

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究

罗远玲^{1,2}, 杨朝晖^{1,2*}, 徐峥勇^{1,2}, 周玲君^{1,2}, 黄兢^{1,2}, 肖勇^{1,2}, 曾光明^{1,2}, 汪理科^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 采用序批式反应器(SBR), 以实验室已经培养好的具有良好亚硝化积累的颗粒污泥(短程硝化积累率90%以上)为接种污泥, 考察了温度变化对亚硝化颗粒污泥特性、稳定性、氮转换性能及活性的影响。结果表明, 温度对亚硝化颗粒污泥的结构和短程硝化性能都有着重要的影响。在30℃时, 亚硝化颗粒污泥具有良好的絮凝和沉降性, 污泥结构紧密, 亚硝化积累率维持在96.17%, 污泥容积指数(SVI)为39 mL·g⁻¹, 平均粒径为3.03 mm。当温度降至25℃时, 由于胞外多聚物(EPS)浓度升高, 蛋白质与多糖比值的下降, 导致亚硝化颗粒污泥的电负性升高, 同时污泥表面的疏水性减弱, 结构变得松散, 亚硝化颗粒污泥发生了解体, 亚硝化积累率在35%以下, 短程硝化被破坏。在15℃时, 虽然亚硝化颗粒污泥也发生了解体, 并且解体现象加剧, 但是由于颗粒污泥表面氧气传质深度的增大, 使得反应器中氨氧化菌(AOB)的数量相对增大, 出水亚硝化积累率最终稳定在68%左右。

关键词: 温度; 亚硝化颗粒污泥; 短程硝化; 稳定性; 活性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0511-07

Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge

LUO Yuan-ling^{1,2}, YANG Zhao-hui^{1,2}, XU Zheng-yong^{1,2}, ZHOU Ling-jun^{1,2}, HUANG Jing^{1,2}, XIAO Yong^{1,2}, ZENG Guang-ming^{1,2}, WANG Li-ke^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: The experiment was carried out in a sequencing batch reactor (SBR), using granular sludge with 90% shortcut nitrification accumulation ratio, which had been cultivated by the laboratory to seed the reactor. The effects of temperature on characteristics, stability, nitrogen conversion properties and activity of short-cut nitrification granular sludge were investigated. The results show that the temperature has a significant influence on structure and short-cut nitrification performance of short-cut nitrification granular sludge. 30℃ was the optimum temperature for shortcut nitrification granular sludge cultivation, and the granules were more compact which led better flocculation and settleability. SVI and average diameter of sludge reached up to 39 mL·g⁻¹ and 3.03 mm, respectively. The nitrification accumulation was maintained at 96.17% during this period. When the temperature was at 25℃, the granules changed to a loose-structure along with the electronegativity increased as well as the hydrophobicity decreased, which was due to the increase of EPS and decreased ratio of protein to polysaccharide. The granules disintegrated during this period, at the same time, the nitrification accumulation ratio was below 35%. It can be seen that the shortcut nitrification performance was destroyed. At 15℃, the shortcut nitrification sludge also disintegrated and had a looser structure. However, the oxygen penetration depth increased at a lower temperature, which made the relative quantity of ammonia oxidizing bacteria (AOB) in reactor increased, the nitrification accumulation was around 68% ultimately.

Key words: temperature; shortcut nitrification granular sludge; partial nitrification; stability; activity

长期以来人们认为生物脱氮只能通过硝化反硝化来实现,但是近年来的一些新的研究表明自然界中存在着多种新的氮素转化途径,其中最受关注的就是短程硝化-反硝化工艺。短程脱氮较之于全程脱氮在硝化阶段可节约25%的曝气量,在反硝化阶段可节约40%的有机碳源(以甲醇计),因此成为当今脱氮的热点工艺^[1]。现有的短程硝化工艺为实现短程硝化一般将其温度控制在30~35℃^[2]。关于温度对亚硝化、硝化的影响的说法很不一致。Balmelle等^[3]的研究表明当温度在10~20℃之间硝化菌属

活性最大,在此条件下,亚硝酸盐积累很低;20~25℃亚硝酸菌活性逐渐升高而硝酸菌活性缓慢降低,25℃时亚硝酸菌活性达到最大。袁林江等^[4]认为,12~14℃硝化菌活性受到抑制,出现HNO₂的积累,温度超过30℃后又出现HNO₂积累。陈祥等^[5]的研究表明,在环境温度(20~30℃)下,通过控制

收稿日期: 2011-03-14; 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(30970105, 51078131); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001-02)

