

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH₄浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM₁₀中多环芳烃的污染特征及来源分析 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H₂S废气性能研究 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 刘静,路凤,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO₃⁻的存储和运移 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC_s)产生机制研究 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型

罗荣强^{1,2}, 侯沙沙^{1,3}, 沈加正¹, 陈珠^{1,2}, 刘鹰^{1*}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033)

摘要: 生物滤器是海水循环水养殖系统中的核心水处理单元, 其主要用于去除对养殖生物有害的氨氮、有机物等。本研究基于吸附原理和一级反应生物膜理论构建了氨氮在生物滤器中沿程转化规律的数学模型, 并通过实验加以验证。实验所用生物滤器采用竹制空心生化球填料, 装填高度为 70 cm, 在 pH 为 7.1~7.6, DO 为 5~7 mg·L⁻¹, 气水比 20:1 左右, 有机负荷约为 4 g·(m³·h)⁻¹, 水力停留时间(HRT)为 1 h 条件下, 生物滤器中氨氮的去除主要发生在填料高度 0~10 cm 处, 10~70 cm 处氨氮去除量很少。进水氨氮质量浓度的增大和水力停留时间的降低都会导致出水氨氮质量浓度增大。此外, 模型对进水氨氮质量浓度较低时的沿程出水氨氮质量浓度具有很好的预测效果; 当进水氨氮质量浓度较高时, 预测值略低于实际结果。

关键词: 海水养殖废水; 生物滤器; 水力停留时间; 氨氮转化; 数学模型

中图分类号: X714 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3189-08

Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter

LUO Rong-qiang^{1,2}, HOU Sha-sha^{1,3}, SHEN Jia-zheng¹, CHEN Zhu^{1,2}, LIU Ying¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Environment and Municipal Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: This study investigates the biological aerated filter (BAF) of a marine recirculating aquaculture system, which is important to remove harmful ammonia and organics. A model, characterizing the ammonia transformation along the BAF, was established on the basis of the principle of adsorption and the first order reaction bio-film. Experiments were performed and verified the effectiveness of the proposed model. The target BAF was packed with bamboo ring for 70 cm high. Study under the conditions [pH 7.1-7.6, DO 5-7 mg·L⁻¹, gas water ratio about 20:1, organic load about 4 g·(m³·h)⁻¹] shows that ammonia is removed significantly under the 10 cm height of medium, while less ammonia is removed between 10-70 cm. Experimental results confirm that the model predicts the ammonia concentration along the BAF accurately with a low influent ammonia concentration, but the predicted value is slightly lower than the true value with a high influent ammonia concentration. Study on ammonia concentration along the BAF reveals that the effluent ammonia concentration increases along with either the increment of the influent ammonia concentration or the reduction of the hydraulic retention time.

Key words: marine aquaculture wastewater; biological aerated filter (BAF); hydraulic retention time (HRT); ammonia transformation; mathematic model

海水封闭循环水养殖被普遍认为是解决环境污染、提高水产品质量的有效途径^[1]。生物滤器作为海水循环水养殖的核心水处理单元, 主要作用是去除养殖废水里的氨氮、有机物以及增氧等。海水养殖废水的主要污染源来自鱼类的代谢产物、残饵等, 含有较高的氮化合物^[2]。这部分含氮化合物主要是以氨氮形式存在, 并且可以通过微生物转化成亚硝酸盐氮和硝酸盐氮。氨氮、亚硝酸盐氮对养殖生物具有一定的毒性^[3]。因此如何快速将养殖废水中的氨氮转化成硝态氮是生物滤器成功运行的关键。目前, 对生物滤器的研究主要集中在生活污水和工业废水等淡水处理领域, 对于海水养殖废水处理方面, 特别是硝化反应动力学的研究仍然有

限^[4,5], 生物滤器内部的氨氮转化过程仍然被认为是一个“黑箱”。

本研究通过构建生物滤器的硝化反应动力学数学模型, 利用人工配制海水养殖废水, 分析了氨氮质量浓度随填料高度和水力停留时间(HRT)的变化规律, 以期对生物滤器的优化设计和实际生产过程中对氨氮控制提供理论指导。

收稿日期: 2011-11-16; 修订日期: 2012-03-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-EW-Q212); 公益性行业科研专项(201003024); 国家自然科学基金项目(30972267)

作者简介: 罗荣强(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与资源化技术, E-mail: lrq2005qrl@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yinliu@qdio.ac.cn

1 材料与方 法

1.1 实验装置

实验所用生物滤器由圆柱形灰色 PVC 管制作,直径 Φ 为 11 cm、高为 100 cm,填料装填高度为 70 cm,滤器的有效体积约为 6.6 L. 滤器底部 10 cm 处安装穿孔布水板以支撑填料,布水板下方是气-水混合室,起均匀布水和气-水混合的作用. 人工配置的模拟海水养殖废水由潜水泵提升至分液器,由重力压差分别进入反应器底部. 潜水泵、分液器和生物滤器之间均通过硅胶管($\Phi 8$ mm)连接. 在滤器沿程布设了 4 个取样口,取样高度分别为:10、30、50 和 70 cm. 如图 1 所示.

