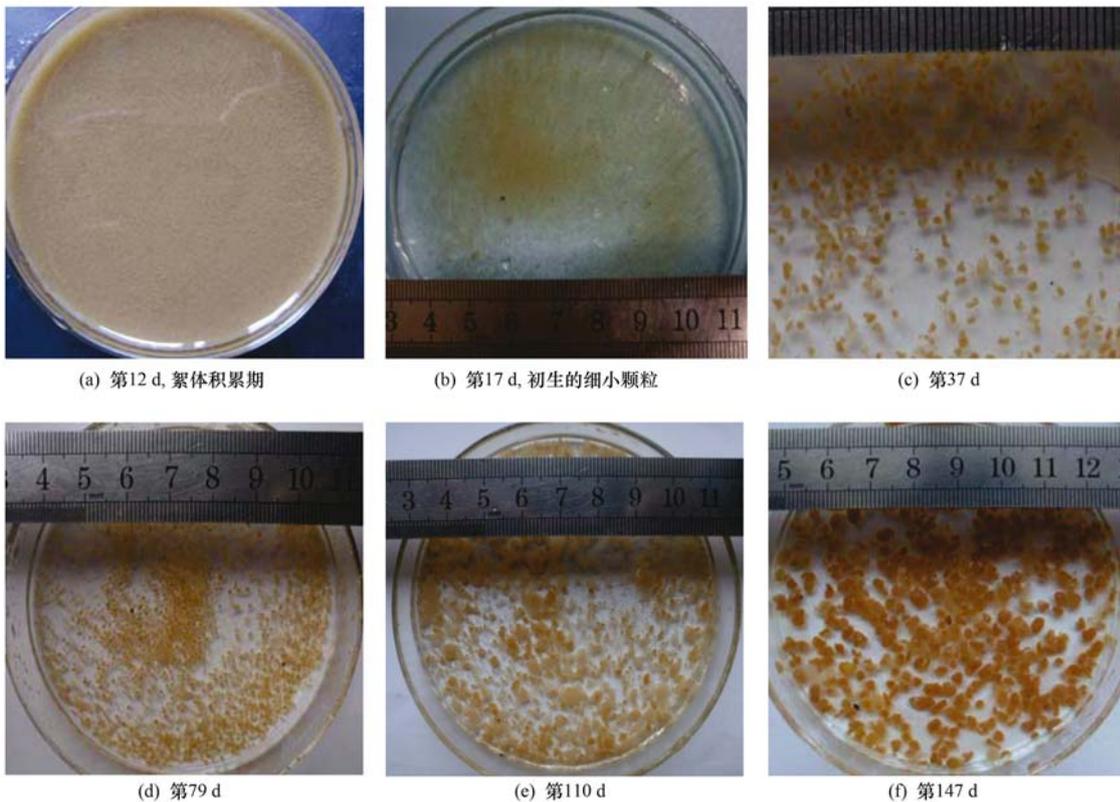


图 2 R2 中不同运行阶段的好氧颗粒污泥

Fig. 2 Aerobic granular sludge at different stages of the development process in R2

如图 4 所示,培养前 100 d 内,3 个反应器中的硝化颗粒处于缓慢的稳步增长状态,R2 中颗粒平均粒径最大,可能与其进水 COD 浓度交替变化有关.进水 COD 浓度由原来的 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高至 $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,R1、R2 和 R3 中硝化颗粒增长速率极快,30 d 内平均粒径由原来的 0.5 mm 增大至 1.8 mm. 第 131 d 后,R1 和 R3 中的颗粒粒径分别稳定在 2.0 mm 和 1.8 mm 左右,但 R2 中的平均颗粒粒径反而减小,这是因为第 131 d,R2 中粒径在 4.0 mm 以上的颗粒所占质量分数达 22.27%,但在第 142 d 所占质量分数锐减至 8.99% (见图 5),但粒径在 0.3~0.6 mm 范围内的颗粒所占质量分数由原来的 0.25% 陡增至 19.81%. 主要是由于第 92~142 d,R2 进水氨氮负荷长期维持在 $0.43 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,而之前 R2 中的颗粒污泥只是短暂地

如图 3(a),明显可见培养第 80 d,R1 和 R2 相对于 R3 的颗粒化程度更高.图 3(b)是第 131 d,成熟期内 3 个反应器中粒径为 4.0 mm 的颗粒污泥外观对比图,可以看出 R2 中培养的颗粒外形更规则,边界光滑清晰,呈球形;而 R1 和 R3 中培养的颗粒形状较不规则,主要呈球状,椭球状和杆状.