作者简介: 罗远玲(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: luoyuanling866@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yzh@hnu.cn

反应体系的曝气量和 pH,也能成功实现 SBR 短程硝化-反硝化.在短程硝化工艺中,亚硝化颗粒污泥是具有特殊膜结构的好氧颗粒污泥,具有沉降性好、抗冲击负荷能力强的优点,而且在短程硝化性能上显现出了传统活性污泥所不具有的优势^[6,7].目前,关于温度对亚硝化颗粒污泥影响的研究还较少.本研究采用 SBR 反应器,在成功启动短程硝化的基础上,分析了亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性,探索和比较不同的温度控制策略对亚硝化颗粒污泥特性,稳定性,氮转换性能及活性的影响,以期为最终实现稳定、持久、高效的短程硝化-反硝化生物脱氮提供可行性方案.

1 材料与方法

1.1 接种污泥与人工废水

SBR 的接种污泥取自实验室已经培养好的具有良好亚硝化积累的短程硝化颗粒污泥(短程硝化积累率 90% 以上).

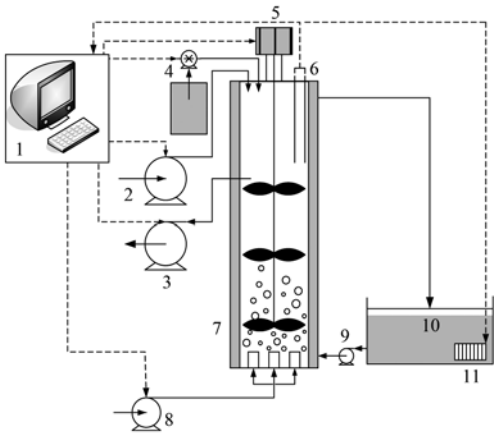
实验采用人工配水^[8],具体成分如表 1 所示.其进水中的葡萄糖主要是用于反硝化,它的投加量根据曝气阶段末期系统产生的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的含量而定.而在曝气阶段开始后,系统基本不会残余葡萄糖.

表 1 模拟废水配方

Table 1 Composition of the synthetic wastewater used in this study			
成分	浓度/mg·L ⁻¹	成分	浓度/mg·L ⁻¹
(NH ₄) ₂ SO ₄	377	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.044
KH ₂ PO ₄	33	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.033
NaHCO ₃	1 050	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.102
葡萄糖	按需投加	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.032
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.18	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.010
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.30	EDTA	0.010
NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.019		

1.2 实验装置

本实验所采用的 SBR 反应装置如图 1 所示,为有效容积 5 L 的圆柱形有机玻璃容器,内部直径 15 cm,高 45 cm.外层设有水浴恒温层,通过温度调节池和加热器将温度控制在 15~30℃.内部设有机机械搅拌器使反应器内液体完全混合.控制系统由 pH 和 DO 电极组成(PHG-217D, SJG-208, 上海雷磁).通过曝气机和 3 个微孔曝气头使 DO 控制在 1.2~2.0 mg·L⁻¹.通过 pH 调节池内的 0.5 mol·L⁻¹ Na₂CO₃和 1 mol·L⁻¹ HCl 的作用,将反应器的 pH 值控制在 7.5~7.8.通过 PLC(PCL-812 PG, 美国)系统,每隔 10 min 采集一次 pH、DO、温度的数据.



1. 在线监测控制系统; 2. 进水泵; 3. 出水泵; 4. pH 控制仪; 5. 搅拌器; 6. 探针 (pH, DO, *t*, ORP, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N); 7. SBR 的外壳; 8. 空气压缩机; 9. 温度调节泵; 10. 温度控制池; 11. 加热器

图 1 SBR 反应装置示意

Fig. 1 Schematic chart of the SBR reactor

1.3 实验方案

实验分成 3 个阶段, A 阶段温度控制在 30℃ (1~25 d), B 阶段温度控制在 25℃ (26~57 d), 30℃ (58~96 d), C 阶段温度控制在 15℃ (97~160 d).在 A 阶段末期,进行亚硝化颗粒污泥对温度变化的短期研究,即在不超 24 h 的时间内,将温度迅速降至 25℃ 和 15℃,观察在 5~6 个循环内反应器的实验效果.实验过程中, SBR 的运行周期为 360 min,其中缺氧进水时间 80 min;曝气时间 240 min;沉淀时间 30 min;排水时间 10 min. SBR 的排水比设置为 50%,使得反应器的 HRT 为 12 h.