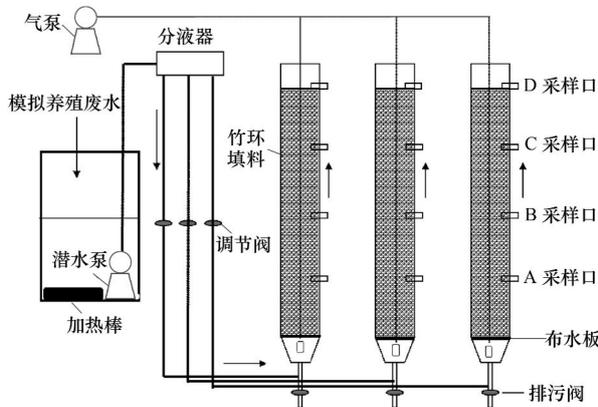


图 1 实验生物滤器示意

Fig. 1 Schematic diagram of biofilter system

1.2 实验材料

实验生物滤器所用填料为竹制空心生化球填料(专利号:ZL02158870.8 的改进型填料),它是以竹子为原料制成的,相对密度为 0.78,粒径为 8~12 mm,表观密度为 $(0.45 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,真密度为 $(0.71 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比表面积为 (0.90 ± 0.035)

$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,填料在滤器中密实均匀填装,装填高度为 70 cm,质量为 3.4 kg,如图 2 所示. 竹制空心生化球填料自身能够提供有机营养物质,其特殊的空隙结构和较大的比表面积有利于微生物的生长,对海水养殖废水具有良好的处理效果,并且造价低廉,取材方便,是一种较理想的填料^[6].



图 2 竹质空心生化球填料实物

Fig. 2 Actual bamboo ring medium

1.3 人工配制的海水养殖废水

为了真实还原生产上的海水养殖废水,本实验所用的养殖废水是通过养殖场中所收集的鱼残饵粪便和鱼饲料按 1:1 质量比进行混合配置的.

实验中的残饵粪便和饲料均来自山东东方海洋科技股份有限公司鱼类养殖场. 将残饵粪便和饲料晾晒后分别进行研磨粉碎,然后用 100 目尼龙筛绢筛除较大的颗粒. 配置养殖废水前,将 100 g 残饵粪便和 100 g 饲料用少量水混匀,放置在阴暗处发酵 1 d,使得较大的颗粒分解以及有机质充分溶解于水中. 配水时,把发酵后的溶液经 100 目的筛绢过滤后,将滤出液溶于 1.36 m^3 海水中作为模拟养殖废水使用,其水质指标如表 1 所示.

表 1 模拟养殖废水的常规水质指标

Table 1 Water quality of source water

高锰酸盐指数 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总氨氮 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	pH	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
8~12	0.5~2	0.002~0.008	0.2~0.6	20~28	7.14~8.40	4~8

1.4 水质分析项目及方法

实验期间,主要的水质指标有总氨氮、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、DO、pH、温度等,具体测定方法参考文献[7,8],详见表 2.

2 硝化动力学模型

生物滤器对废水中氨氮的去除主要是通过多孔

填料的吸附作用以及填料上的硝化细菌来完成. 在水力的推动以及水质的影响下,氨氮首先被填料吸附进而被氨氧化细菌氧化成亚硝酸盐氮,并进一步被亚硝酸盐氧化细菌氧化成硝酸盐^[9].

2.1 基本假设

同一批次配制的养殖废水,进水氨氮质量浓度以及液相流速保持稳定,不会出现剧烈波动;液相

在生物滤器流动方式为推流,即只考虑氨氮纵向的衰减,同一个填料高度的液相氨氮浓度不变;由于生物滤器中曝气充分,不考虑反硝化作用^[10,11],氧气不作为限制性底物来考虑;由于配水前的发酵,进水中通过有机氮转化的氨氮忽略不计;生物膜经过4个月的挂膜,其结构和生物量已经稳定;由于温度、压力等参数变化不大,吸附过程按理想状态处理。

表2 分析项目和方法

分析项目	分析方法	仪器
高锰酸盐指数	碱性高锰酸钾法	自动滴定器
总氨氮	纳氏试剂法	UNIC7200 紫外分光光度计
NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	同上
NO ₃ ⁻ -N	锌镉还原法	同上
pH	仪器法	YSI 便携式 pH 计
DO	仪器法	YSI 便携式测量仪
T	温度计	温度计

