

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚峰, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析

张岩¹, 孙凤侠¹, 谢杭冀¹, 陈敬¹, 眭稀², 甘志明¹, 王修平¹, 史扬¹

(1. 北京工业大学建筑工程系, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 北京北排水务设计研究院有限公司, 北京 100123)

摘要: 我国分散型污水处理问题亟待解决, 研究开发了四区一体式生物膜-活性污泥生物脱氮反应器, 采用梯度缩短 HRT 方法, 考察了冬季 8~15℃ 水温环境下的反应器 COD、NH₄⁺-N、TN 去除效果, 同时, 采用荧光原位杂交技术(FISH)对种泥及其启动过程中的生物膜硝化菌群(AOB、NOB)结构进行分析, 并对反应器运行效果与功能微生物的相关关系进行了探讨。结果表明, 在 HRT 为 9.2 h 下 COD、NH₄⁺-N、TN 去除率分别为 92.11%、99.21%、61.63%; 启动末期生物膜内 AOB、NOB 数量是种泥的 5.82 倍、6.14 倍, 硝化细菌占总菌量由 6.12% 上升至 16.38%, 成为生物膜的优势菌群; 末期硝化效率由初期 78.49% 上升至 97.52%, NOB 数量增长 5.61 倍, AOB/NOB 值优化为 1.47, 反应器内富集生长的 AOB、NOB 及合适的 AOB/NOB 比值是确保硝化出水水质的重要保障。

关键词: 脱氮; 冬季启动; 硝化细菌; 荧光原位杂交技术(FISH); 一体式反应器

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3339-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.028

Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community

ZHANG Yan¹, SUN Feng-xia¹, XIE Hang-ji¹, CHEN Jing¹, SUI Xi², GAN Zhi-ming¹, WANG Xiu-ping¹, SHI Yang¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Department of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing North Drainage Works Design and Research Institute Company Limited, Beijing 100123, China)

Abstract: The treatment of decentralized sewage has gained more and more attention in China in recent years. A four-zone integrated reactor was designed by combining biofilm system and activated sludge system and start-up by gradient shorten the HRT. The removal of COD, NH₄⁺-N and TN were studied at 8-15℃. Fluorescence *in situ* hybridization(FISH) was used to detect nitrobacteria population (AOB, NOB) so as to study the relationship between the reactor effect and functional micro-bacteria. The results showed that, when the HRT was 9.2 h, the removal efficiencies of COD, ammonia and TN were 92.11%, 99.21% and 61.63%, respectively. Compared to the initial stage, the numbers of AOB and NOB in the late phase were increased by 5.82 and 6.14 times, respectively. In addition, the proportion of nitrobacteria was increased from 6.12% to 16.38%, which became the dominant bacteria in biofilms. Moreover, the nitrification efficiency was increased from 78.49% to 97.52%, while the number of NOB was 5.61-fold increased and the value of AOB/NOB was optimized to 1.47. The effluent quality is guaranteed by the enrichment of AOB and NOB and suitable value of AOB/NOB.

Key words: nitrogen removal; start-up at winter; nitrobacteria; fluorescence *in situ* hybridization(FISH); integrated reactor

一体式脱氮装置是依据分散型生活污水面广、收集难等^[1,2]特点发展起来的一种污水处理新技术,该技术充分考虑空间布置,将分置的污水处理单元集约化,形成一体式反应器^[3,4]以达到处理设施低造价、易维护、节约用地的目的^[3,4],从而加快分散型污水就地处理的进程。分散型生活污水处理过程中常采用生物脱氮工艺^[4~7],但目前,生物脱氮处理过程中尤其在我国广大北方冬春季节,水温难以保持在适宜微生物硝化(20~30℃)、反硝化的温度范围内(20~40℃),生物脱氮反应器面临难启动、脱氮效率低的困难,因此,设计一种一体式生物脱氮反应器能够在冬季低温(8~15℃)时期迅速启

动、稳定运行和高效脱氮具有实际意义。

基于上述背景,本研究开发了四区一体式反应器^[8]用于分散型污水处理,尤其适用于冬季低温环境。该反应器将好氧生物膜区-缓冲微氧区-反硝化缺氧区-泥水分离澄清区四区共存一体,采用立式设计,利用曝气上升流、重力作用及反应器内的水流推动力进行基质交换,污泥及硝化液无动力回流,以达到设备结构简单、节约用地、运行耗能低、高效脱氮和去除有机物的目的。启动研究在冬季(水温