1.4 分析项目与方法

NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的浓度用分光光度计法检测^[9]. MLSS 采用标准重量法测定, SVI 采用沉降法测定, 污泥分布采用激光衍射 (Mastersizer, Malvern 2000, UK)^[9]. 比耗氧速率, 氨氮比氧化速率和亚硝酸盐氮比氧化速率根据孙晓莹等^[10]的方法进行. EPS 的离取参照 Liu 等^[11]所述的方法进行. 多糖用蒽酮比色法测定^[12], 蛋白质含量采用 Folin-酚法 (Lowry 方法) 测定, 以牛血清蛋白为标准物^[12]. Zeta 电位采用 Zeta 电位仪测定.

2 结果与分析

2.1 温度对亚硝化颗粒污泥特性的影响

不同温度阶段下亚硝化颗粒污泥的特性如表 2 所示. 反应器运行初期亚硝化颗粒的污泥容积指数 (SVI) 为 113 mL·g⁻¹, 混合污泥浓度 (MLSS) 为

4 024 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2). 当反应进行至 10 d 时,反应器内的亚硝化颗粒污泥的浓度降至 3 852 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而污泥平均粒径增大至 2.39 mm,并且具有良好的沉降性能($\text{SVI}=81\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$). 在随后的 11~25 d 内,亚硝化颗粒污泥的浓度维持稳定,约为 3 752 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥粒径逐渐增大,平均粒径为 3.03 mm (表 2),沉降性能良好,SVI 维持在 39 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$,亚硝化颗粒污泥性能稳定. 之后,反应器的温度降至 25℃,运行 32 d 后,反应器内亚硝化颗粒污泥浓度略有下降,反应器中的污泥变得松散,出现少量污泥解体的现象,MLSS 降至 3 468 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 升至 43 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 将反应器的温度再次升至 30℃,运行 39 d 后,亚硝化颗粒污泥又恢复良好的性能. 之后,将反应器的温度降至 15℃,反应器中亚硝化颗粒污泥的浓度从 3 797 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 3 286 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝化颗粒污泥同样出现了解体现象,污泥结构变得松散,平均粒径为 1.97 mm,SVI 约为 55 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$,运行 63 d 后,实验结束.

表 2 不同阶段下 SBR 反应器中亚硝化颗粒污泥特性
Table 2 Characteristics of granular sludge in SBR reactor during the experiment

亚硝化颗粒 污泥特性	阶段 A 30℃ (25 d)	阶段 B		阶段 C 15℃ (63 d)
		25℃ (32 d)	30℃ (39 d)	
平均粒径/mm	3.03	2.67	3.04	1.97
MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3 752	3 468	3 797	3 286
SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	39	43	37	55
Zeta/mV	-14.68	-16.73	-14.52	-17.70

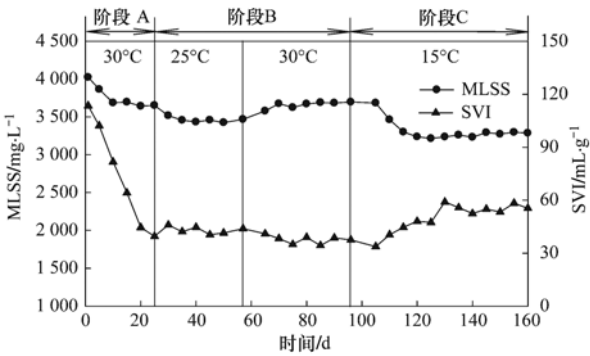


图 2 反应器运行过程中 SVI 和 MLSS 的变化
Fig. 2 Variations of SVI and MLSS during the experiment

由于接种污泥为实验室已经培养好的具有良好亚硝化积累的短程硝化颗粒污泥. 因此从运行初期开始,SBR 反应器就存在大量的颗粒污泥,并且具有较好的絮凝和沉降性. 随着反应器在好氧条件下运行时间的增加,接种的亚硝化颗粒污泥活性逐渐恢

复和增强,粒径增大. 在实验条件(30℃)下,成功培养了具有良好稳定性的亚硝化颗粒污泥. 随着温度的降低,反应器内亚硝化颗粒污泥结构都变得松散,出现了污泥解体现象,15℃比25℃解体的现象更为严重,这是亚颗粒污泥中的丝状细菌低温环境下过度繁殖的结果^[13]. 研究结果表明^[14],丝状细菌的过度生长会引起颗粒污泥内部营养物质的严重失衡,从而导致颗粒污泥解体.