2.2 模型的建立

在理想状态下,海水养殖废水氨氮在生物滤器内流动,部分氨氮吸附在竹质空心生化球填料的表面,进而被填料表面的生物膜降解。整个吸附过程分为3个阶段:①吸附质外部扩散阶段。在这个阶段,氨氮通过存在于竹质空心生化球填料周围的溶剂薄膜到达填料的外表面;②氨氮内部扩散阶段,透过液膜的氨氮进一步向生物膜间隙、填料孔隙以及内部微孔进行扩散;③扩散反应阶段,氨氮在生物膜内扩散,并被微生物利用以进行自身的代谢活动。根据吸附原理^[12,13],在理想状态下,液相中氨氮的吸附速率与其自身的浓度和填料的表面积成正比。即:

$$dc_i/dt = -k \cdot S \cdot c_i \quad (1)$$

式中, c_i 为溶液中氨氮质量浓度; S 为填料的表面积; k 为吸附速率常数。

氨氮扩散到生物膜上,被硝化细菌转化为亚硝酸盐氮,并进一步氧化成硝酸盐氮^[14]。



如果生物膜上的硝化反应遵循零级反应规律,则生物膜降解氨氮的速率与氨氮质量浓度无关,即:

$$dc_i/dt = -r \quad (2)$$

根据生物膜边界条件: $t=0$ 时, $c_i=c_0$,得到:

$$c_i = c_0 - r \cdot t$$

如果生物膜上的硝化反应遵循一级反应规律,则氨氮降解速率与氨氮质量浓度成正比^[15]。

$$dc_i/dt = -r \cdot c_i \quad (3)$$

根据生物膜边界条件: $t=0$ 时, $c_i=c_0$,得到:

$$c_i = c_0 \cdot e^{-rt}$$

然而,在生物滤器内部,由于填料规格的不均匀以及生物膜结构的不确定性,生物膜往往不是均匀地分布在填料表面,氨氮的吸附-反应过程并不是简单的独自先后进行的,往往是在吸附过程中进行反应,而且硝化反应过程也并不只在表面吸附之后才发生。因此,氨氮在填料内的吸附-反应过程很难通过单一的模型进行模拟,通过填料的表面吸附过程所去除的氨氮往往要小于实际去除的氨氮。为了便于模拟,这里将整个吸附-反应过程分解成2个独立的过程,即:在单位体积(表面积)填料内,去除的氨氮总量分别由吸附过程和反应过程独立地完成。进水中的氨氮总量分成两部分独立地进行去除,如图3所示。

$$\Delta c_i = a \cdot \Delta c_i + (1-a) \Delta c_i = \Delta c_{i,1} + \Delta c_{i,2} \quad (4)$$

式中, a 为分配比,用于吸附过程的氨氮量占总氨氮的比例; $\Delta c_{i,1}$ 为吸附去除氨氮的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\Delta c_{i,2}$ 为硝化反应去除氨氮的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

简化后:

$$\text{氨氮去除总量} = S1 + S2 - S3 = S1' + S2'$$

如图4所示,根据物料衡算,在高度为 Δh 的填料中,流入 h 截面氨氮的量等于流出 $h+dh$ 截面的氨氮与 Δh 段消耗的氨氮之和:

$$\text{输入} = \text{输出} + \text{消耗}$$

分别对吸附过程和反应过程做物料衡算。

吸附过程:

$$q_w \cdot c_{i,11h} = q_w \cdot c_{i,11h+\Delta h} + kc_{i,11h}A_s(1-f)S \cdot \Delta h \quad (5)$$

式中, q_w 为氨氮流量, $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$; A_s 为填料比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; f 为填料孔隙率; h 为填料高度,cm; S 为横截面积,cm; $c_{i,11h}$ 为填料高度 h 时氨氮质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

由于 $S \cdot h \cdot f / q_w = \text{HRT}$,因此:

$$c_{i,1} = m \cdot \exp[-kA_s(1-f)/f \cdot \text{HRT}] \quad (6)$$

反应过程模型如下。

生物膜遵循零级反应时:

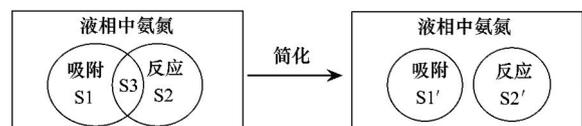


图3 吸附-反应简化示意

Fig. 3 Schematic diagram of simplified adsorption-reaction

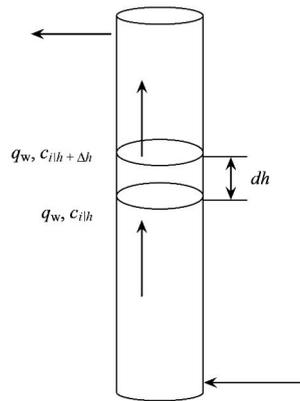


图 4 生物滤器物料衡算示意

Fig. 4 Schematic diagram of material balance in biofilter

$$q_w \cdot c_{i,2h} = q_w \cdot c_{i,2h+\Delta h} + r \cdot A_s (1-f) \cdot S \cdot \Delta h \quad (7)$$

