

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果

任峰¹, 陆忆夏¹, 刘琴², 汤杨杨¹, 王世和^{1*}, 高海鹰¹, 乔红杰², 王为进²

(1. 东南大学市政工程系, 南京 210096; 2. 南京江宁水务集团有限公司, 南京 211100)

摘要: 针对目前人工湿地运行中的水流分布不均、易堵塞、溶解氧不足导致 NH_4^+ -N硝化不充分及除磷率低下等问题, 研究了作为复合人工湿地系统组成要素的高负荷水解酸化池、自然复氧/沉淀一体化装置、强化除磷脱氮槽等强化处理单元的运行特性及对全系统处理效果的影响。结果表明, 高负荷水解酸化池对 COD、SS 有较强的去除作用, 分别占系统总去除率的 38.05% 和 34.82%; 一体化装置对 SS 的去除占系统总去除率的 22.01%, 并使 DO 提高到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上; 经两段强化除磷脱氮槽的强化处理, TP 综合去除率提高 8% 以上, 并使湿地出水各类污染物全面达到 GB 18918-2002 一级 A 标准。

关键词: 复合人工湿地; 水解酸化池; 自然复氧; 强化处理单元; 运行特性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0570-06

Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage

REN Feng¹, LU Yi-xia¹, LIU Qin², TANG Yang-yang¹, WANG Shi-he¹, GAO Hai-ying¹, QIAO Hong-jie², WANG Wei-jin²

(1. Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Jiangning Water Group Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: There are some defects in constructed wetland, including the uneven distribution of flow, easily blocked, lack of oxygen supply systems and the unsatisfactory phosphorus adsorption capacity of the substrates, etc. The research mainly studied the function and contribution of the pool of hydrolysis acidification, the natural reoxygenation/sinking device and strengthen slot for reducing nitrogen and phosphorus. The results showed the removal efficiency of COD and SS in hydrolysis-acidification pool accounted for 38.05% and 34.82% of the total removal efficiency of system. The SS removal efficiency of the natural reoxygenation/sinking device accounted for 22.01% of the total removal efficiency of system, and the concentration of DO kept above $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The two strengthen slots can ensure the TP, TN, COD up to the standard of the level 1 of GB 18918-2002.

Key words: composite constructed wetland; the pool of hydrolysis acidification; natural reoxygenation; the strengthening units; operating performance

据相关资料, 目前我国城镇污水的处理率仅为 57% 左右^[1], 不少运行中的污水处理设施也因多种原因而效果不佳, 其中氮、磷问题尤为突出(仅为 30% ~ 50%)^[2]。20 世纪 80 年代末和 90 年代初, 人工湿地作为一种新型生态污水处理技术正式进入水污染控制领域^[3~9], 其兼顾了污水处理与生态修复的功能。

目前的人工湿地大都由自然湿地演化而来, 难免带有若干自然、粗放的特点, 如湿地中水流分布的不均匀导致死区、短流等; 污水中大量悬浮物带入湿地导致湿地在投入运行后不久即被堵塞; 缺少强化供氧机制, 氨氮硝化不充分导致脱氮率低下; 人工湿地为不排泥系统, 缺少除磷途径, 致使不少湿地在投入运行后半年到一年, 基质对磷的吸附即达到饱和, 磷去除率急剧下降。针对上述制约性问题, 结合示范工程建设, 进行了复合人工湿地处理城市污水各强化单元处理特性及对全系统处理效果影响

的研究, 以期为人工湿地的产业化及大规模应用提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

本研究所述复合人工湿地系统, 是针对上述制约人工湿地发展的问题提出的一项实用新技术组合, 工艺流程如图 1 所示。

组合系统由作为预处理手段的高负荷水解池、自然复氧/沉淀一体化装置及人工湿地本体三部分组成。人工湿地本体又包括强化除磷脱氮槽^[10]、防堵塞进水分布器^[11]及出水收集器^[12]等。人工湿地

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079029, 50909019); 南京市科技计划项目(20100274)

作者简介: 任峰(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工湿地污水处理技术, E-mail: rollyren@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wshhj@seu.edu.cn

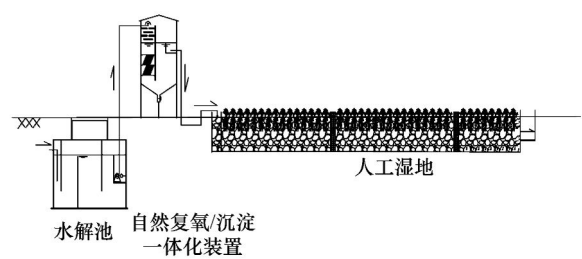


图1 复合人工湿地系统工艺流程示意

Fig. 1 Flow chart of composite constructed wetland system

本体段长 30 m,宽 10 m,总高 0.9 m,底坡为 1%. 在湿地的 15 m 和 25 m 处各设置宽度为 30 cm、与湿地等宽等深的强化除磷脱氮槽,湿地基质采用下层 35 cm 厚、粒径 40 ~ 60 mm 的砾石,中层 25 cm 厚、粒径 20 ~ 40 mm 的砾石,上层为 0.2 m 厚的瓜子片,其上栽种植物. 综合考虑净化功能及美观效果,湿地植物主选适合南京生长的西伯利亚鸢尾 (*Iris tectorum* Maxim)、美人蕉 (*Canna indica*)、香蒲 (*Typha orientalis* Presl) 等,植物间距为 20 cm, 3 块小湿地植物种植方式相同,最外周为美人蕉,向内依次为香蒲、鸢尾,其间间种细叶麦冬 (*Radix ophiopogonis*).

