

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM_{2.5} 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小微(817)

北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)

气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析 浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)

密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析 路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)

冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量 何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)

2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 李绪录, 周毅频, 夏华永(857)

渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)

青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)

漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选 徐华山, 徐宗学, 刘品(882)

面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法 邹锐, 周环, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)

九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)

修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)

去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究 李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)

北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)

城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)

城市景观娱乐水体微生物风险评价 孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)

模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究 李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)

膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究 范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)

γ -Al₂O₃负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)

活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学 杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)

ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究 杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)

O₃-BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律 余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)

规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究 王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)

连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立 张超, 陈银广(993)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟 张超, 陈银广(998)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用 张超, 陈银广(1004)

三峡水库两条支流水-气界面CO₂、CH₄通量比较初探 李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)

不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)

黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)

层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)

海州湾滩涂重金属污染的历史记录 张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)

草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)

大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)

典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)

典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)

城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)

典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)

生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)

三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)

Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)

新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)

青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源 何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)

太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 马召辉, 金军, 元奎奎, 王英, 姜霞, 何松浩, 李明圆(1136)

典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析 刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)

柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)

机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)

污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)

固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)

铸造废砂的环境毒性研究 张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)

Cr⁶⁺生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征 侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)

反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析 于皓, 王爱杰, 陈川(1190)

农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)

蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应 林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)

有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究 周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)

新建核电站风险信息沟通实证研究 贺桂珍, 吕永龙(1218)

《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)

规模化猪场养殖废水 UASB-SFSBR-MAP 处理工艺中试研究

王亮^{1,2}, 陈重军¹, 陈英旭^{2,3}, 吴伟祥^{1,3*}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学水环境研究院, 杭州 310058; 3. 农业部面源污染控制重点开放实验室, 杭州 310058)

摘要: 针对规模化猪场养殖废水常规厌氧-好氧组合处理工艺及 SBR 处理工艺脱氮效率低、运行费用高、养分流失大等技术难题, 提出了养殖废水“UASB-SFSBR(分步进水序批式反应器)-MAP(磷酸铵镁结晶)”处理工艺, 并开展了中试工程研究. 结果表明, UASB-SFSBR-MAP 处理工艺对 COD、 NH_4^+ -N 和 TP 的去除率分别达到 95.1%、92.7% 和 88.8%, MAP 氮磷回收率分别达 23.9% 和 83.8%. 工艺出水水质 $\text{COD} \leq 135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{TN} < 116 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NH_4^+ -N $< 43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{TP} \leq 7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{SS} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各项指标优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001). 该处理工艺稳定可靠, 生物脱氮过程保持系统碳源碱度自平衡, 实现碳氮磷高效处理和回收, 处理费用与传统厌氧-好氧处理工艺相当. 因此, UASB-SFSBR-MAP 组合处理工艺具有较高的推广应用价值, 适合我国规模化猪场养殖废水的达标处理.

关键词: 猪场养殖废水; 脱氮; 除磷; SFSBR; MAP; 结晶; 回收

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0979-07

Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment

WANG Liang^{1,2}, CHEN Chong-jun¹, CHEN Ying-xu^{2,3}, WU Wei-xiang^{1,3}

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Academy of Water Science and Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Non-Point Source Pollution Control, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this paper, a treatment process consisted of UASB, step-fed sequencing batch reactor (SFSBR) and magnesium ammonium phosphate precipitation reactor (MAP) was built to treat the large scale swine wastewater, which aimed at overcoming drawbacks of conventional anaerobic-aerobic treatment process and SBR treatment process, such as the low denitrification efficiency, high operating costs and high nutrient losses and so on. Based on the treatment process, a pilot engineering was constructed. It was concluded from the experiment results that the removal efficiency of COD, NH_4^+ -N and TP reached 95.1%, 92.7% and 88.8%, the recovery rate of NH_4^+ -N and TP by MAP process reached 23.9% and 83.8%, the effluent quality was superior to the discharge standard of pollutants for livestock and poultry breeding (GB 18596-2001), mass concentration of COD, TN, NH_4^+ -N, TP and SS were not higher than 135, 116, 43, 7.3 and 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. The process developed was reliable, kept self-balance of carbon source and alkalinity, reached high nutrient recovery efficiency. And the operating cost was equal to that of the traditional anaerobic-aerobic treatment process. So the treatment process could provide a high value of application and dissemination and be fit for the treatment of the large scale swine wastewater in China.