收稿日期: 2015-03-08; 修订日期: 2015-04-15

作者简介: 张岩(1962~),女,博士,副教授,主要研究方向为污水处理与资源化利用, E-mail: yzhang@bjut.edu.cn

8~15℃)进行,采用梯度缩短水力停留时间 HRT,以期减缓 HRT 冲击负荷对系统影响的同时刺激微生物增殖生长,进而丰富微生物种群数量并且调节微生物低活性的状态;利用荧光原位杂交 FISH (fluorescence *in situ* hybridization) 技术对氨氧化细菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO_B)数量进行分析^[9,10],从分子生物学角度真实地反映出反应器内硝化细菌的数量和结构的时空变化,探索微生物菌群结构与硝化作用的内在关系,以期为最终实现冬季低温条件下四区一体式生物脱氮反应装置的快速、高效、稳定、低耗能启动提供科学依据。

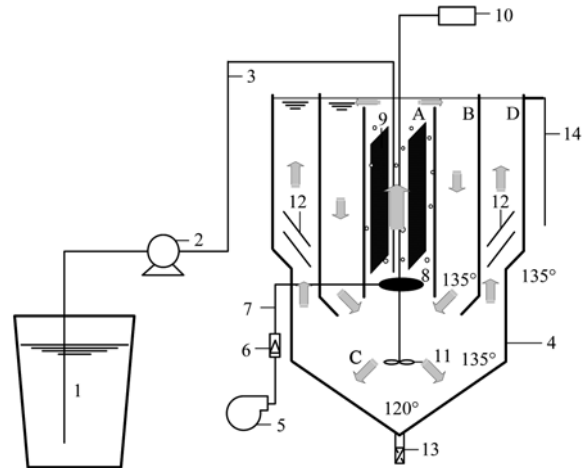
1 材料与方法

1.1 原水水质、接种污泥

实验用水取自北京工业大学西区教工家属楼化粪池上清液,该上清液经水泵至实验室室外无保温设施的水箱,其 ρ (COD)为260.4~513.1 mg·L⁻¹, ρ (NH₄⁺-N)为87.82~115.52 mg·L⁻¹, ρ (TN)为91.14~116.52 mg·L⁻¹,平均C/N为3.75。接种污泥取自某市政污水处理厂二沉池回流污泥,接种后反应器初始 MLSS 为2 031 mg·L⁻¹。

1.2 实验装置及运行

系统如图1所示,主要包括原水箱、进水蠕动泵、气泵及四区一体式生物脱氮反应器。生物脱氮反应器由敞口的好氧生物膜区A、过渡微氧区B、反硝化缺氧区C、泥水分离澄清区D四部分组成,



1. 原水箱; 2. 进水蠕动泵; 3. 进水管; 4. 生物脱氮反应器; 5. 气泵; 6. 玻璃转子流量计; 7. 输气管; 8. 微孔曝气头; 9. 亲水填料; 10. 搅拌机; 11. 搅拌桨; 12. 斜管; 13. 排泥阀门; 14. 出水口; A. 好氧生物膜区; B. 过渡微氧区; C. 反硝化缺氧区; D. 泥水分离澄清区

图1 四区一体式生物脱氮系统

Fig. 1 Four-zone integrated biological nitrogen removal system

各部分尺寸及参数如表1所示。A区底部设有进水管及微孔曝气头,考虑到水流推动力及污水水质特点进水管设计在曝气头上部,中间悬挂两片 Bio-fix 填料。C区中部设置搅拌桨,搅拌速度为20~30 r·min⁻¹,搅拌器在第32 d启用。

原水经进水蠕动泵抽吸进入A区底部,曝气产生的上升气体带动液体向上流动,流经 Bio-fix 填料,发生同时硝化反硝化作用,后自A区顶部溢流进入B区,在重力作用下进入C区,缺氧环境下进行反硝化脱氮,泥水混合物在水流推动作用下流向D区,在D区经斜管沉淀实现泥水分离,经过D区澄清作用后,出水。在D区处被分离的污泥返回C区,部分C区活性污泥在搅拌器和曝气装置协同作用下进入A区,实现污泥回流。