2.2 温度对亚硝化颗粒污泥稳定性的影响

EPS 覆盖在微生物的表面,可以通过和二价离子之间的静电作用和桥接作用使微生物结合在一起,同时 EPS 中聚合物链的纠缠对微生物之间的吸附作用同样起到了巨大的贡献^[15,16]. 另外,EPS 也是决定活性污泥表面性质的关键物质^[17]. 因此研究 EPS 的成分和含量对研究亚硝化颗粒污泥稳定性具有重要意义.

图 3 表示了不同温度下,EPS 的总量及蛋白质和多糖的变化. 由图 3 可知,在 30℃时,运行 25 d 后,EPS 的含量(以 MLSS 计,下同)逐渐减小,降至 138 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,蛋白质的含量逐渐上升,多糖含量逐渐下降,蛋白质与多糖比值由 2.47 升至 4.08. 在温度降至 25℃的 32 d 内,EPS 含量随着反应的进行有所上升,高达 150.97 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,蛋白质的含量下降,多糖含量上升,蛋白质与多糖的比值明显下降,最低降至 3.10. 当温度又恢复至 30℃后,EPS 的含量也随之降至 130 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而蛋白质的含量上升,多糖含量下降,蛋白质与多糖的比值又上升至 4.26. 在 15℃的低温条件下,运行 63 d 内,EPS 的含量先有所上升,之后下降,最终维持在 161 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而蛋白质与多糖的比值则变为 2.90 左右. 同时,污泥表面 Zeta 电位也随着温度的变化而有所变化,随着温度的降低,污泥的 Zeta 电位由 -14.68 mV (表 2) 升高

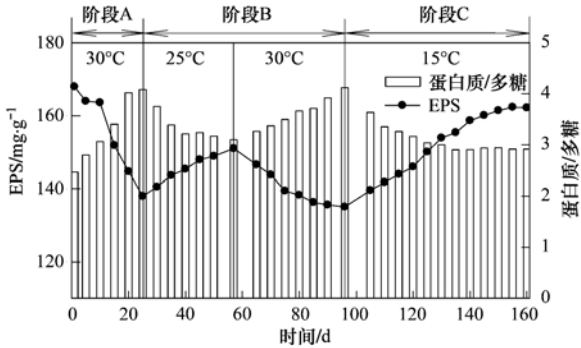


图 3 不同温度下 EPS、蛋白质与多糖比例变化

Fig. 3 Concentration of EPS and protein/carbohydrate at different temperatures

到 -16.73 mV , 之后温度升至 30°C , Zeta 电位降至 -14.52 mV , 在 15°C 时, Zeta 电位最终稳定在 -17.70 mV . 有关研究表明 EPS 的存在不利于污泥沉降, 随着 EPS 浓度增大, 污泥电泳迁移率增大, 沉降性能下降^[16]. Forster^[18] 报道当 EPS 含量过高, 导致污泥表面电负性足够大时, 会由于絮体间斥力导致沉降性能恶化. 蛋白质能够影响污泥的表面电位和活性污泥的絮体结构, 从而影响污泥的沉降和脱水性^[19]. 同时, 蛋白质含量的增大, 也会使污泥表面的电负性减小, 疏水性增大, 有利于活性污泥聚结. 多糖是由活性污泥表面吸附了有机物质而形成的, 如果微生物代谢正常, 那么吸附在污泥表面的多糖将会被很快消化吸收, 因此多糖的含量一般较低, 只有活性污泥失去活性, 此时细菌吸附了大量有机物, 来不及代谢, 才会在胞外积贮大量高黏性的多糖物质, 使得表面附着物大量增加, 很难沉淀压缩^[20]. 所以, 在活性污泥具有较好的活性下, 多糖的含量是会逐渐降低的. 反

应器多糖含量增大, 会直接影响反应器内活性污泥的沉降和絮凝性.

实验进一步证明, 温度对亚硝化颗粒污泥的结构和稳定性有重要影响. 当温度控制在 30°C 时, 亚硝化颗粒污泥的电负性较低, 污泥表面疏水性强, 从而反应器具有良好的絮凝和沉降性, 亚硝化颗粒污泥结构稳定. 温度降至 25°C 和 15°C 后, 亚硝化颗粒污泥的电负性略有升高, 同时污泥表面的疏水性减弱, 不利于微生物之间的相互黏附, 在反应器中出现了松散污泥, 导致亚硝化颗粒污泥出现解体现象, 污泥性能变差.