Key words: swine wastewater; nitrogen removal; phosphorous removal; SFSBR; MAP; crystallization; recovery

我国规模化畜禽养殖场达14 000多个, 畜禽养殖存栏量 123.6 亿头(只)· a^{-1} , 畜禽养殖业产值超过 1.4 万亿元, 占农业产值的 34%, 是关系国计民生的重要产业. 然而, 近年来我国畜禽养殖污染防治问题日益突出, 据 2010 年“第一次全国污染源普查公报”结果显示, 畜禽养殖业污染已经成为我国农业面源污染之首, 排放的化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)分别占农业面源污染的 95.78%、37.89% 和 56.30%. 目前, 规模化猪场一般采用常规厌氧沼气发酵和好氧 SBR 处理组合工艺, 厌氧段产沼效率低,

好氧段碳氮比(C/N)低, 高效脱氮除磷缺乏碳源, 碳源碱度失衡, 导致工艺普遍存在出水稳定性差、脱氮效率低、运行费用高、养分流失与污染严重等问题^[1-3]. 因此, 针对我国规模化养猪场养殖废水水质和养殖特点, 亟需开发一种高效低耗的污水处理工

收稿日期: 2012-05-09; 修订日期: 2012-08-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101012-03)

作者简介: 王亮(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为畜禽养殖废水脱氮除磷处理, E-mail: princewang1988@126.com

* 通讯联系人, E-mail: weixiang@zju.edu.cn

艺,有效治理规模化猪场养殖废水污染问题。

猪场养殖废水含有高浓度的 COD 和氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$),直接进行好氧处理会导致曝气费用大幅上升. 因而一般先采用厌氧处理降低 COD 负荷,但厌氧消化液 C/N 比低,又不利于微生物反硝化脱氮,因此,高效经济脱氮是猪场养殖废水处理的难点之一^[4]. 分步进水序批式反应器 (step-fed sequencing batch reactor, SFSBR) 是一种依靠缺氧段多步进水补充反硝化碳源的生物强化脱氮工艺,该工艺提高了反硝化碳源补给率,利用原水中碳源代替外加碳源,脱氮的同时系统碱度得到回补,实现脱氮过程碳源碱度自平衡,适用于猪场养殖废水脱氮^[5,6]. 除了高浓度的 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,猪场养殖废水还含有较高浓度的 TP,主要是溶解性磷 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$),目前多数研究侧重于猪场养殖废水脱氮,未能构建猪场养殖废水脱氮除磷体系,不利于污染物的全面去除. 而另一方面,磷又属于不可再生资源,因而有必要对废水中的磷进行回收利用^[7-10]. 磷酸铵镁结晶法 (magnesium ammonium phosphate precipitation process, MAP) 是利用废水自身含有的 Mg^{2+} 或外加 Mg^{2+} ,与废水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 发生化学反应生成磷酸铵镁 ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 结晶沉淀,可应用于猪场养殖废水的磷回收^[11]. 本研究以低 C/N 比规模化猪场养殖废水为对象,在固液分离

预处理条件下,构建了 UASB-SFSBR-MAP 组合处理工艺,在常温条件下进行中试研究,探讨该工艺处理规模化猪场养殖废水的可行性,以期组合工艺工程化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 中试研究系统

中试系统位于浙江省某规模化养殖场,该养殖场年出栏生猪 2 万头,采用干湿分离清粪方式,养殖废水主要是猪圈冲洗水和猪尿混合物. 原水水质: pH 7.2 ~ 7.6, SS 1 500 ~ 4 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 4 000 ~ 8 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, BOD_5 1 500 ~ 3 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 700 ~ 1 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 430 ~ 580 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 120 ~ 250 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 35 ~ 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 未检出。

猪场养殖废水固液分离-UASB-SFSBR-MAP 组合处理工艺流程如图 1 所示. 其中,UASB 反应器采用圆柱体不锈钢结构,尺寸 $\phi 2.4 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$; SFSBR 采用立方体不锈钢结构,长 \times 宽 \times 高 = 4 m \times 4 m \times 2.2 m,底部均匀分布微孔曝气器; MAP 结晶反应器采用不锈钢结构,尺寸 $\phi 2.4 \text{ m} \times 1.9 \text{ m}$,反应区底部装有旋混散流曝气器,结晶收集区位于反应区下方,呈倒锥形,高 0.7 m. 该中试工程日处理猪场养殖废水 10 t.