解得:

$$\begin{aligned} c_{i,2} &= n - r A_s (1-f) S \cdot h / q_w \\ &= n - r A_s (1-f) / f \cdot \text{HRT} \end{aligned} \quad (8)$$

生物膜遵循一级反应时:

$$q_w \cdot c_{ih} = q_w \cdot c_{i,2h+\Delta h} + r c_{ih} A_s (1-f) S \cdot \Delta h \quad (9)$$

解得:

$$\begin{aligned} c_{i,2} &= n \cdot \exp[-r A_s (1-f) S \cdot h / q_w] \\ &= n \cdot \exp[-r A_s (1-f) / f \cdot \text{HRT}] \end{aligned} \quad (10)$$

生物膜遵循零级反应时,氨氮质量浓度与 HRT 的关系:

$$c_i = c_{i,1} + c_{i,2} = m \cdot \exp[-k A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] + n - r A_s (1-f) / f \cdot \text{HRT} \quad (11)$$

生物膜遵循一级反应时,氨氮质量浓度与 HRT 的关系:

$$c_i = c_{i,1} + c_{i,2} = m \cdot \exp[-k A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] + n \cdot \exp[-r A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] \quad (12)$$

式中, n 、 m 均为常数。

边界条件:当 $\text{HRT}=0$ 时, $c_i = c_0$, 得到遵循零级反应的生物膜和遵循一级反应的生物膜的总出水氨氮质量浓度与 HRT 的关系分别如式(13)、(14)所示:

$$c_i = a \cdot c_0 \cdot \exp[-k A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] + (1-a) \cdot c_0 - r A_s (1-f) \cdot \text{HRT} \quad (13)$$

$$c_i = a \cdot c_0 \cdot \exp[-k A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] + (1-a) \cdot c_0 \cdot \exp[-r A_s (1-f) \cdot \text{HRT}] \quad (14)$$

2.3 模型验证

2.3.1 实验结果与分析

在生物滤器稳定运行期,进水氨氮质量浓度 $0.5 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 调节水力停留时间为 1 h, 则在填料

高度 10、30、50 和 70 cm 处的水力停留时间分别为 8.6、25.71、42.86 和 60 min, 控制气水比为 20 ~ 25, 得到氨氮质量浓度沿程变化如图 5 和 6 所示。

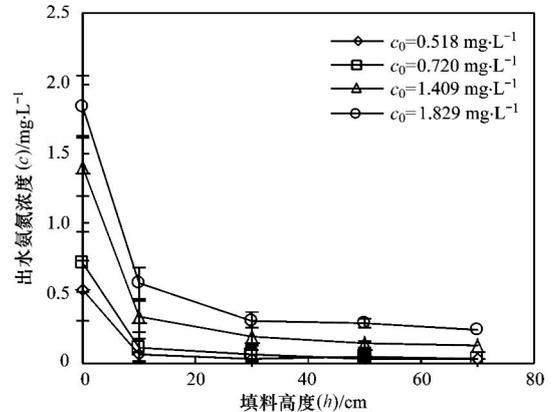


图 5 填料高度对出水氨氮质量浓度的影响

Fig. 5 Influence of filler height to effluent ammonia

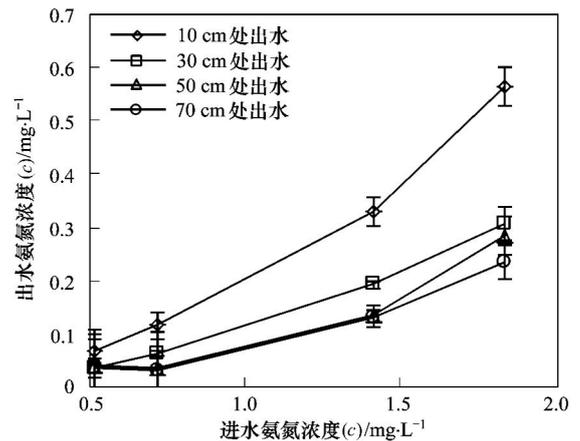


图 6 进出水氨氮质量浓度对出水氨氮质量浓度的影响

Fig. 6 Influence of influent ammonia to effluent ammonia

由图 5、6 可以看出,在生物滤器内部,氨氮质量浓度随着填料高度的增加而降低,氨氮的主要去除区域为生物滤器的 0 ~ 10 cm 处。填料高度在 10 cm 以上时,氨氮出水浓度有小幅下降,但比较缓慢。在进水氨氮质量浓度分别为 0.518、0.720、1.409 和 1.829 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,填料高度 10 cm 处氨氮去除率分别为 87.0%、83.9%、76.6% 和 69.0%。而填料高度 10 ~ 70 cm (最终出水)处氨氮的去除率分别为 11.8%、5.9%、14.3% 和 18.1%。而在同一个填料高度下,氨氮的出水浓度是随着进水浓度的增大而增大,70 cm 处的出水氨氮质量浓度最小。这是由于氨氮在扩散的过程中,不断地被填料吸附并且被硝化细菌利用,导致氨氮质量浓度的降低。根据 Langmuir 吸附原理以及一级生物膜理论,氨氮的吸

附速率和硝化反应速率随着氨氮质量浓度的降低而变慢. 因此在填料高度 30、50 和 70 cm 处, 氨氮质量浓度变化很缓慢.