(3 d)处于高氨氮负荷条件下,菌群不适应这种长期的高氨氮负荷环境,生长繁殖受抑制,粒径在 4.0 mm 以上的大颗粒分解成小颗粒,导致系统的平均粒径减小,由原来的 1.8 mm 减小至 1.2 mm. 后期经过 10 d 的驯化 R2 中平均粒径又恢复至 1.8 mm 左右.说明在氨氮交替变化培养方式下形成的颗粒污泥耐长期高氨氮负荷能力较弱,但只需短期地驯化便能在长期高氨氮负荷环境下达到稳定状态.

2.2 硝化颗粒菌群活性的比较

如图 6 所示,运行第 70 d,R1 和 R2 中硝化菌活性超过异养菌活性成为颗粒中真正的优势菌,完全成为狭义定义上的硝化颗粒.而 R3 直到第 147 d,硝化菌活性才超过异养菌活性成为狭义定义上的硝化颗粒(硝化菌的活性超过异养菌的活性).第 78~101 d,3 个反应器中的硝化菌活性逐步降低,甚

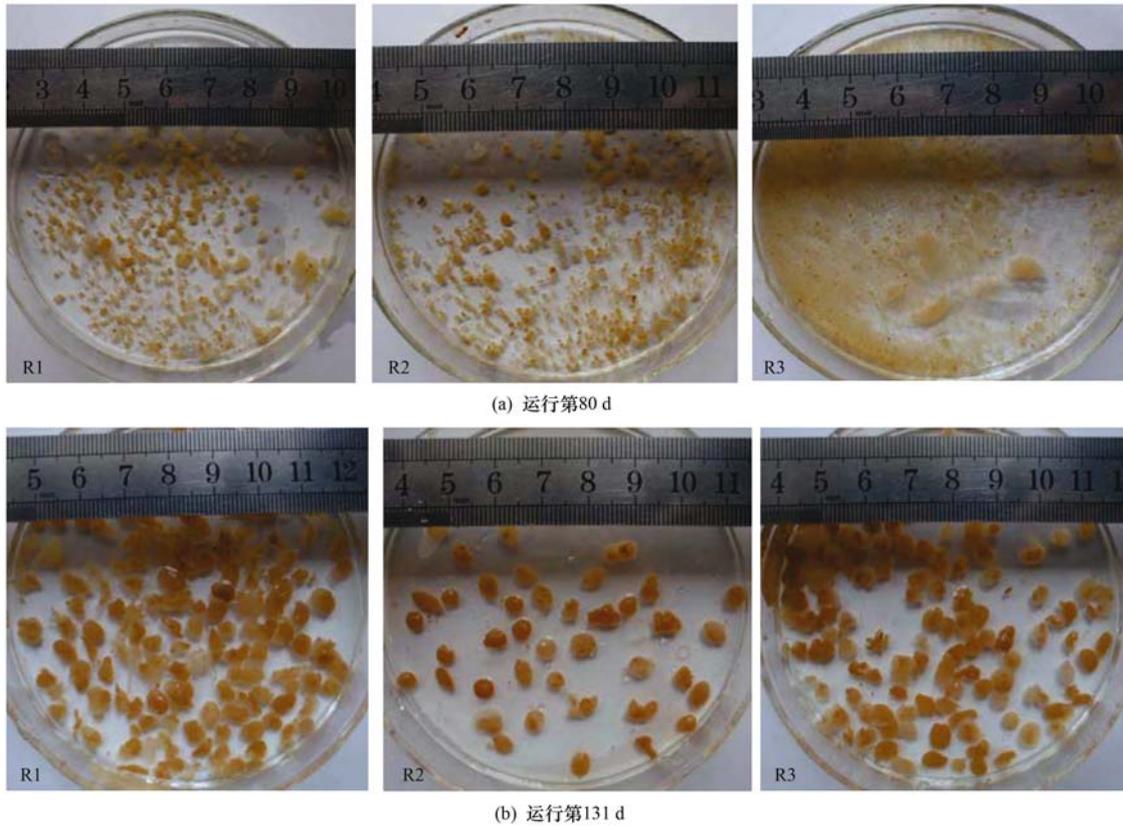


图3 R1、R2 和 R3 中颗粒污泥的外观形态

Fig. 3 Appearance of granules in R1, R2 and R3 on day 80 and day 131

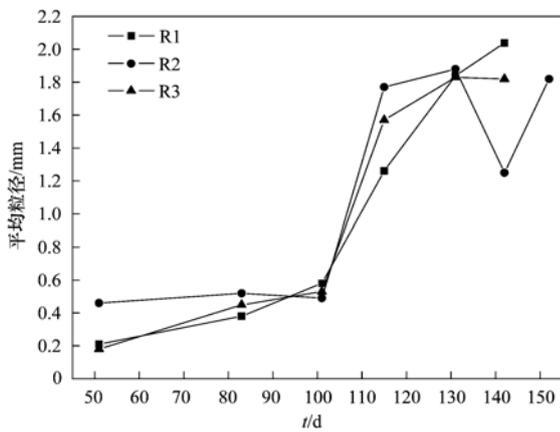


图4 R1、R2 和 R3 中颗粒平均粒径的变化

Fig. 4 Variations of the average granule size in R1, R2 and R3