2.3 温度对氮转化性能的影响

不同温度下, 出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 浓度的变化如图 4 所示. 在短程硝化的研究中, 实现短程硝化的标志是获得稳定且高效的亚硝酸盐积累, 即亚硝化积累率较高. 其中亚硝化积累率 = $[\text{NO}_2^--\text{N}]/[\text{NO}_x^--\text{N}]$ ($\text{NO}_x^--\text{N} = \text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$), 只要该比值 $> 50\%$, 就算实现了短程硝化.

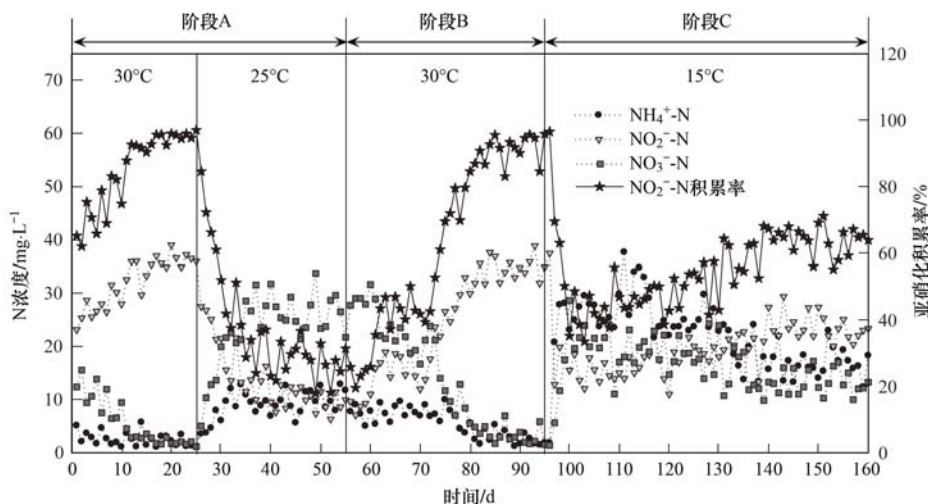


图 4 出水中 N 浓度及亚硝化积累率的变化

Fig. 4 Variation of N concentration and nitrite accumulation ratio in effluent

实验前 25 d, 反应器的温度控制在 30°C , 在该阶段, 成功实现 NO_2^--N 的积累, 出水亚硝化积累率 96.17%. 出水 NH_4^+-N 的平均浓度 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NO_3^--N 维持在 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 反应器具有良好的短程硝化性能. 之后反应器混合液的温度降至 25°C , 温度降低的 7 d 内, 出水亚硝化积累率迅速降至 51%, 短程硝化性能逐渐降低. 在随后的 22 d 内, 反应器的短程硝化完全被破坏, 出水 NH_4^+-N 的浓度维持在 $9.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而出水 NO_3^--N 浓度逐步升至 $28.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝化积累率在 35% 以下, 系统转

变为全程硝化. 为了恢复系统的短程硝化性能, 在阶段 B 的后期, 又将反应器混合液的温度升至 30°C . 在随后的 39 d 内, 系统的亚硝化积累率逐渐增大, 反应器的短程硝化性能得到恢复. 阶段 B 运行 71 d 后, 将反应器混合液的温度降至 15°C . 在温度降低的 7 d 内, 出水亚硝化积累率降至最低, 只有 37.86%, 随着反应的进行, 系统逐渐适应反应条件, 亚硝化积累率最终稳定在 68% 左右.

在 A 阶段末期, 进行亚硝化颗粒污泥对温度变化的短期研究, 即在不超过 24h 的时间内, 将温度迅

速降至 25℃ 和 15℃. 不同温度下, 典型周期内 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 浓度的变化如图 5 所示. 在 30℃ 时, NH_4^+-N 的转换率很大, 平均转换率为 95%, 平均比降解速率为 $3.62 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 出水 NH_4^+-N 的浓度为 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当温度为 25℃ 时, NH_4^+-N 的转换率降低, 平均转换率为 80.5%, 平均比降解速率为 $2.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 出水 NH_4^+-N 浓度升至 $7.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当温度降至 15℃, NH_4^+-N 的转换率较小, 平均转换率只有 52.5%, 平均比降解速率为 $1.96 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 在典型周期内, NO_2^--N 的浓度在不同温度下, 有着明显的不同. 30℃ 时, NO_2^--N 的浓度在 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水亚硝化积累率达 95% 以上; 当温度降至 25℃, NO_2^--N 的浓度降至 $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水亚硝化积累率约 81%; 当温度为 15℃ 时, NO_2^--N 的浓度为 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水亚硝化积累率只

有 70%.