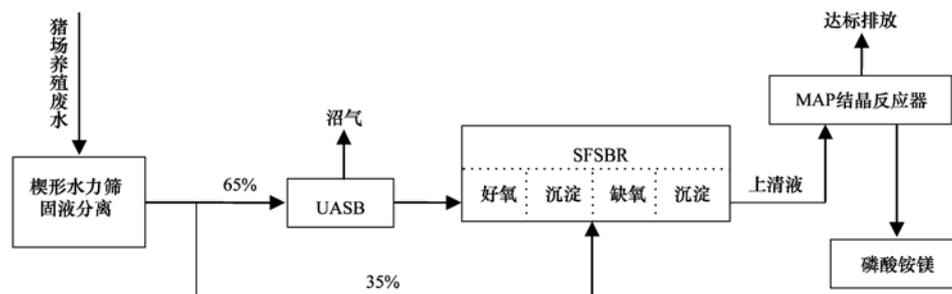


图 1 猪场养殖废水 UASB-SFSBR-MAP 中试处理工艺流程

Fig. 1 Pilot UASB-SFSBR-MAP process for swine wastewater treatment

1.2 接种污泥

UASB 反应器接种污泥取自该养殖场长期使用的废水集水池底泥,该池底泥富集了大量适应猪场养殖废水高 COD、高氮磷特性的厌氧微生物. 底泥取出过筛,去除大颗粒杂质后接种,接种平均污泥浓度 MLSS 1 000 ~ 1 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,开始调试后厌氧污泥实现快速增殖. SFSBR 接种污泥取自杭州四堡市政污水处理厂剩余干污泥,经清水淘洗去除杂质后接种,接种污泥浓度 MLSS 2 500 ~ 3 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 稳定运行实验在污泥接种并驯化 2 个月月开始。

1.3 实验过程

猪场养殖废水经不锈钢楔形水力筛固液分离,SS 去除率 80% 以上,固液分离后水中 COD、 BOD_5 、TN 及 TP 明显降低,具体水质如下: pH 7.2 ~ 7.6, SS 300 ~ 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 1 500 ~ 2 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, BOD_5 600 ~ 1 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 500 ~ 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 430 ~ 580 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 40 ~ 70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 35 ~ 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 未检出. 固液高效分离后,65% 的废水进入 UASB 罐,转化大部分 COD 并回收沼气,出水进入 SFSBR

好氧段处理,进一步降低 COD 并进行硝化反应,好氧段完成,系统静置,溶解氧(DO)降至 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,剩余 35% 未经厌氧消化的原水泵入 SFSBR 反应器并搅拌,SFSBR 进入缺氧段反硝化脱氮,缺氧段结束后,静置沉淀,上清液通过滗水器进入 MAP 结晶反应器,通过化学结晶沉淀回收氮磷,最后达标排放。

实验过程中,UASB 反应器采用间歇进水的运行方式,每天 09:00 ~ 10:30、15:00 ~ 16:30 各进 3.25 t 废水,共 6.5 t,水力停留时间 5.5 d。SFSBR

采用两步进水的运行方式,各反应阶段时间分配见图 2。进水 1 为 UASB 反应器出水,采用限制性曝气方式进水,每次进水时间 1 h,水量 6.5 t; 进水完成后开启曝气机,控制曝气过程 DO $2 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,曝气时间 6 h; 曝气完成后系统静置 1 h,使 DO 降至 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,避免后续反硝化过程中的碳源被好氧微生物利用; 进水 2 为未经 UASB 厌氧消化的原水,进水时间 0.5 h,水量 3.5 t,进水完毕开启搅拌机,缺氧反硝化段耗时 6 h; 反硝化完成后,沉淀 1 h,上清液通过滗水器进入 MAP 反应器。

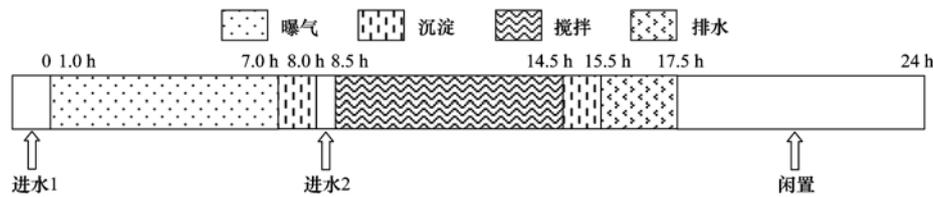


图 2 SFSBR 运行策略

Fig. 2 Operating strategy of SFSBR system

MAP 反应器内装有旋混散流曝气器,利用回转风机对上清液进行曝气搅拌,利用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液调节至 pH 9.0 ~ 9.5^[12],投加工业氯化镁,使 $n(\text{Mg})/n(\text{P})$ 为 1.5 ~ 1.9^[13], Mg^{2+} 、 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 生成磷酸铵镁 (MgNH_4PO_4) 沉淀,回收用作缓释肥,结晶反应在 2 h 内完成。