表1 反应器各区尺寸参数

Table 1 Characteristics of the reactor			
规格			
区域	直径/mm	高度/mm	有效容积/L
A	160	850	17
B	300	950	61
C	400	550	22
D	500	700	85

1.3 生物填料

实验中采用的生物填料 Bio-fix (BX) 为亲水性丙烯酸树脂纤维,其比表面积为113.8 mm²·mm⁻³,具有高孔隙率和比表面积,能够吸附大量微生物固着生长。此外,BX 稳定的立体网络结构有利于水、气、泥三相在填料中自由流动,有效防止污泥堵塞结块。

1.4 系统的启动

反应器采用直接挂膜法,经7 d 间歇闷曝培养后启动实验开始,当反应器对有机物、氨氮的去除率稳定在90%、对TN去除率50%以上持续2周后认为启动完成,历时42 d。启动过程参数见表2,启动阶段无污泥排放。

1.5 分析方法

COD 采用 5B -3 型快速测定仪, NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、MLSS 采用标准方法测定^[11], DO 值、温度采用 WTW DO 溶氧仪测定。

1.6 分子荧光原位杂交技术

FISH 实验步骤及计数方法参照张岩等^[12]的方法。实验所用寡核苷探针^[13]如表3所示。AOB、NOB 数量各占真细菌比例按公式(1)、(2)计算:

% AOB = 100% × N(AOB)/N(EUB) (1)

% NOB = 100% × N(NO_B)/N(EUB) (2)

式中,% AOB、% NOB 分别表示 AOB、NOB 数量占

真细菌百分比, $N(\text{AOB})$ 、 $N(\text{NOB})$ 、 $N(\text{EUB})$ 分别表示 AOB、NOB、真细菌绝对数量。

表 2 启动过程参数

		Table 2 Parameters of reactor in winter start-up			
项目		12-01 ~ 12-07 (phase I)	12-08 ~ 12-14 (phase II)	12-15 ~ 12-21 (phase III)	12-22 ~ 01-11 (phase IV)
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	A 区	2.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1	2.2 ± 0.1
	B 区	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1
	C 区	<0.0	<0.0	<0.0	<0.0
	D 区	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1
$T/^{\circ}\text{C}$		8 ~ 15	8 ~ 15	8 ~ 15	8 ~ 15
HRT/h	A 区	24	12	6	4.75
	反应器	55	27.5	13.8	9.2

表 3 FISH 分析中采用的寡核苷酸探针

Table 3 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes used				
探针	序列(5'-3')	目标菌	荧光标记	甲酰胺/%
EUB338	GCTGCCTCCGAGGAT	Most bacteria	5'-cy3	55
NSO190	CGATCCCTGCTTTTCTCC	β -Proteobacteria AOB	5'-FITC	55
NIT3	CCTGTGCTCCATGCTAAG	Nitrobacteria	5'-HEX	40

2 结果与讨论

2.1 低温启动过程 COD 去除变化

反应器在冬季低温状态下进行了启动,水温 8 ~ 15℃ 种泥接种于反应器经过 7 d 闷曝后,A 区填料表面附着褐色生物膜,此时填料生物量为 $0.017\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$,反应器 MLSS 为 $2\,031\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表征挂膜成功进入启动阶段.为了使微生物由启动初期的适应新环境至快速增殖以达到快速高效启动,采用了梯度缩减 HRT 的方式,启动过程 COD 去除效果如图 2 所示.初始设定 A 区 HRT 为 24 h,运行一周后 COD 去除率由 80.35% 逐渐上升至 86.28%,出水质量浓度由 $51.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 减低至 $46.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微生物在逐渐适应新环境;第 8 d 缩短 HRT 至 12 h,COD 去

除率上升至 90%,出水质量浓度降至 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 15 d 进一步缩短 HRT 至 6 h,COD 去除率继续升高为 92.37%,出水质量浓度降至 $30.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;为提高系统的去除负荷,第 22 d 缩短 HRT 至 4.75 h,并连续运行 3 周,COD 平均去除率及出水平均质量浓度分别为 92.11%、 $30.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到《中华人民共和国污水综合排放标准》一级 A 标准.此时反应器内 MLSS 增加至 $2\,709\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,A 区固着生长的生物量增加至 $0.037\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$,形成一定厚度的生物膜.