图 6 表明, 随着进水氨氮质量浓度的增大, 同一填料高度的出水氨氮质量浓度也增大, 这是因为在生物滤器底层的硝化细菌由于数量和与氨氮接触时间尚不足以充分降解液相中的氨氮, 使得未降解的氨氮转移到下一个填料层, 导致出水氨氮质量浓度增大.

2.3.2 参数获得

在生物滤器稳定运行期间, 控制水力停留时间为 60 min, 实验所用模型训练集为: 氨氮进水浓度为 $1.409 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别于填料高度 10、30、50 和 70 cm 处取样所得的氨氮质量浓度, 每个高度设 3 个重复. 模型中反应过程所用的模型为一级生物膜模型, 氨氮的进水以及各点出水浓度分别为 1.409 、 0.330 、 0.193 、 0.135 和 $0.129 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据已建立的模型, 利用 Matlab tool 进行拟合, 结果如图 7 所示.

由拟合结果看出, 生物滤器中的沿程氨氮变化与建立的一级生物膜-吸附模型有很好的符合度. 将所得参数代入建立的模型, 分别以进水氨氮质量浓度、HRT 和出水氨氮质量浓度为 X 轴、Y 轴和 Z 轴,

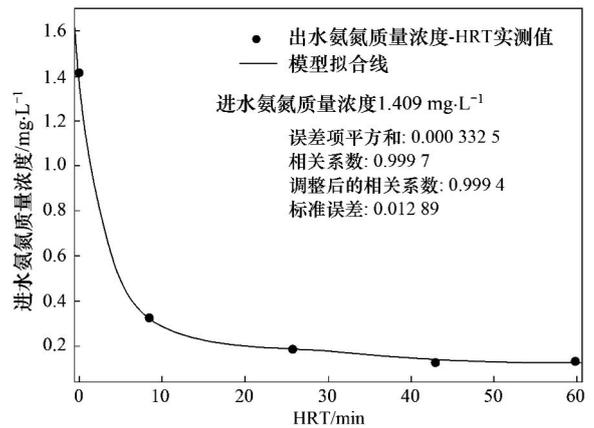


图 7 利用 Matlab tool 进行拟合结果

Fig. 7 Fitting curve by Matlab tool

利用 Matlab 画出模型所描述的进水氨氮质量浓度-HRT-出水氨氮质量浓度 3D 图 [matlab 调用格式 $\text{mesh}(x,y,z)$], 如图 8 所示.

图 8(a) 可以看出, 降低进水氨氮质量浓度和增大水力停留时间都会使得出水氨氮质量浓度变小, 图 8(b) 则说明随着进水浓度的增大, 要想得到一个稳定的氨氮出水浓度, 则必须增大氨氮在生物滤器中的水力停留时间. 特别是在要求出水氨氮质量浓