1.4 分析方法

pH 用雷磁 pHs-25 型数字 pH 计测定; COD 用哈希快速试剂盒 (测试范围 $20 \sim 1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 测定; SS、 BOD_5 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、MLSS 采用国标法测定^[14]。

2 结果与讨论

2.1 UASB 对废水 COD、 NH_4^+-N 和 TP 的影响

实验过程中,UASB 反应器容积负荷 (以 COD 计) 为 $0.3 \sim 0.5 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,COD 去除率 77% ~ 84%,出水 COD 在 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,反应器表现出良好的 COD 去除能力,如图 3 所示。反应器日产沼气 $1.8 \sim 3.6 \text{ m}^3$,因产生量少,沼气经净化后安全排放。

从图 3 可以看出,厌氧过程对 NH_4^+-N 没有明显去除效果。进水 NH_4^+-N 浓度波动较大,且 UASB 反应器出水 NH_4^+-N 浓度与进水 NH_4^+-N 浓度变化不同步。可能是 UASB 反应器 HRT 长,废水在反应器中滞留所造成。总体来看,出水 NH_4^+-N 浓度略高于进

水,这是由于厌氧条件下,进水中部分有机氮转化为 NH_4^+-N 所致^[15]。实验条件下,UASB 处理对 TP 没有明显的去除效果,出水 TP 浓度时而比进水高,时而比进水低,主要是由于废水在反应器中滞留造成。

2.2 SFSBR 运行周期内 COD 及氮磷变化

基于传统 SBR 理念构建废水 SFSBR 处理工艺一直是研究的热点。文献[16,17]研究了剩余污泥发酵液添加对 SFSBR 处理市政污水脱氮除磷性能的影响后发现,剩余污泥发酵液经 MAP 法回收氮磷后完全可以取代外加碳源如甲醇、乙酸钠等,而且碳源利用率更高。Kampas 等^[18]利用高频疏解机裂解剩余污泥,将其作为碳源进行 SFSBR 脱氮除磷性能研究,得到了相似的结果。在利用 SFSBR 处理猪场养殖废水方面的研究主要集中在发酵猪粪添加取代外加碳源^[19,20]及 SFSBR 直接处理猪场原水^[21]等方面。本研究在 SFSBR 曝气段初期进 UASB 出水,搅拌段初期进原水,简化了工艺流程,实现脱氮过程碳源碱度自平衡,在 SFSBR 中实现碳氮同步去除。

SFSBR 反硝化过程需要碳源,为保证高效率脱氮同时回补碱度,需要在搅拌初期补充足量的原水,但是作为反硝化碳源的原水含有较高浓度的 NH_4^+-N 和 TP,添加过量容易造成 SFSBR 出水 NH_4^+-N 和 TP 浓度过高,增加 MAP 结晶回收成本。从工艺技术经济性考虑,并结合该猪场养殖废水水质,确定 SFSBR 每日处理 UASB 出水 6.5 t,原水 3.5 t。