至低于异养菌的活性. 这是由于 3 个反应器内的菌群经历了一个为期 14 d 的高氨氮负荷环境, 进水氨氮浓度均达到 $320 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮负荷达 $0.58 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 抑制了硝化菌的活性^[16], 第 101 d 后, 由于进水氨氮负荷减小, 硝化菌活性逐渐恢复. R2 从第 92 d 后进水 N/COD 恒定, 异养菌和硝化菌活性呈先递增后下降的趋势, 进一步证实了在长期稳定的运行状态下, 菌群逐渐适应了这种环境, 硝化

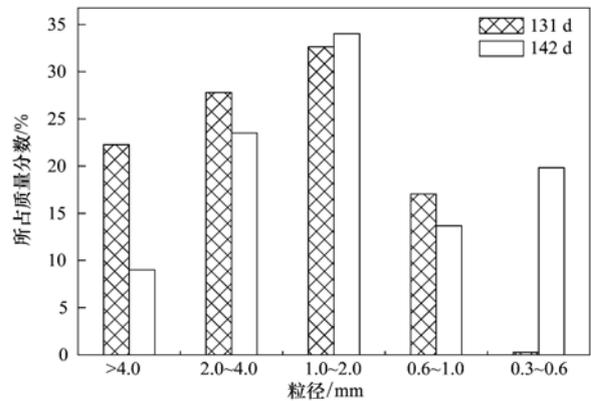


图5 R2 中各粒径分布图

Fig. 5 Granule size distribution in R2

菌活性会逐步降低最终趋于稳定.

第 133 d, R1 中产生泡沫堆积现象, 根据文献 [17~25] 推测是有机负荷过高造成的, 故降低进水有机负荷, 进水 $\text{N}/\text{COD} = 150/500$, COD 和氨氮浓度均降低, 4 d 后泡沫逐渐消失. R2 和 R3 中进水 N/COD 仍保持 240/800. 对比图 6 可以看出, R1 内硝化菌活性最小, 而 3 个反应器中的异养菌活性 (以 O_2/SS 计) 相当, 均在 $20 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 左右, 说明硝化颗粒成熟后, 氨氮负荷的变化对硝化菌活性的影