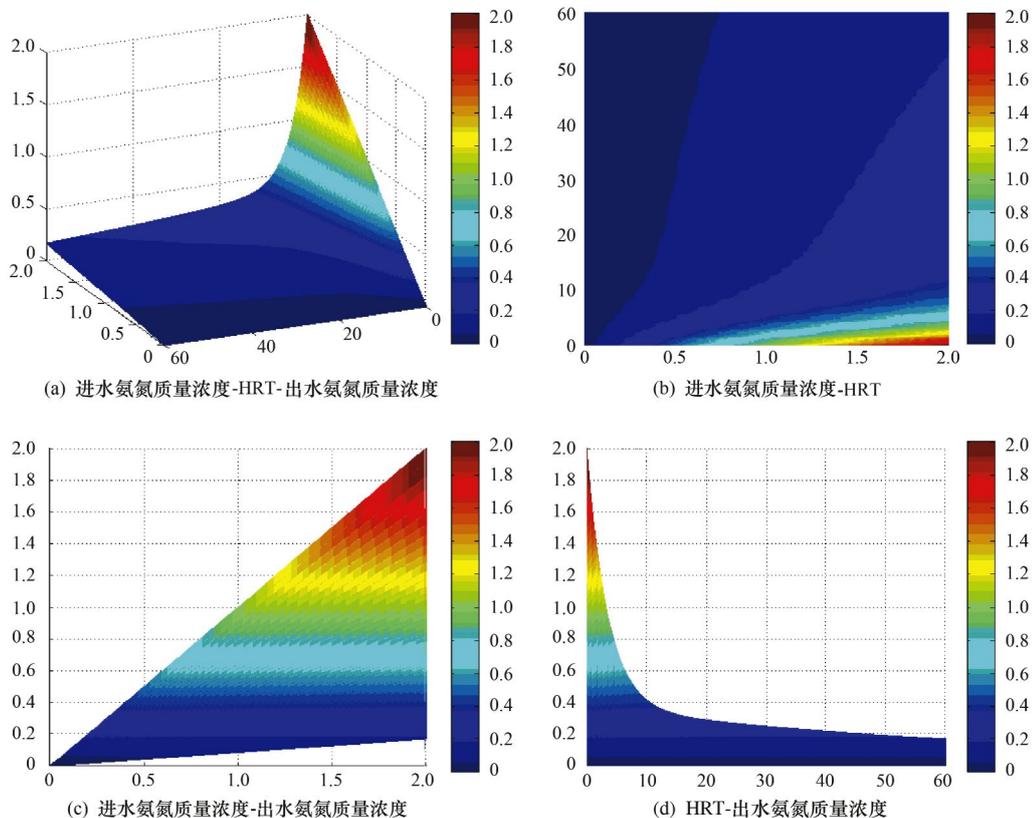


图 8 进水氨氮质量浓度-HRT-出水氨氮质量浓度关系图

Fig. 8 Relationship of influent ammonia, HRT and effluent ammonia

度较低的情况下,进水氨氮的微小变化将会需要较大的水力停留时间增量来弥补. 图 8(c)是在水力停留时间恒定的情况下,进水氨氮质量浓度与出水氨氮质量浓度的关系图,可以看出进水氨氮质量浓度与出水氨氮质量浓度呈正相关. 图 8(d)是在进水氨氮质量浓度恒定的情况下,出水氨氮质量浓度先是随着水力停留时间的增大而急剧降低,随后趋于稳定. 以本实验为例,氨氮去除区域主要集中在填料高度的前 10 cm,即 HRT = 8 min.

2.3.3 结果验证

生物滤器总水力停留时间为 60 min,则此时在生物滤器 10、30、50 和 70 cm 处的水力停留时间为 8.57、25.71、42.86 和 60 min,不同进水氨氮质量浓度下的沿程氨氮质量浓度模拟结果如图 9 所示.

图 9 显示,在 HRT 为 60 min 时,模型对不同进水氨氮质量浓度下的各填料高度出水的预测效果较好,最大的预测误差为 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出现在进水氨氮质量浓度为 $1.829 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,填料高度为 10 cm 处.

另外,通过改变进水氨氮质量浓度和水力停留时间,检测生物滤器沿程出水氨氮质量浓度得到沿程出水氨氮质量浓度的实验值和预测值关系,图 10 中实验编号 1、6、11、16、21、26 和 31 为进水氨氮质量浓度,每个进水后的 4 个点分别为 10、30、50 和 70 cm 所对应的出水氨氮质量浓度,每组设 3 个重复. 此外,实验编号 1、6、31 所对应的生物滤器总的 HRT 为 60 min,实验编号 11 所对应的生物滤器总的 HRT 为 120 min,实验编号 16 所对应的生物滤器总的 HRT 为 20 min,21 和 26 所对应的生物滤器总的 HRT 为 30 min.

从图 10 中可以看出,在生物滤器水力停留时间较短时,即液相流量较大的情况下,模型预测结果与实际值存在较大偏差. 图 10 显示进水氨氮质量浓度为 0.518、0.720、0.829 以及 $0.833 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下,模型具有良好的预测效果,误差在 $0.01 \sim 0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接近纳式试剂法的重复性精密度(纳式试剂法测定氨氮的重复性精密度为 $0.028 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,再现性精密度为 $0.075 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [16]). 在进水氨氮质量浓度为 0.95、1.067 以及 $1.829 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,模型预测结果与实际结果有一定偏差,几乎都在 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,最大误差甚至超过 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 但氨氮去除和填料高度变化规律,模型和实际结果是一致的. 以氨氮进水浓度为 $0.518 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.067 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总水力停留时间 60 min 为例,沿程氨氮变化实验值与预测值如表 3 所示.