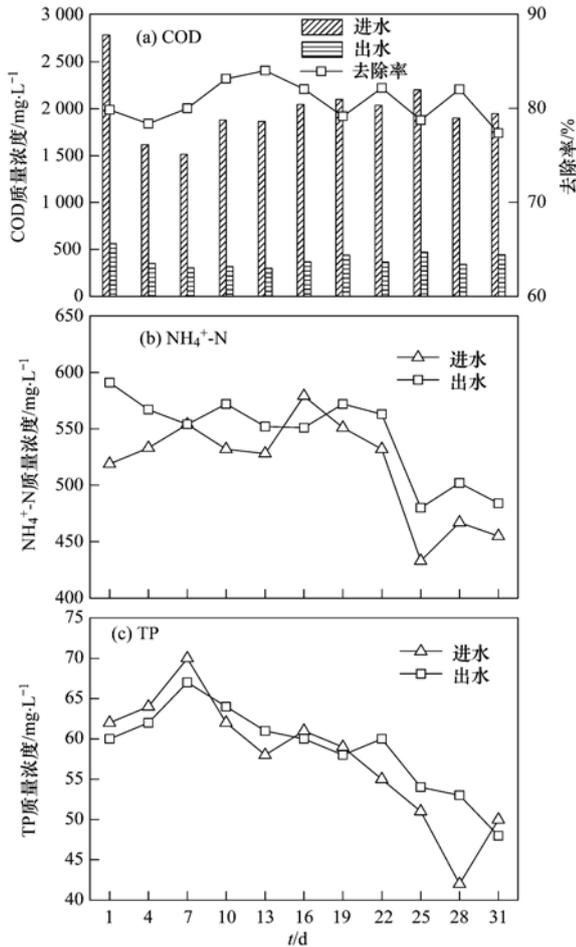


图3 废水 COD、NH₄⁺-N、TP 在 UASB 中的变化情况

Fig. 3 Variation of COD, NH₄⁺-N and TP in UASB reactor

由图 4 可见,在 SFSBR 运行过程中,废水中的 COD 和氮得到有效去除. SFSBR 曝气时间为 6 h, DO 控制在 2 ~ 5 mg·L⁻¹, 曝气初期和末期系统 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 平均浓度分别为 193.0、140.3、0.8、19.3 mg·L⁻¹ 和 101.9、7.3、8.5、121.4 mg·L⁻¹. 整个曝气段 COD 去除率为 47.2%, 末期系统 BOD₅ 未检出, 剩余 COD 主要是生物难降解物质. 曝气初期与末期系统 TN 分别为 160.4 mg·L⁻¹ 和 137.2 mg·L⁻¹, 这说明在 SFSBR 曝气段发生了一定程度的同步硝化反硝化(SND)^[22], 曝气结束 NO₂⁻-N 累积率达 93.5%, 实现了短程硝化, 减少后续反硝化碳源消耗.

SFSBR 搅拌段初期系统 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 平均浓度为 337.3、51.6、6.6、107.5 mg·L⁻¹, 经 6 h 反硝化后, COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 平均浓度为 162.3、49.0、4.8、49.9 mg·L⁻¹. 搅拌段 COD 去除率为 51.9%, 主要通过反硝化脱氮实现碳氮同步去除. 缺氧搅拌反硝化末期 COD 浓度高于好氧曝气硝化末期 COD 浓度, 说明原水中部分可生化 COD 不能用作反硝化碳源, 碳源利用率相对偏低. 搅拌段 NH₄⁺-N 浓度没有明显变化, NO_x⁻-N 浓度分别为 114.1 mg·L⁻¹ 和 54.7 mg·L⁻¹, 脱氮率约为 52.1%. 一般来说, 硝化反应时间 6 h, 反硝化反应可在 2 h 内完成, 硝化与反硝