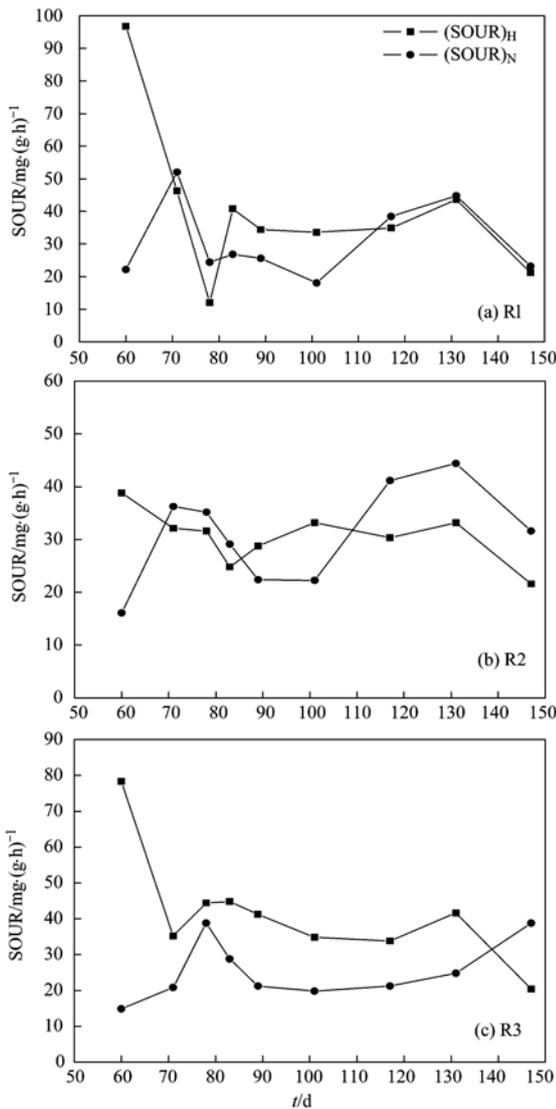


图 6 R1、R2 和 R3 中异养菌与硝化菌的活性

Fig. 6 Respirometric activities of heterotrophic and nitrifying bacteria in R1, R2 and R3

响较大,而 COD 负荷的变化对异养菌活性的影响甚微.

2.3 污泥浓度 (MLSS) 与容积指数 (SVI) 的比较

如图 7(a) 所示, 试验初期, 随着沉降时间的不断缩短, 反应器内沉降性能差的活性污泥不断被排出反应器, 导致 MLSS 不断下降. 由于初期选择压力过大, 导致 R1 和 R2 内污泥浓度大幅度下降至 $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 为保证反应器内有足够的生物量, 从第 74 d 开始, 3 个反应器的进水 COD 浓度均提高至 $800\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 培养初期 R2 中 MLSS 波动幅度最大, 主要是由于进水 COD 浓度交替变化导致的. 最终 3 种不同培养方式下形成的颗粒污泥浓度相差不大, MLSS 均稳定在 $5\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

如图 7(b) 所示, 由于接种的污泥中无机物含量较多 SVI 值较低, 驯化一个星期后活性提高生物量增大, 所以初期有一个 SVI 值上升的趋势. R1 和 R2 中 SVI 值并没有如 R3 一样呈逐步递减的变化趋势, 而是上下波动, 但波动幅度不大, 主要是由于进水 COD 和氨氮浓度交替变化导致的. 运行第 133 d 至第 136 d, R1 中出现泡沫堆积, 导致其 SVI 值陡然增大至 $71.3\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 第 137 d 后, R1 和 R3 中 SVI 均在 $30\sim 40\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, R2 中 SVI 在 $30\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下.