2.2 低温启动过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除变化

低温启动过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除变化如图 3 所示.启动 1 ~ 7 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率波动较大,当运行一周至第 14 d 时去除率由 78.16% 升高到 99.46%,呈明显的

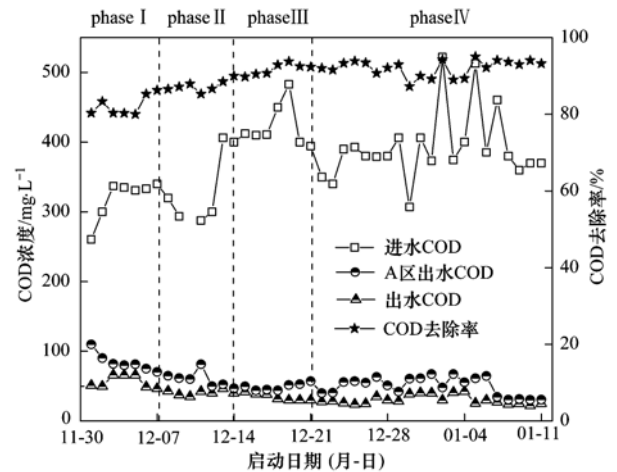


图 2 冬季启动过程 COD 浓度变化

Fig. 2 Revolution of COD concentration in winter start-up

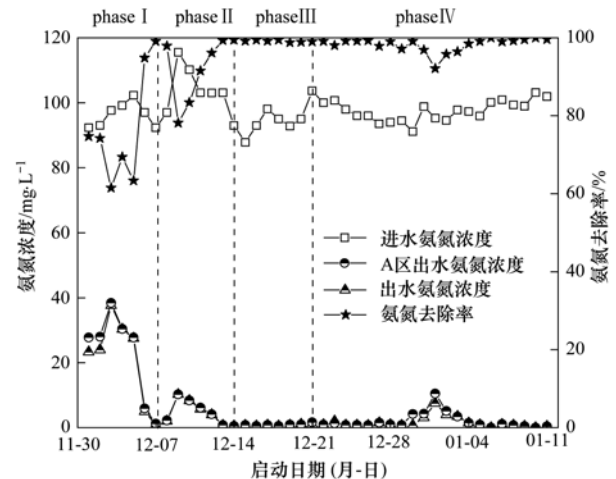


图 3 冬季启动过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 3 Revolution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in winter start-up

上升趋势; 15 ~ 28 d 平均去除率达 99.00%, 说明本系统即使在冬季低温启动, 氨氧化过程仍然可以较快地达到较高的水平. 但在 29 ~ 32 d 氨氮去除率下降至 92.11%, 生物膜表面附着大量黏稠状物质, 该物质可能与异养菌有关^[14], 此时 A 区 DO 为 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 采取开启搅拌器措施, 测得 A 区 DO 降低为 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 异养菌得到有效去除, 氨氧化率迅速恢复至 98.49%. 分析原因可能是由于生物膜因异养菌大量繁殖, 造成 O_2 传递受阻, 硝化细菌活性受到抑制, 开启搅拌机后不仅使 A 区悬浮微生物浓度增加, 而且增加了 O_2 的传递速度, 促使氨氧化作用恢复至高效. 启动末期氨氮平均去除率达到 99.21%, 出水浓度 $< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优于《中华人民共和国污水综合排放标准》一级 A 排放标准.

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进水负荷与去除负荷呈明显的直线相关关系, 线性相关系数 $R^2 = 0.9917$, 当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进水负荷达 $0.516 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 去除负荷为 $0.513 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 远大于同类型其他工艺 $0.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右的水平^[15]. 分析认为反应器较高的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 处理能力不仅来自于悬浮污泥中的硝化菌的贡献, 更与 A 区具有高孔隙率及比表面积、立体网络结构的亲水性填料密切相关, 硝化细菌 (AOB 和 NOB) 具有强烈的亲和依附固体介质生长的特性, A 区硝化细菌可以依附生物填料生长和繁殖, 不再因其世代时间较长而受制于 HRT 造成硝化细菌流失; 此外, 正如 You 等^[16] 发现生物膜-活性污泥复合系统中氨氧化细菌数量是单一活性污泥系统 3 倍, 即使处于低温环境反应器内污泥负荷仍处于较低水平.