水解池外形尺寸为 300 cm × 300 cm × 200 cm,

表 1 复合人工湿地系统进水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Water quality of composite constructed wetland system/mg·L ⁻¹						
项目	COD	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	DO
进水范围	121 ~ 237	70 ~ 280	7.34 ~ 38.23	12 ~ 49.7	1.07 ~ 11.72	1.07 ~ 2.00
进水均值	155	161	28.7	36.1	3.32	1.39

1.3 水样采集与指标测定

根据研究需要,沿程共设置 8 个取样点,如图 2 所示. 分别位于水解池前与后、一体化装置后、2 个强化除磷脱氮槽的前与后及湿地出水端.

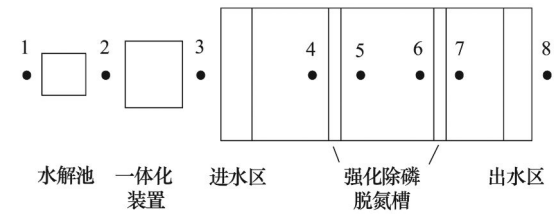


图2 湿地系统采样点布置示意

Fig. 2 Sampling point arrangement of composite constructed wetland system

测定项目包括 DO、pH、COD、TP、TN、NH₄⁺-N 及 SS 等.

各指标的测定方法为:COD 重铬酸盐法,TN 碱性过硫酸钾消解紫外可见分光光度法,TP 钼酸铵分

其有效水深为 1.5 m,有效容积为 13.5 m³. 污水在水解池内水解酸化后,可生化性提高,去除部分 COD 和 SS.

自然复氧/沉淀一体化装置外型尺寸为 150 cm × 150 cm × 285 cm,有效水深为 2.2 m,有效容积为 1.65 m³.

试验中,水解池中的污水经一次提升进入自然复氧/沉淀一体化装置,通过自然复氧提高 DO,为后续湿地硝化创造条件,通过内置的斜板发挥沉淀作用,进一步去除 SS,有效防止湿地堵塞. 装置底部集泥槽污泥定期排至水解池前端进一步水解.

强化脱氮除磷槽内填充高效复合除磷材料,大大削减磷浓度,同时,对流经的污水进行微曝气,强化充氧和自然复氧,改变湿地中的氧分布,使湿地中形成多个 A²/O 和硝化/反硝化链,大大提高脱氮率.

系统运行的总停留时间为 4 d,连续进水,针对各处理单元功能和特点,每天连续采样测定相应指标.

1.2 试验水质

本研究在南京江宁水务集团有限公司科学园污水处理厂进行,以该厂进厂污水为试验用水,具体水质条件见表 1.

光光度法,NH₄⁺-N 纳氏试剂分光光度法,SS 重量法^[13],DO 和 pH 采用 SX751 型 pH/ORP/电导率/DO 测量仪测定.

2 结果与分析

2.1 水解池运行特性与效果

在本系统中,水解池的最重要功能在于对不溶性及大分子有机物进行水解酸化,降低 SS 和部分 COD 的同时,有效提高其可生化性.

水解池在污泥接种后经历 60 d 的培养进入稳定运行期,稳定期水解池的水力停留时间为 5 h. 此时,水解池进、出水 COD 随运行历程变化如图 3 所示.

由图 3 可见,尽管水解池进水 COD 波动较大,但出水浓度保持稳定,且平均去除率达 30.07%,占系统总去除率的 38.05%. 说明水解池对全系统的贡献率很大,可大大降低后续湿地的有机负荷. 此

时,水解作用使大量非溶解性有机物转化为可溶性有机物,污水可生化性提高,而酸化作用使可溶性有机物转化为挥发酸类的最终产物是致使 COD 减少的最终原因.同时,在去除的 COD 中还包括被污泥截留却未被及时分解的颗粒有机物.

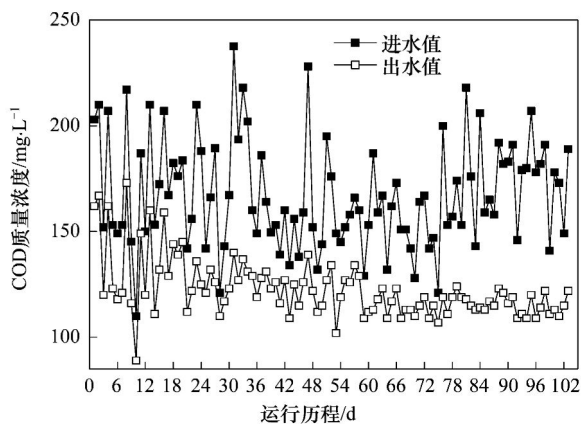


图3 水解池进、出水 COD 随运行历程变化

Fig. 3 Change of COD in the inflow and outflow of the pool of hydrolysis acidification with the increase of running time