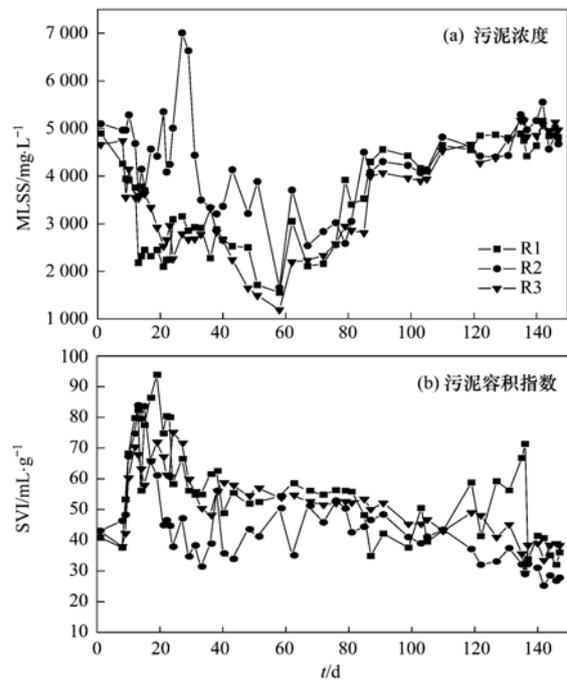


图 7 污泥浓度和 SVI 值变化趋势

Fig. 7 Evolution of MLSS and SVI

2.4 硝化与反硝化效果比较

如图 8, 在硝化颗粒培养初期, 由于进水氨氮负荷交替变化, R1 和 R2 中氨氮去除率呈现上下波动的状态. 每当进水氨氮浓度提高至 $150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮负荷达 $0.27\ \text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 氨氮去除率陡然降低至 50% 左右, 由于交替变化周期只有 3 d, 当进水氨氮浓度在 $150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下时, 氨氮去除率迅速恢复至 85% ~ 99%. 试验过程中为检测硝化菌的耐高氨氮负荷能力, 第 74 ~ 88 d, 3 个反应器中进水氨氮浓度增大至 $320\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮负荷达 $0.58\ \text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 结果氨氮去除率均降低 [如图 8 (b)], R2 中氨氮去除率在 80% 左右, R1 和 R3 中氨氮去除率大幅下降, 均在 60% 以下. 氨氮虽然是氨氧化菌进行碳酸同化生长时的一种能源, 但是过量的氨氮也会妨碍氨氧化菌的繁殖^[26]. 为提高氨氮

化菌活性,降低进水氨氮负荷至 $0.43 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,并适当增加碳酸钠的投加量,使氨氧化菌达到生存的最佳 $\text{pH } 8 \sim 9$. 随着氨氧化菌活性的逐渐恢复,R1、R2 和 R3 也逐步恢复对氨氮的去除性能. 由此可见,培养硝化颗粒污泥时并非进水氨氮浓度越高越有利于硝化菌的富集,本试验 R2 培养的硝化颗粒污泥耐氨氮负荷能力较强,但氨氮负荷 $\geq 0.58 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,氨氮的去除率会受到较大影响.

第 133 d,R1 由于泡沫堆积问题影响出水水质,导致氨氮去除率陡降至 60% 以下,后降低进水有机负荷,泡沫逐渐消失,系统恢复对氨氮的去除性能,最终 3 个反应器对氨氮的去除率均在 90% 以上.

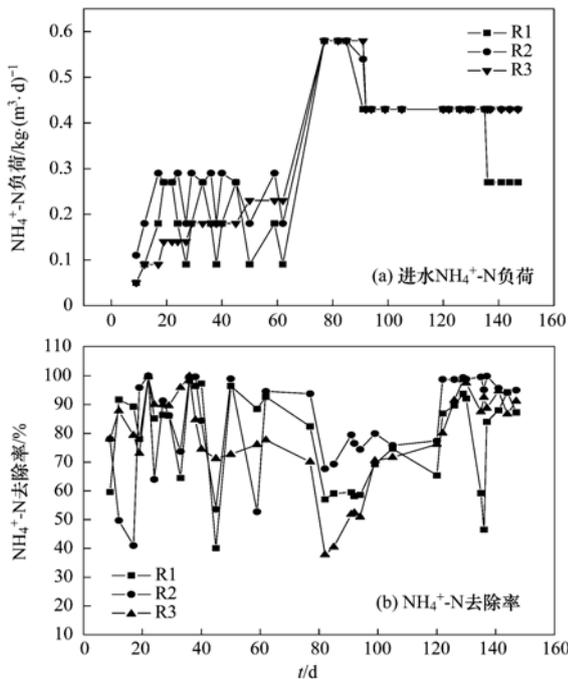


图 8 进水氨氮负荷对氨氮去除率的影响

Fig. 8 Influence of influent ammonia loading rate on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal

在一定的溶解氧浓度下,当颗粒污泥较大时,氧在颗粒内扩散阻力也较大,在其核心区域可形成相对较大且较持久的缺氧区,这能显著强化污泥内部的反硝化^[11]. 如图 9 所示,3 个反应器中总氮去除率随着颗粒粒径的增大而提高,其中 R2 的反硝化性能最佳,总氮去除率始终比 R1 和 R3 的高. 第 131 d,3 个反应器中颗粒平均粒径均在 1.8 mm 左右,R2 的总氮去除率在 70% ~ 80% 之间,而 R1 和 R3 的在 50% ~ 70% 之间. 这与颗粒的致密性有很大关系,推测 R2 中颗粒较密实,颗粒致密性较高,导致溶解氧扩散阻力增大,颗粒内的缺氧区域也相

对增大. 但是,颗粒过大、过密会导致底物在污泥内传质受阻,进而影响污泥内微生物的代谢进程. 第 137 d 后,R2 中总氮去除率有一个下降的趋势,这是因为 R2 中粒径在 4.0 mm 以上的颗粒所占质量分数由原来的 22.27% 锐减至 8.99%,导致系统平均粒径减小,颗粒内的缺氧区域也相对缩小,影响整体的反硝化效果. 所以,系统的脱氮性能不仅和颗粒粒径的大小有关,还和颗粒的密实程度相关,如何通过改变运行条件,培养出粒径较大且密实的颗粒污泥来提高脱氮性能也是本试验下一阶段的研究重点.