2.3 低温启动过程 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积变化

启动过程 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积变化如图 4 所示. III、IV 阶段稳定运行期间 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积发生在 phase I 微生物低温适应期以及 phase IV 异养菌大量繁殖时, 据相关研究发现 NOB 的比增殖速率 μ 低于 AOB^[17], 处于 $12 \sim 14^\circ\text{C}$ 的 NOB 增殖较慢, 系统容易发生 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积, 此外, AOB、NOB 的氧饱和系数存在差异^[17~19], 分别为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低 DO 环境使得 NOB 细菌合成和启动亚硝酸盐氧化酶及电子传递体系受到严重抑制, NOB 数量和活性处于较低水平, 造成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积. 分析认为, phase I 发生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积是可能是由于 NOB 繁殖速度慢于 AOB 造成的, 这与邹海明等^[20] 的研究结果具有一致性, 此外, 反应器内 AOB、NOB 的顺次生长也可能

导致亚氮累积; phase IV 是由于异养菌大量繁殖造成低 DO 的微环境, 使得 NOB 的活性降低所致. 当 NOB 在 HRT 梯度刺激下富集生长适应低温环境后, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 迅速被氧化, 通过运行调节后系统内的 NOB 在低温环境下表现出高效的亚硝酸盐氧化能力.

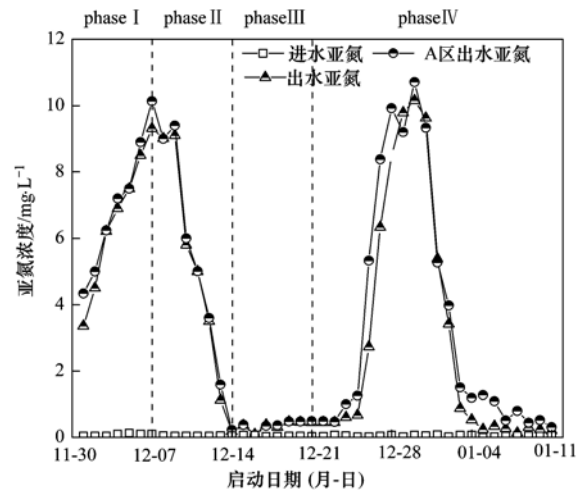


图 4 冬季启动过程 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度变化

Fig. 4 Revolution of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration in winter start-up

2.4 低温启动过程 TN 的去除

启动过程硝酸盐浓度变化及 TN 去除如图 5 所示. Phase I TN 去除率仅为 31.26%, 一方面受硝化作用影响, 另一方面 A 区生物膜反硝化作用以及 C 区缺氧反硝化作用均处于较弱状态; Phase II、Phase III 以及 Phase IV 前期, 随着启动时间的增加, TN 平均去除率由 34.00% 升高至 60.53%, 反硝化作用显著增强, TN 进水质量浓度由 $94.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, A、B、C 区出水 TN (主要是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 分别为 55.73、50.02、37.32 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由此可见, TN 的大量去除不