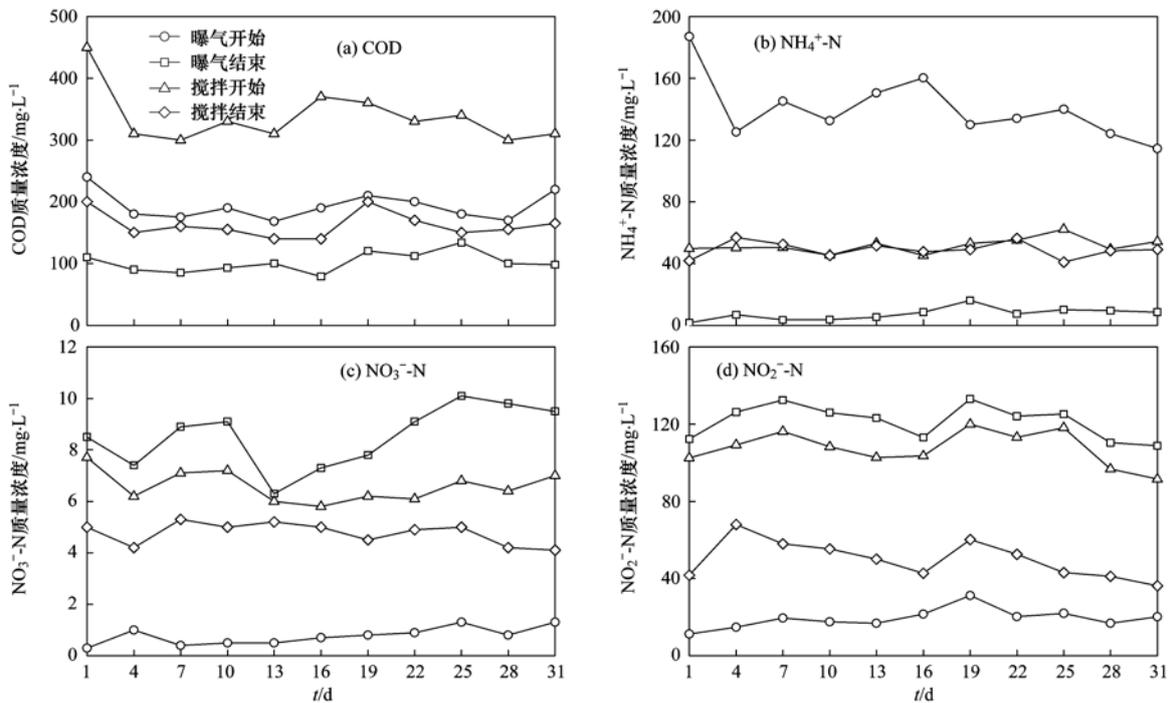


图4 废水 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 在 SFSBR 中的变化情况

Fig. 4 Variation of COD, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and NO₂⁻-N in SFSBR

化的水力停留时间之比以 3:1 为宜, 可达到 70% ~ 80% 的脱氮率^[23]. 而在本实验中, 硝化与反硝化时间均为 6 h, 两者的水力停留时间之比达到 1:1, C、N 去除比约为 3:1, 脱氮率仅为 52.1%. 说明虽然原水中可生化 COD 浓度较高, 可以用作反硝化碳源, 但是相对于甲醇和乙酸钠^[24,25] 等外加速效碳源而言, 反硝化速率较低, 相应所需水力停留时间较长. 曝气段末期系统 pH 为 6.6 左右, 搅拌段末期 pH 上升到 7.5 左右, 避免了因系统酸化导致的处理效果恶化, 确保了 SFSBR 长期稳定运行. 由于反硝化过程中原水碳源利用率偏低, 脱氮率不高, 出水中残留有 54.7 mg·L⁻¹ 左右的 NO_x⁻-N, 残留的 NO_x⁻-N 与聚磷菌竞争有限的碳源, 不利于聚磷菌厌氧释磷^[26,27]. 另外, 本研究中 SFSBR 采用“好氧-缺氧”的运行方式, 侧重于去除碳氮, 抑制了聚磷菌的生长, 造成 SFSBR 系统除磷效果不理想. 图 5 表明, 稳定运行的 SFSBR 出水 TP 浓度波动较大, 去除率低, 去除的 TP 主要是被微生物作为营养物质同化吸收.

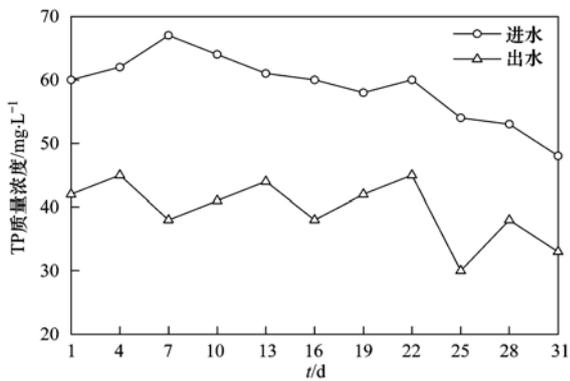


图 5 废水 TP 在 SFSBR 中的变化情况

Fig. 5 Variation of TP in SFSBR

经 SFSBR 处理后, 出水 COD 低于 200 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 低于 60 mg·L⁻¹, 2 项指标均符合《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001), 但是出水 TP 浓度超标, 需要进行后续处理.

2.3 MAP 结晶处理对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的去除效果

SFSBR 出水 TP 平均浓度 38.7 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 平均浓度 49.0 mg·L⁻¹, 采用 MAP 结晶法回收废水中氮磷营养元素. MAP 结晶法去除氮磷效果稳定可靠, 反应速率快, 沉淀易分离^[28], 产生的磷酸铵镁絮状沉淀能捕捉夹裹一些小颗粒, 故可进一步降低水体 COD 和 SS.

由图 6 可以看出, 通过 MAP 结晶处理后, 废水

中 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 与 Mg²⁺ 反应生成磷酸铵镁沉淀去除, 同时, 废水中 COD 浓度明显降低. MAP 进水 COD 150 ~ 200 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 41.7 ~ 56.8 mg·L⁻¹, TP 28 ~ 45 mg·L⁻¹, 水质变化较大. 处理后出水 COD 73 ~ 135 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 29.1 ~ 42.9 mg·L⁻¹, TP 4.8 ~ 7.3 mg·L⁻¹, COD 去除率为 30% ~ 53%, NH₄⁺-N 和 TP 回收率分别为 16% ~ 30% 和 75% ~ 89%, 出水水质相对稳定. 经计算, 结晶过程 NH₄⁺-N 与 TP 去除摩尔比约为 0.8, 小于磷酸铵镁化学式氮磷摩尔比 1:1, 可以推断, 磷元素除了与 NH₄⁺-N、Mg²⁺ 生成磷酸铵镁沉淀外, 还与废水中的金属阳离子进行反应生成了沉淀物质^[29]. 生成的磷酸铵镁沉淀呈黄色, 经收集纯化后可用作缓释肥施用于土壤, 有效减少营养元素淋溶流失^[30]. 出水黄色透明, 其中的磷主要为有机磷, 利用 MAP 结晶法难以进一步去除.