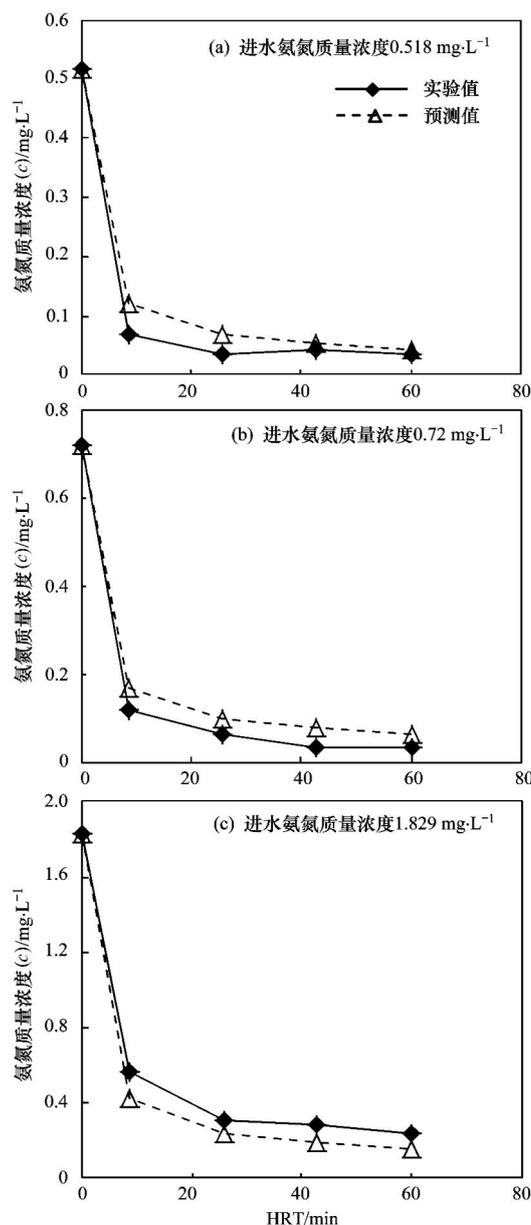


图 9 HRT 对出水氨氮的影响

Fig. 9 Influence of HRT to effluent ammonia

表 3 氨氮预测值与实验值比较

Table 3 Comparison of true value and calculated value of ammonia nitrogen

进水氨氮 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	填料高度 /cm	实验值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	预测值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	误差 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1.067	10	0.313 6	0.440 0	0.126 4
	30	0.234 2	0.188 3	0.045 9
	50	0.216 8	0.151 0	0.065 8
	70	0.222 1	0.133 7	0.088 4
0.518	10	0.067 5	0.121 5	0.054 0
	30	0.036 6	0.068 8	0.032 2
	50	0.042 0	0.054 9	0.012 9
	70	0.036 6	0.044 0	0.007 4

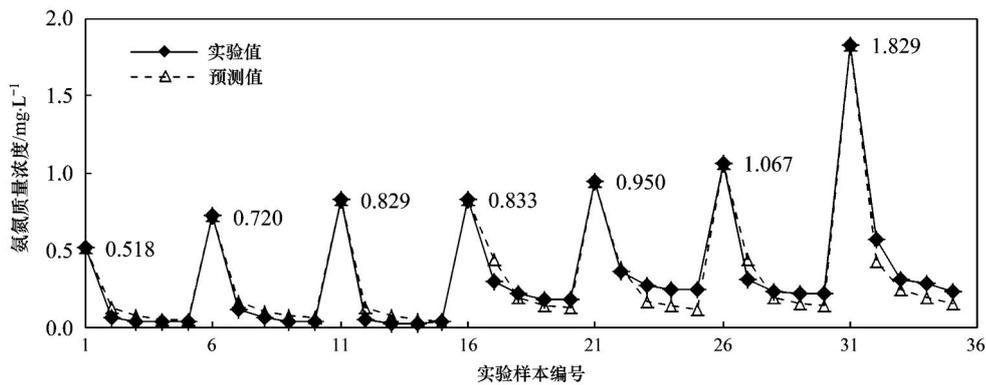


图 10 出水氨氮质量浓度实验值与预测值对比

Fig. 10 Comparison of true value and calculated value of ammonia-nitrogen in outlet

这种由于高浓度的进水氨氮所产生的预测误差的主要原因是:模型中所假设的生物膜为一级反应生物膜,应用的硝化反应速率为一级反应,这可能与实际情况存在差异.按照 Monod 方程理论^[17]:当底物浓度 \ll 半饱和常数时,硝化反应遵循一级反应动力学;当底物浓度 \gg 半饱和常数时,硝化反应遵循零级反应动力学.此外,高浓度的进水氨氮,也会导致填料表面的生物膜结构和功能发生变化^[18,19],这一点在模型中没有考虑,这些都会导致模型预测出现误差.

另外,由图 10 可以看出,在进水氨氮质量浓度变化不大的情况下,总水力停留时间 20 和 30 min 时,模型的误差比 60 和 120 min 要大.如在进水氨氮质量浓度为 $0.829 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.833 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, HRT 分别为 30 min 和 120 min,两者的沿程氨氮出水浓度预测误差也是前者大于后者,如表 4 所示.