短期(24 h)的实验结果表明, 反应器在 15℃ 的亚硝化积累率低于 25℃ 和 30℃. 在短期内, 可以假设反应器中亚硝化颗粒污泥的组成和形态并未发生变化, 由此可以排除温度变化对亚硝化颗粒污泥结构的影响, 从而进一步证实, 在颗粒污泥结构保持稳定的状态下, 亚硝化积累率是随着温度的降低而降低的.

结合长期的实验结果可以得出这样的结论, 反应器的短程硝化性能不仅与温度有关, 同时还受亚硝化颗粒污泥结构的影响. 稳定的亚硝化颗粒污泥结构有助于系统实现短程硝化. 在 30℃ 时, 亚硝化颗粒污泥结构和性能稳定, 系统具有良好的短程硝化性能. 研究发现, 实现短程硝化的最适宜温度为 30~35℃, 原因是在高温下, AOB 的活性很强, 并且温度的升高使其酶活性增大, 平均生长速率也增大^[1]. 同时, 稳定的亚硝化颗粒污泥结构有助于菌种的附着和停留, 使得反应器中 AOB 的含量大大增加. 在 25℃ 时短程硝化被破坏, 原因如下: ①由于温度降低导致 AOB 的活性降低, 亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的活性增强 (如短期结果所示); ②亚硝化细菌主要分布在颗粒污泥的表层, 而硝化细菌则分布在表层之下^[6]. 随着温度的降低, 亚硝化颗粒污泥出现了解体现象, 导致系统的 AOB 数量减少, 而分布在颗粒污泥表层之下的 NOB 则被保留下来; ③在 25℃ 下, 各种细菌与硝化细菌形成了激烈的竞争关系, 导致氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率均降低 (见 2.4 节). 高大文等^[21] 采用序批式活性污泥法处理实际豆制品废水, 结果表明: 只有当反应器温度超过 28℃ 时, 短程硝化反硝化过程才能较稳定地进行. 孙晓杰等^[22] 也发现在 SBR 反应器中, 对于普通城市生活污水, 在中温条件下, 实现短程硝化有困难. 在 15℃ 时, 亚硝化颗粒污泥的性能先略有降低, 之后维持较好的污泥结构和稳定性. 对于好氧颗粒污泥, 由于 DO 在污泥颗粒内部的传输限制, 使得 DO 在颗粒内部的传输深度约为 100 μm , 颗粒内部形成缺氧与厌氧环境^[23]. 当温度降低至 15℃ 时, 虽然微生物的活性降低, 但是颗粒污泥表面氧气传质的深度却增加, 从而增大好氧区的体积, 使得反应器中 AOB 的数量相对增大, 从而提高氨氮的去除能力^[13]. 另一方面, 在低温条件下, AOB 的活性大于 NOB. 因此, 即使反应器内 AOB 的活性较低, 仍能实现短程硝化. Randall 等^[24] 发现低于 15℃, AOB 和 NOB 的活性均降低, 但是 NOB 的活性降得更低, 出

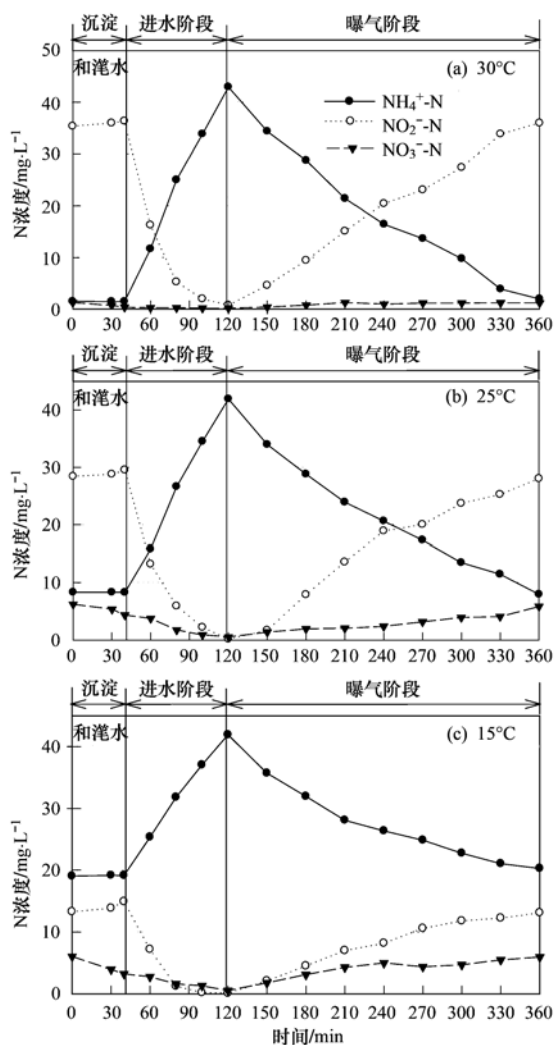


图 5 不同温度下典型周期内氮浓度的变化曲线

Fig. 5 N conversion during a typical Cycle of the reactor at different temperatures