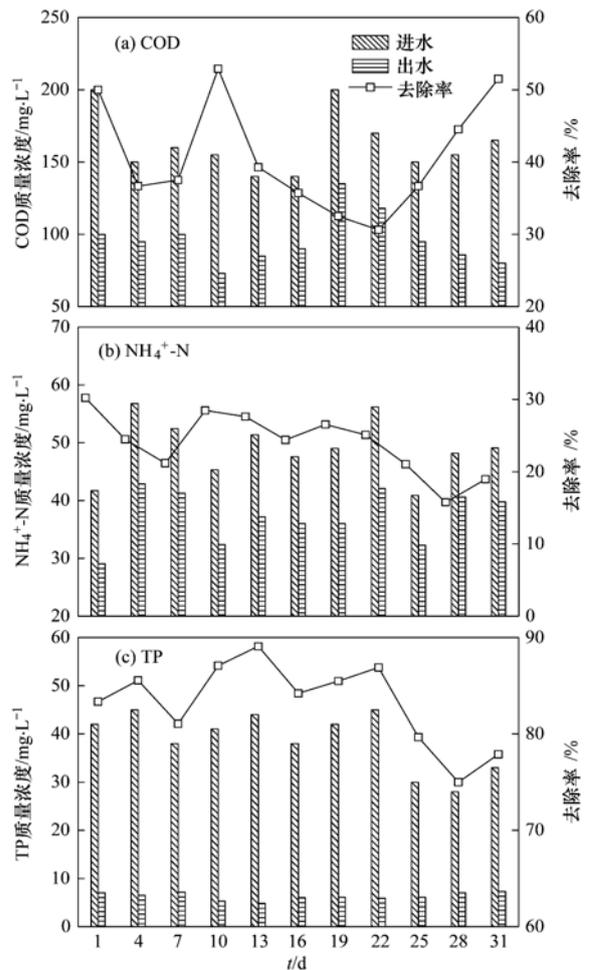


图 6 废水 COD、NH₄⁺-N、TP 在 MAP 结晶反应器中的变化情况

Fig. 6 Variation of COD, NH₄⁺-N and TP in MAP crystallization reactor

3 UASB-SFSBR-MAP 处理工艺经济效益分析

规模化猪场养殖废水 UASB-SFSBR-MAP 中试处理工艺运行费用主要由电费和药剂费组成. 日处理猪场养殖废水 $10 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的情况下, 每日电费投入约 17 元, 药剂投入约 5.5 元, 工艺运行成本 $2.25 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 运行费用与传统厌氧-好氧处理工艺相当. 而且, UASB-SFSBR-MAP 工艺实现沼气能源与氮磷营养物质回收, 为规模化猪场废弃物循环利用提供了新的途径.

4 结论

(1) 中试工程运行结果表明, UASB-SFSBR-MAP 组合处理工艺适用于规模化猪场养殖废水的达标处理, 组合工艺对废水 COD、 NH_4^+ -N 和 TP 去除率分别达到 95.1%、92.7% 和 88.8%, MAP 氮磷回收率达 23.9% 和 83.8%. 出水水质 $\text{COD} \leq 135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{TN} < 116 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NH_4^+ -N $< 43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{TP} \leq 7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{SS} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001).

(2) 该组合工艺将生物脱氮除碳与化学除磷有机结合, 通过简易时间控制器实现 SFSBR 全自动运行, 保证脱氮过程碳源碱度自平衡, 利用 MAP 法处理 SFSBR 出水并回收氮磷营养元素.

(3) 整个工艺稳定可靠, 运行费用与传统厌氧-好氧处理工艺相当, 实现碳氮磷高效处理和回收, 具有较高的推广应用价值. 但是, UASB-SFSBR-MAP 组合处理工艺在 SFSBR 实时控制系统构建、MAP 沉淀纯化及农业利用等方面还需进一步研究.