表 4 氨氮预测值与实验值比较

Table 4 Comparison of true value and calculated value of ammonia nitrogen

HRT /min	填料高度 /cm	实验值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	预测值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	误差 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
120	10	0.043 3	0.127 4	0.084 1
	30	0.028 5	0.078 6	0.050 1
	50	0.025 8	0.050 5	0.024 6
	70	0.029 9	0.032 4	0.002 5
30	10	0.296 1	0.434 5	0.138 4
	30	0.220 8	0.187 8	0.032 9
	50	0.180 4	0.135 6	0.044 8
	70	0.176 4	0.120 8	0.055 6

在水力停留时间较小时,液相流速较大,使得流体的性质发生改变,生物滤器内部流体的混合状态由推流趋向于混流;此外,液相流速的增大,还会对填料表层的生物膜产生更大的冲刷作用,使得填料上的生物膜变薄而且更加致密.这

些因素都将使得模型的预测出现误差.综合考虑这些因素的影响,将会对模型的改进和完善提供很好的思路.

3 结论

(1)生物滤器的出水氨氮质量浓度随着填料高度的增加而降低,氨氮去除的主要区域为 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 处,去除率能达到 60% 以上.从 $10 \sim 70 \text{ cm}$ 氨氮的去除率仅从 60% 提高到 80% ~ 90%.

(2)在温度、pH 等外界条件一定的情况下,生物滤器出水氨氮质量浓度是由进水氨氮和 HRT 同时决定的.进水氨氮质量浓度的增加和 HRT 的减小都会导致出水氨氮质量浓度的增大.特别是在需要得到浓度较低的出水氨氮时,进水氨氮很小的增量将需要很大的 HRT 来弥补.

(3)基于吸附原理和一级反应生物膜理论获得的模型对生物滤器出水氨氮质量浓度有较好的预测能力,特别是在进水氨氮质量浓度较低的时候,模型预测的误差低于 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.对于进水浓度较高的情况,模型的预测值略低于实验值,这可能源于在高氨氮质量浓度下,生物膜的结构与功能发生改变或者硝化反应速率并不一定遵循一级反应动力学,从而导致预测结果有所偏差,这点有待进一步的研究和论证.但是,不管进水氨氮质量浓度的高低,模型对氨氮在滤器中的沿程变化趋势的预测与实际结果是一致的.

参考文献:

- [1] 刘鹰,杨红生,张福绥.设施渔业——作用与未来[J].中国水产,2003,(增刊):110-112.
- [2] Hagopian D S, Riley J G. A closer look at the bacteriology of nitrification[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 18(4): 223-244.
- [3] Gregory S P, Shields R J, Fletcher D J, et al. Bacterial

- community responses to increasing ammonia concentrations in model recirculating vertical flow saline biofilters[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(10): 1485-1491.
- [4] 张延青, 刘鹰, 石芳永, 等. 海水生物滤器除氮性能及硝化动力学研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(8): 1697-1703.
- [5] 徐洋, 高喜燕, 张延青, 等. 竹环填料生物滤器在两种海水鱼养殖废水处理中的运行效果及微生物群落分析[J]. *海洋科学*, 2010, **34**(3): 26-31.
- [6] 石芳永, 宋奔奔, 傅松哲, 等. 竹子填料海水曝气生物滤器除氮性能和硝化细菌群落变化研究[J]. *渔业科学进展*, 2009, **30**(1): 92-96.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会发布. 中华人民共和国国家标准 GB 17378.7-2007: 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. 113-117.
- [8] 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. 276-281.
- [9] Chen S L, Ling J, Blancheton J P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors [J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, **34**(3): 179-197.
- [10] 杨帅, 杨凤林, 付志敏. 移动床膜生物反应器同步硝化反硝化特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 803-808.
- [11] 邓康, 黄少斌, 胡婷. 曝气生物滤池好氧反硝化脱氮的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2945-2949.
- [12] 桑华俭, 俞文正, 陈丹, 等. 粉末活性炭对水中五氯酚的吸附效果研究及模型建立[J]. *电力建设*, 2009, **30**(10): 62-66.
- [13] 徐敬玉, 王勤, 陈光明, 等. 多孔颗粒吸附速度机理的研究[J]. *太阳能学报*, 2006, **27**(10): 1049-1052.
- [14] 孙锦宜. 含氮废水处理技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 27-44.
- [15] 陈黎明, 柴立和. 生物膜废水处理系统的数学模型及机理探讨[J]. *自然科学进展*, 2005, **15**(7): 843-848.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 环境保护部发布. 中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 535-2009: 水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [17] Devlinny J S D, Ramesh J. A phenomenological review of biofilter models[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, **113**(2-3): 187-196.
- [18] Wagner M, Loy A. Bacterial community composition and function in sewage treatment systems [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2002, **13**(3): 218-227.
- [19] Wäsche S, Horn H, Hempel D C. Influence of growth conditions on biofilm development and mass transfer at the bulk/biofilm interface[J]. *Water Research*, 2002, **36**(19): 4775-4784.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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

国内外公开发刊