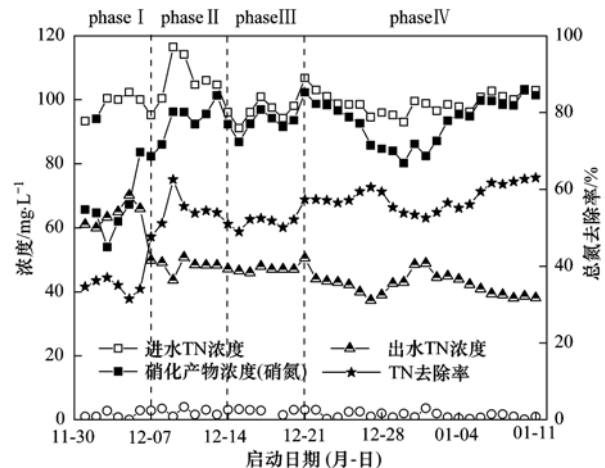


图 5 冬季启动过程 TN 浓度变化

Fig. 5 Revolution of TN concentration in winter start-up

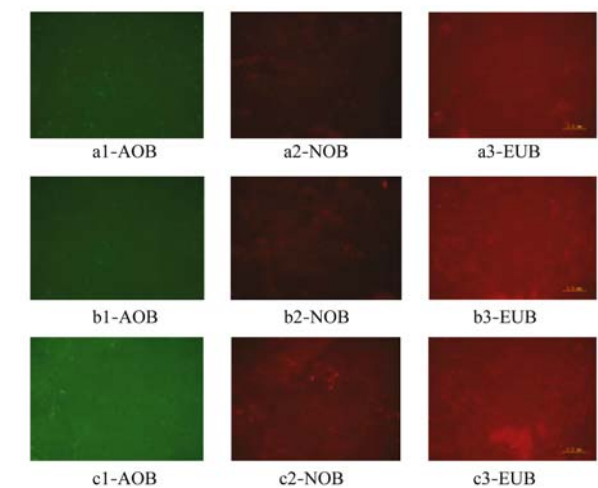
在 C 区缺氧区、而主要发生在 A 区, A 区观察到显著加厚的生物膜内部已形成良好的缺氧/厌氧环境,同时硝化反硝化效果增强,位于工艺末端的厌氧 C 区则因碳源不足未能充分发挥其脱氮作用。Phase IV 中期出现了 TN 去除率降低的现象,分析原因,其与 A 区硝化率降低有关,在 Phase IV 后期,在开启搅拌器硝化作用恢复后, TN 去除率升高至 63.00%。

微生物脱氮效果受温度影响较大,反硝化细菌的适宜温度为 20~40℃。高景峰等^[21]发现活性污泥系统中 15℃ 的反硝化速率仅是 25℃ 的 1/2,郑兰香等^[22]对生物膜系统的研究发现 13℃ 时的反硝化速率是 22℃ 的 0.63 倍,生物膜对温度的敏感度比活性污泥小^[23]。本实验在冬季 12 月启动,实时水温为 8~15℃,启动末期 TN 去除率达到 63.00%,生物膜生物量由 0.017 g·cm⁻² 增加至 0.037 g·cm⁻²,分析认为,增厚的生物膜有助于扩大膜内反硝化细菌生存空间和活动范围,实现膜内反硝化细菌富集生长,从而增强低温环境下反硝化作用效果。此外,由于系统进水为低碳氮比废水,该种废水脱氮较困难,实验在无外加碳源环境下,反应器 TN 去除负荷为 0.332 kg·(m³·d)⁻¹,高于其他^[15,24] 同类型反应器,后期可通过调节进水方式合理分配碳源进而提高反应器整体脱氮效率。

2.5 低温启动过程生物膜硝化细菌数量及结构的动态变化

硝化作用是脱氮过程的重要环节。AOB、NOB 细菌作为驱动该反应的关键微生物,其在反应器中存在的数量直接影响硝化作用的强度和硝化速率^[25]。实验利用 FISH 技术对种泥、第 10 d、第 40 d A 区填料生物膜内硝化细菌(AOB、NOB)及真细菌(EUB)的数量进行了研究,结果如图 6 及表 4 所示。启动过程中随着运行时间的增加 AOB、NOB、EUB 数量明显增加,启动到 40 d 三者数量分别是种泥的 5.82 倍、6.14 倍、2.23 倍;硝化细菌占总菌比例由 6.12% 上升至 16.38%,成为生物膜的优势菌群。分析认为, A 区 NH₄⁺-N 浓度较高,能够为 AOB、NOB 提供充足的营养物质,且设置在该区的亲水性填料为硝化细菌富集生长提供有利条件,从而使得在 40 d 硝化细菌数量增加并成为优势菌群。