参考文献:

- [1] 王欢, 李旭东, 曾抗美. 猪场废水厌氧氨氧化脱氮的短程硝化反硝化预处理研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 114-119.
- [2] Wei X M, Lin C, Duan N, *et al.* Application of aerobic biological filter for treating swine farms wastewater[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, **2**: 1569-1584.
- [3] Bortone G. Integrated anaerobic/aerobic biological treatment for intensive swine production[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(22): 5424-5430.
- [4] 王欢, 裴伟征, 李旭东, 等. 低碳氮比猪场废水短程硝化反硝化-厌氧氨氧化脱氮[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 815-821.
- [5] Artan N, Tasli R, Orhon D. Rational basis for optimal design of sequencing batch reactors with multiple anoxic filling for nitrogen removal[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(4): 901-908.
- [6] 韩志英, 朱军, 丁颖, 等. 强化生物脱氮分步进水型序批式反应器[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(2): 17-21.
- [7] 宋永会, 钱锋, 向连城. 磷酸钙沉淀法去除猪场废水中磷的实验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1679-1686.
- [8] Perera P W A, Han Z Y, Chen Y X, *et al.* Recovery of nitrogen and phosphorus as struvite from swine waste biogas digester effluent[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2007, **20**(5): 343-350.
- [9] Perera P W A, Wu W X, Chen Y X, *et al.* Struvite recovery from swine waste biogas digester effluent through a stainless steel device under constant pH conditions [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2009, **22**(3): 201-209.
- [10] Liu Y H, Kumar S, Kwag J H, *et al.* Recycle of electrolytically dissolved struvite as an alternative to enhance phosphate and nitrogen recovery from swine wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **195**: 175-181.
- [11] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, *et al.* Recovery of phosphorus from swine wastewater through crystallization [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(14): 1544-1550.
- [12] Nelson N O, Mikkelsen R L, Hesterberg D L. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg: P ratio and determination of rate constant[J]. Bioresource Technology, 2003, **89**(3): 229-236.
- [13] Liu Y H, Kwag J H, Kim J H, *et al.* Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater[J]. Desalination, 2011, **277**(1-3): 364-369.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 246-248, 259-261, 271-274, 279-281.
- [15] Deng L W, Zheng P, Chen Z A. Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater [J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(4): 965-969.
- [16] Tong J, Chen Y G. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment[J]. Water Research, 2009, **43**(12): 2969-2976.
- [17] Zhang C, Chen Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(16): 6164-6170.
- [18] Kampas P, Parsons S A, Pearce P, *et al.* An internal carbon source for improving biological nutrient removal[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(1): 149-154.
- [19] Lee S I, Park J H, Ko K B, *et al.* Effect of fermented swine wastes on biological nutrient removal in sequencing batch reactors [J]. Water Research, 1997, **31**(7): 1807-1812.
- [20] Kim J H, Chen M X, Kishida N, *et al.* Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors[J]. Water Research, 2004, **38**(14-15): 3340-3348.
- [21] Magri A, Guivernau M, Baquerizo G, *et al.* Batch treatment of

- liquid fraction of pig slurry by intermittent aeration: process simulation and microbial community analysis [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(8): 1202-1210.
- [22] Walters E, Hille A, He M, *et al.* Simultaneous nitrification/denitrification in a biofilm airlift suspension (BAS) reactor with biodegradable carrier material [J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4461-4468.
- [23] 尹士君, 李亚峰. 水处理构筑物设计与计算 [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2007. 244-245.
- [24] 张仲玲. 反硝化脱氮外加碳源的选择 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [25] Obaja D, Macé S, Mata-Alvarez J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(1): 7-14.
- [26] Han Z Y, Wu W X, Chen Y X, *et al.* Characteristics of a twice-fed sequencing batch reactor treating swine wastewater under control of aeration intensity [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2007, **42**(3): 361-370.
- [27] Peng Z X, Peng Y Z, Gui L J, *et al.* Competition for single carbon source between denitrification and phosphorus release in sludge under anoxic condition [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, **18**(3): 472-477.
- [28] Huang H M, Xu C L, Zhang W. Removal of nutrients from piggery wastewater using struvite precipitation and pyrogenation technology [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2523-2528.
- [29] 鲍小丹, 叶志隆, 马建华, 等. 鸟粪石结晶法回收养猪废水中磷时 pH 对沉淀物组分的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2598-2603.
- [30] Rahman M M, Liu Y H, Kwag J H, *et al.* Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 2026-2030.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mires Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Julong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-ye, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-deweeding and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG GUANG (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行