现亚硝态氮的积累。

2.4 温度对亚硝化颗粒污泥活性的影响

比耗氧速率是表征活性污泥中微生物活性的重要指标,比耗氧速率越大,证明活性污泥中微生物的活性越高^[25]。而根据一个系统的氨氮比氧化速率和亚硝酸盐氮比氧化速率的相对大小则可判断该系统是否存在亚硝酸盐的积累,即是否发生了短程硝化^[10]。

温度对亚硝化颗粒污泥活性的影响如图6所示。在30℃时,亚硝化颗粒污泥具有很高的微生物活性,比耗氧速率(O_2/SS ,下同)为 $0.4326 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。同时,氨氮比氧化速率为 $0.1213 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,亚硝酸盐氮比氧化速率为 $0.0621 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。亚硝酸盐氮比氧化速率小于氨氮比氧化速率,证明系统发生了短程硝化,与本实验的研究结果一致。刘宏伟等^[26]报道,在30℃,DO 低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,短程硝化活性污泥的氨氧化耗氧速率与亚硝化氧化耗氧速率分别为 $0.0374 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $0.0287 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。在本实验中,亚硝化颗粒污泥的氨氮比氧化速率远远大于上述普通短程硝化活性污泥,从而进一步证明亚硝化颗粒污泥在短程硝化性能上显现出了传统活性污泥所不具有的优势。在25℃时,亚硝化颗粒污泥仍具有较高的微生物活性,达到 $0.4248 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,与30℃运行条件下的污泥活性相当。而氨氮比氧化速率为 $0.0931 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,比30℃略有下降;亚硝酸盐氮比氧化速率为 $0.1331 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,亚硝化速率的大大提高,使得系统的硝酸盐氮大量积累,短程硝化被破坏,从而转变为全程硝化。关于该现象发生的原因,笔者认为是由于活性污泥中微生物的生长范围大多在25~30℃之间,因此在25℃下,各种微生物大量繁殖生长,颗粒污泥具有较高的活性。但是,由于微生物种类的增大,必然导致菌种形成竞争关系,导致AOB和NOB的数量减少,而NOB对环境的活性及适应性在25℃高于AOB^[3],最终导致系统形成了全程硝化。在15℃下,亚硝化颗粒污泥的活性减弱,比耗氧速率为 $0.2521 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。而氨氮比氧化速率 $[0.0495 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}]$ 高于亚硝酸盐氮比氧化速率 $[0.0274 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}]$,因此系统仍能实现短程硝化。关于亚硝化颗粒污泥活性的实验,进一步证实了温度对亚硝化颗粒污泥的短程硝化性能有着重要的影响。在30℃时,AOB的活性大于NOB,系统具有良好的短程硝化性能,同时反应器内微生物的活性也较大;当温度降至25℃,

虽然反应器的微生物活性仍能维持较高的水平,但是NOB的活性增大,AOB的活性降低,系统的短程硝化性能被破坏;15℃时,即使反应器的微生物活性下降,但是AOB的活性稍大于NOB,因此系统仍能实现短程硝化。

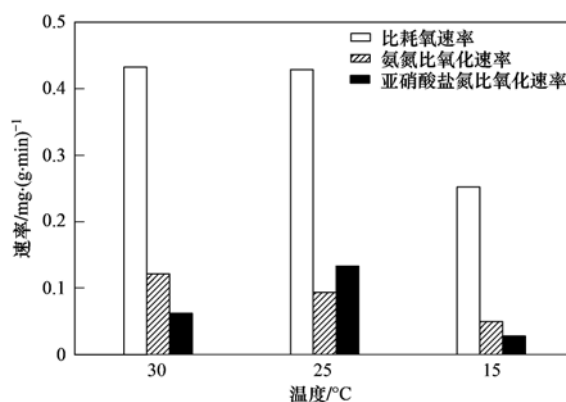


图6 温度对亚硝化颗粒污泥活性的影响

Fig. 6 Effect of temperature on activity of short-cut nitrification granular sludge