硝化反应依靠 AOB、NOB 两者的相互协作、共同完成,二者的数量及比值结构直接关系到硝化反应的进程。启动至第 10 d AOB、NOB 数量分别是种泥的 1.48 倍、1.10 倍, AOB 比 NOB 数量增幅更大,分析原因可能是由于低温条件下 NOB 自身增殖速



a1~a3:种泥; b1~b3:第 10 d 泥样; c1~c3:第 40 d 泥样

图 6 种泥和生物膜第 10 d 泥样及第 40 d 泥样 FISH 图像

Fig. 6 FISH image of seed sludge and biofilm in the tenth day and the forty day

表 4 冬季启动过程硝化细菌数量变化

Table 4 Revolution of nitrobacteria in winter start-up

项目	种泥	生物膜 第 10 d 泥样	生物膜 第 40 d 泥样
N(AOB)/cell·mg ⁻¹	0.33 × 10 ⁸	0.49 × 10 ⁸	1.92 × 10 ⁸
N(NO ₂ ⁻)/cell·mg ⁻¹	0.21 × 10 ⁸	0.23 × 10 ⁸	1.29 × 10 ⁸
N(EUB)/cell·mg ⁻¹	0.88 × 10 ⁹	0.97 × 10 ⁹	1.96 × 10 ⁹
% AOB/%	3.74	5.08	9.78
% NOB/%	2.38	2.37	6.58
% (AOB + NOB)/EUB/%	6.12	7.45	16.38
AOB/NOB	1.57	2.14	1.47

率低于 AOB,以及 AOB 较 NOB 具有更低的氧饱和系数^[18],AOB 可较快地适应环境进行增殖,而 NOB 需要一定的适应期;当启动至第 40 d, AOB、NOB 数量分别是第 10 d 的 3.92 倍、5.61 倍,可见经过 40 d 启动运行 AOB、NOB 获得高效繁殖和富集生长,尤其是适应期较长的 NOB,由低数量劣势状态转变为生物膜的优势菌群。分析种泥、第 10 d 以及第 40 d 的 AOB/NOB 值,结合图 3 及图 4,可以看出,在第 10 d 前后,出现了 NO₂⁻-N 的积累峰,此时 AOB/NOB 值为 2.14,与种泥及第 40 d 相比比值较大,说明 NOB 的数量远小于 AOB,NOB 不能及时代谢 AOB 的产物 NO₂⁻-N,导致亚硝氮的累积,可以认为较少数量的 NOB 细菌以及较大的 AOB/NOB 比值是造成 NO₂⁻-N 累积的主要原因,这与 Kim 等^[26]研究具有一致性。与第 10 d 相比,第 40 d 的 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N 的硝化率为 97.52%,出水 NO₂⁻-N 质量浓度为 0.51 mg·L⁻¹,说明 AOB 产物 NO₂⁻-N 能够被足够量的 NOB 氧化为 NO₃⁻-N,完成硝化进程,此时

的 AOB/NOB 值为 1.47, 低于第 10 d 的比值 2.14, 接近于种泥 1.57, 没有 NO_2^- -N 的累积, AOB、NOB 的数量结构获得优化, 且 AOB、NOB 数量分别是第 10 d 的 3.92 倍、5.61 倍, 可以推断较高的硝化率与 AOB、NOB 的数量及其数量结构密切相关。实验中采用的亲水性填料, 为 AOB 和 NOB 提供良好的增殖环境, 即使在冬季低温下启动仍然获得了较高的硝化菌增殖速率及系统硝化率, 保证了硝化出水水质, 为后期反硝化作用提供充足的基质供应。

3 结论

(1) 四区一体式生物脱氮反应器能够稳定高效的脱氮及去除有机物, 设计合理。

(2) 冬季水温 $8 \sim 15^\circ\text{C}$ 下经 42 d 梯度缩短 HRT 方法成功完成反应器启动实验。启动末期获得稳定的 COD、 NH_4^+ -N、TN 去除率, 分别为 92.11%、99.21%、61.63%。

(3) 启动末期生物膜内 AOB、NOB、EUB 数量分别为 1.92×10^8 、 1.29×10^8 和 1.96×10^9 $\text{cell} \cdot \text{mg}^{-1}$, 是种泥的 5.82 倍、6.14 倍、2.23 倍, 硝化细菌占总菌量由 6.12% 上升至 16.38%, 成为生物膜的优势菌群。

(4) 启动末期硝化率由初期 78.49% 上升至 97.52%, AOB/NOB 值优化至 1.47, 反应器内富集生长的 AOB、NOB 及合适的 AOB/NOB 比值是确保硝化出水水质的重要保障。