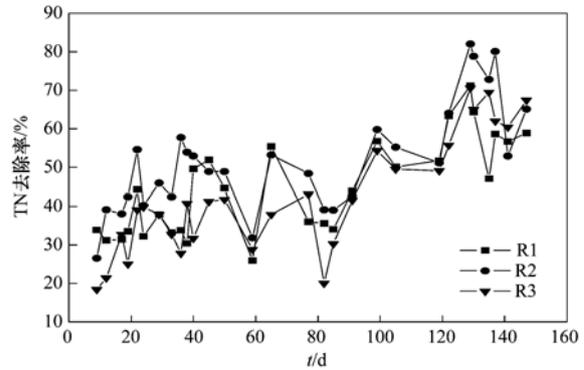


图 9 总氮去除率

Fig. 9 Removal rate of TN

如图 10 所示,反应器稳定运行期间,3 个反应器中 COD 去除率较高且稳定,均在 90% 以上,反应器出水 COD 基本都在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 说明氨氮浓度交替变化(R1、R2)和氨氮浓度逐步提高(R3)的环境并没有对异养菌的活性产生很明显的影 响,表明好氧颗粒污泥的迅速形成使异养菌在颗粒内部迅速富集,因此能更好地适应底物中氨氮浓度的改变.

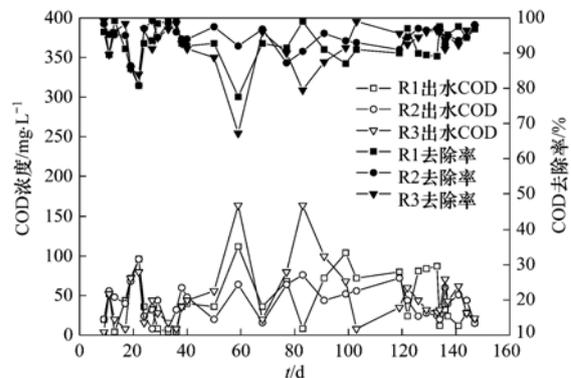


图 10 出水 COD 浓度及其去除率

Fig. 10 COD concentration and removal rate in effluent

2.5 胞外聚合物(EPS)

如图 11 所示,培养初期,R1、R2 和 R3 (单位

MLSS 中)的 EPS 在 $7 \sim 17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 范围内波动, R2 波动幅度最大, EPS 也最高. 推测在碳负荷和氮负荷同时交替变化的双重作用下, 菌群为适应这种环境的突然变化, 采取了类似于菌胶团分泌黏性物质的保护机制, 分泌更多的 EPS, 这对 R2 中污泥的颗粒化进程起到了关键作用, 所以在前 80d 内 R2 中颗粒生长最快, 粒径最大(见图 4). 培养后期, 随着进水基质浓度的稳定, 菌群逐渐适应这种稳定的环境, R1、R2 和 R3 中 EPS 含量均下降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下.

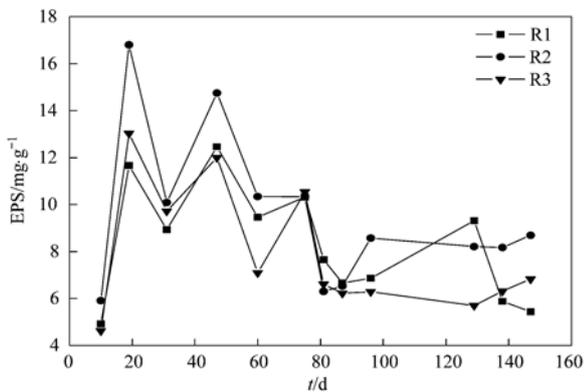


图 11 R1、R2 和 R3 中 EPS 的变化

Fig. 11 Evolution of EPS in R1, R2 and R3

3 结论

(1) 相比传统的逐步提高氮负荷法培养硝化颗粒污泥(R3), 采用进水氮负荷交替变化(R1)和进水碳氮负荷同步交替变化(R2)这 2 种新的培养方式, 均只需 70d 左右成功培养出完全意义上的硝化颗粒污泥, 大大缩短了培养时间. 相比于 R1 的培养方式, R2 的培养方式更优, 其培养的颗粒外形更规则、硝化菌活性更高、脱氮效果更佳.