3 结论

(1)温度是影响亚硝化颗粒污泥的结构的重要因素,在30℃时,亚硝化颗粒污泥的电负性较低,污泥表面疏水性强,亚硝化颗粒污泥具有良好的絮凝和沉降性,污泥结构稳定;在25℃和15℃时,亚硝化颗粒污泥的电负性略有升高,同时颗粒污泥表面的疏水性减弱,不利于微生物之间的相互黏附,在反应器中出现了松散污泥,最终导致亚硝化颗粒污泥出现部分解体的现象,但亚硝化颗粒污泥仍具有较好的稳定性。

(2)温度对亚硝化颗粒污泥的短程硝化性能也有着重要影响,在30℃时,亚硝化颗粒污泥性能稳定,系统具有良好的短程硝化性能,出水亚硝化积累率93.17%;当温度降至25℃,亚硝化颗粒污泥的结构失稳,从而导致反应器的短程硝化被破坏,出水亚硝化积累率在35%以下;15℃时,虽然亚硝化颗粒污泥系统也出现了解体的现象,但是由于氧气传质深度的增大,使得反应器中AOB的数量相对增大,出水亚硝化积累率最终稳定在68%左右。

参考文献:

- [1] Dytchaka M A, Londryb K L, Oleszkiewicz J A. Activated sludge operational regime has significant impact on the type of nitrifying community and its nitrification rates [J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 2320-2328.
- [2] Xu Z Y, Zeng G M, Yang Z H, et al. Biological treatment of

- landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **101**(1): 79-86.
- [3] Balmelle B, Nguyen K M, Capdeville B, *et al.* Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification [J]. *Water Science and Technology*, 1992, **26**(5-6): 1017-1025.
- [4] 袁林江, 彭党聪, 王志盈. 短程硝化-反硝化生物脱氮 [J]. *中国给水排水*, 2000, **16**(2): 29-31.
- [5] 陈祥, 陈英文, 沈树宝. 环境温度下短程硝化反硝化试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(15): 93-96.
- [6] 杨洋, 左剑恶, 卜德华, 等. 好氧颗粒污泥亚硝化工艺的启动与运行特性研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2462-2466.
- [7] 傅金祥, 王海彪, 唐玉兰, 等. 高溶解氧环境下好氧亚硝化颗粒污泥短程硝化特性研究 [J]. *工业用水与废水*, 2009, **40**(5): 28-31.
- [8] 季丽丽, 杨朝晖, 徐峥勇, 等. 控制游离氨实现单级自养生物脱氮的研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 199-205.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 孙晓莹, 张铁凡, 聂英进, 等. 活性污泥比耗氧速率的测定及其在污水处理厂的应用 [J]. *天津建设科技*, 2009, **19**(6): 56-59.
- [11] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludge [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [12] Yang S H, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44**(1): 91-96.
- [13] De Kreuk M K, Pronk M, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures [J]. *Water Research*, 2005, **39**(18): 4476-4484.
- [14] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. The effect of intermittent feeding on aerobic granule structure [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11): 19-25.
- [15] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [16] Yang S F, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44**(1): 91-96.
- [17] Mu Y, Yu H Q. Biological hydrogen Production in a UASB reactor with granules. I: physicochemical characteristics of hydrogen-producing granules [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **94**(5): 980-987.
- [18] Forster C F. Factors involved in the settlement of activated sludge I: Nutrients and surface polymers [J]. *Water Research*, 1985, **19**(10): 1259-1264.
- [19] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, **216**(1-2): 217-227.
- [20] Satyawalia Y, Balakrishnan M. Effect of PAC addition on sludge properties in an MBR treating high strength wastewater [J]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1577-1588.
- [21] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 短程硝化生物脱氮工艺的稳定性 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 63-65.
- [22] 孙晓杰, 彭永臻, 于德爽. 温度对不同水质条件下生活污水短程硝化的影响 [J]. *青岛理工大学学报*, 2006, **27**(2): 68-71.
- [23] 暴瑞玲, 于水利, 王玉兰, 等. 温度对好氧颗粒污泥脱氮性能及颗粒稳定性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 697-701.
- [24] Randall C W, Benefield L D, Butth D. The effects of temperature on the biochemical reaction rates of the activated sludge process [J]. *Water Science and Technology*, 1982, **14**(1): 413-430.
- [25] Luo Y L, Yang Z H, Xu Z Y, *et al.* Effect of trace amounts of polyacrylamide (PAM) on long-term performance of activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189**(1-2): 69-75.
- [26] 刘宏伟, 崔蕾, 郝春明. 氧吸收速率 (OUR) 表征短程硝化试验污泥活性的研究 [J]. *能源环境保护*, 2007, **21**(5): 22-24.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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