参考文献:

- [1] 张莉. 分散农村污水处理模式分析[J]. 资源节约与环保, 2013, (6): 99.
- [2] 彭举威, 汪诚文, 付宏祥, 等. 分散农村污水处理模式分析[J]. 环境与可持续发展, 2010, (1): 28-30.
- [3] Shen D S, Huang B C, Liu P Q, *et al.* Factors influencing nitrogen removal in a decentralized sewage treatment reactor [J]. *Journal of Chemistry*, 2013, 2013: Article ID 296312.
- [4] Nakajima J, Tanaka R. Effectiveness of flow stabilization in small-scale wastewater treatment facilities[J]. *Water Science & Technology*, 2005, **51**(11): 167-174.
- [5] Sarti A, Garcia M L, Zaiat M, *et al.* Domestic sewage treatment in a pilot-scale anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, **51**(1): 237-247.
- [6] Ye C, Hu Z B, Kong H N, *et al.* A new soil infiltration technology for decentralized sewage treatment: two-stage anaerobic tank and soil trench system[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(3): 401-408.
- [7] 刘智晓, 崔福义, 句立展, 等. 多级生物膜过滤工艺处理生活污水的研究[J]. 中国给排水, 2009, **24**(13): 9-13.
- [8] 张岩, 孙凤侠, 张中, 等. 四区一体式脱氮反应装置[P]. 中国专利: CN 2014201726105, 2014-10-15.
- [9] Clifford E, Nielsen M, Sørensen K, *et al.* Nitrogen dynamics and removal in a horizontal flow biofilm reactor for wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2010, **44**(13): 3819-3828.
- [10] 曾薇, 杨庆, 张树军, 等. 采用 FISH、DGGE 和 Cloning 对短程脱氮系统中硝化菌群的比较分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 734-739.
- [11] 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.
- [12] 张岩, 杨正阳, 王丽丽, 等. 一种荧光原位杂交细胞计数的绝对定量方法[P]. 中国专利: CN2012102588841, 2014-04-02.
- [13] Mobarry B K, Wagner M, Urbain V, *et al.* Phylogenetic probes for analyzing abundance and spatial organization of nitrifying bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(6): 2156-2162.
- [14] Lee L Y, Ong S L, Ng W J. Biofilm morphology and nitrification activities: recovery of nitrifying biofilm particles covered with heterotrophic outgrowth[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(2): 209-214.
- [15] 丁永伟, 王琳, 王宝贞, 等. 用复合式工艺提高活性污泥/生物膜法处理效率[J]. 中国给排水, 2006, **22**(11): 104-108.
- [16] You S J, Hsu C L, Chuang S H, *et al.* Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS-RBC and A2O systems [J]. *Water Research*, 2003, **37**(10): 2281-2290.
- [17] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics [J]. *Water Research*, 2006, **40**(5): 887-894.
- [18] Hermansson A, Lindgren P E. Quantification of ammonia-oxidizing bacteria in arable soil by real-time PCR[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(2): 972-976.
- [19] 李东, 陶晓晓, 李占, 等. SBR 亚硝化快速启动过程中影响因子研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2317-2322.
- [20] 邹海明, 吕锡武, 李婷. 反硝化除磷-诱导结晶磷回收工艺试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(4): 127-132.
- [21] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹, 等. 不同碳源及投量对 SBR 法反硝化速率的影响[J]. 给水排水, 2001, **27**(5): 55-58.
- [22] 郑兰香, 鞠兴华. 温度和 C/N 比对生物膜反硝化速率的影响[J]. 西南给排水, 2005, **32**(2): 31-33.
- [23] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [24] 邓时海, 李德生, 卢阳阳, 等. 集成模块系统同步硝化反硝化处理低碳氮比污水的试验[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2259-2265.
- [25] Schramm A, de Beer D, van den Heuvel J C, *et al.* Microscale distribution of populations and activities of *Nitrosospira* and *Nitrospira* spp. along a macroscale gradient in a nitrifying bioreactor: quantification by in situ hybridization and the use of microensors [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(8): 3690-3696.
- [26] Kim D J, Lee D I, Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(3): 459-468.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行