(2) 氮负荷交替变化对异养菌活性影响不大, 在合适的氨氮负荷[$< 0.58 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]环境下, 相比于氨氮浓度逐步提高, 氮负荷交替变化这种不断改变菌群微观环境的方式更加有利于硝化菌的富集.

(3) 颗粒污泥形成初期, 进水有机负荷对污泥颗粒化速率的影响较大. 培养初期适当提高进水有机负荷, 能提高反应器内的生物量, 利于絮体污泥相互碰撞摩擦, 从而加快颗粒的形成和生长.

参考文献:

[1] Martínez O F, Lema J, Méndez R, *et al.* Role of exopolymeric protein on the settleability of nitrifying sludges[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **94**(1): 43-48.
 [2] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying

granular systems: a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **74**(2): 178-186.
 [3] 张子健, 吴伟伟, 王建龙. SBR 反应器中全自养硝化颗粒污泥的特性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1257-1262.
 [4] Shi Y J, Wang X H, Qi Z, *et al.* Sorption and biodegradation of tetracycline by nitrifying granules and the toxicity of tetracycline on granules[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 103-109.
 [5] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor[J]. *Water Research*, 2003, **37**(20): 4965-4973.
 [6] Tay J H, Yang S F, Liu Y. Hydraulic selection pressure-induced nitrifying granulation in sequencing batch reactors[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, **59**(2-3): 332-337.
 [7] Liu Y, Yang S F, Liu Q S, *et al.* The role of cell hydrophobicity in the formation of aerobic granules[J]. *Current Microbiology*, 2003, **46**(4): 270-274.
 [8] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Elemental compositions and characteristics of aerobic granules cultivated at different substrate N/C ratios[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **61**(5-6): 556-561.
 [9] Yang S F, Tay J H, Liu Y. A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **106**(1): 77-86.
 [10] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Respiriometric activities of heterotrophic and nitrifying populations in aerobic granules developed at different substrate N/COD ratios [J]. *Current Microbiology*, 2004, **49**(1): 42-46.
 [11] 宋延军. 好氧硝化颗粒污泥的培养及其耐盐特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. 27-28.
 [12] 夏丽萍. 硝化颗粒污泥稳定性及活性恢复研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. 28-31.
 [13] 王新华. 好氧硝化颗粒污泥的性能及储存与解体后的自修复行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. 30-33.
 [14] 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, 2006.
 [15] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (19th ed)[M]. Washington, DC: American Public Health Association, 1988.
 [16] 刘宏波, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 进水氨氮浓度对好氧颗粒污泥的影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2031-2034.
 [17] Francis L, Raskin L. Role of filamentous microorganisms in activated sludge foaming: relationship of mycolata levels to foaming initiation and stability[J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 445-459.
 [18] Rossetti S, Tomei M C, Nielsen P H, *et al.* "Microthrix parvicella", a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2005, **29**(1): 49-64.
 [19] Frigon D, Guthrie R M, Bachman G T, *et al.* Long-term analysis of a full-scale activated sludge wastewater treatment system

- exhibiting seasonal biological foaming [J]. *Water Research*, 2006, **40**(5): 990-1008.
- [20] Xie B, Dai X C, Xu Y T. Cause and pre-alarm control of bulking and foaming by *Microthrix parvicella*—a case study in triple oxidation ditch at a wastewater treatment plant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143**(1-2): 184-191.
- [21] Tsang Y F, Sin S N, Chua H. *Nocardia* foaming control in activated sludge process treating domestic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3381-3388.
- [22] Davenport R J, Pickering R L, Goodhead A K, *et al.* A universal threshold concept for hydrophobic mycolata in activated sludge foaming [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3446-3454.
- [23] 李宝新, 金波. 污水处理厂生物泡沫的预防和控制方法[J]. *工业水处理*, 2010, **30**(2): 81-83.
- [24] Ganidi N, Tyrrel S, Cartmell E. The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(12): 6637-6643.
- [25] Petrovski S, Dyson Z A, Quill E S, *et al.* An examination of the mechanisms for stable foam formation in activated sludge systems [J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 2146-2154.
- [26] 魏翔, 伍永钢, 朱文斌, 等. 硝化颗粒污泥的培养及其硝化性能研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(9): 100-103.

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 Picophytoplankton 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