水解池的进、出水 SS 随运行历程变化如图 4 所示. 由图 4 可见,从第 14 ~ 52 d, SS 出水浓度保持稳定,波动范围在 $124 \sim 101 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 29.12%, 占系统总去除率的 34.82%. 水解池中的水解细菌、发酵细菌已达到稳定状态,吸附在污泥上的颗粒有机物逐步被水解酸化作用而分解,减轻了污泥负荷,此时截留下的 SS 与水解酸化作用去除的 SS 基本达到平衡. 水解池对 SS 的去除较易达到稳定,且对全系统 SS 去除的贡献作用显著.

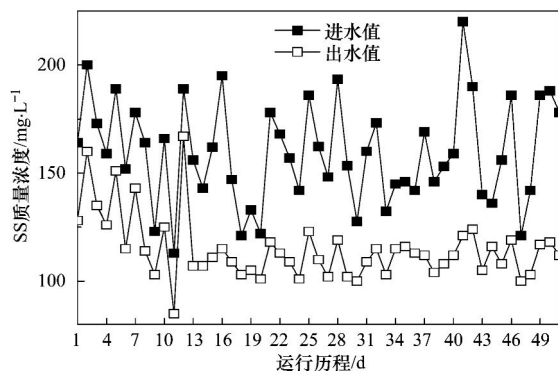


图4 水解池进、出水 SS 随运行历程变化

Fig. 4 Change of SS in the inflow and outflow of the pool of hydrolysis acidification with the increase of running time

水解池进、出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随运行历程的变化如图 5 所示. 由图 5 可见,水解池自第 30 d 始进入稳定状态, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水浓度稳定在 $27.69 \sim 30.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均增加率为 2.41%.

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度小幅增加是由于水解池中的厌氧污泥性能成熟,水解池对氨氮的去除作用不再单纯地依靠吸附截留作用,前期被吸附的含氮不溶性有机物经氨化后,被分解为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 重新回到水中.

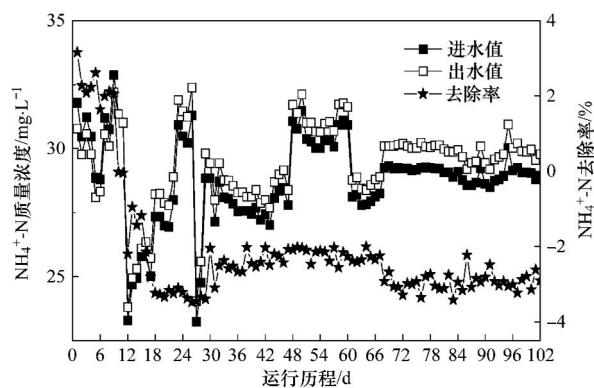


图5 水解池进、出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及去除率随运行历程变化

Fig. 5 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the inflow and outflow of the pool of hydrolysis acidification and the removal efficiency with the increase of running time

2.2 自然复氧/沉淀一体化装置运行特性与效果

在本系统中,自然复氧/沉淀一体化装置的最重要功能在于提高污水的溶解氧 DO 和进一步降低 SS,为后续人工湿地处理创造条件.

本试验对一体化装置的复氧及 SS 去除效果进行了较详细的测定,分析其运行性能,此阶段一体化装置的水力停留时间为 0.61 h.

自然复氧/沉淀一体化装置进、出水 DO 随运行历程的变化如图 6 所示. 由图 6 可见,此阶段一体化装置复氧效果稳定,DO 出水浓度稳定在 $2.11 \sim 2.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,保证了后续湿地前部所需的好氧环境.

自然复氧/沉淀一体化装置进、出水 SS 随运行历程的变化如图 7 所示. 由图 7 可见,从第 22 d 起,

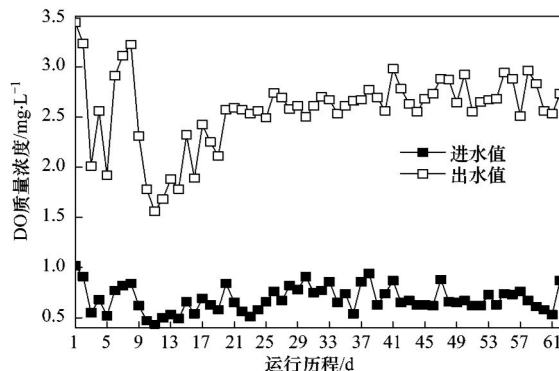


图6 一体化装置进、出水 DO 随运行历程变化

Fig. 6 Change of DO in the inflow and outflow of the natural reoxygenation/sinking device with the increase of running time

一体化装置运行达到稳定状态,对全系统 SS 去除作用明显,降低了进入湿地的 SS 浓度,有效防止湿地前部堵塞. 在进水 SS 波动较大的情况下,出水 SS 稳定在 $71 \sim 88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,出水平均浓度为 $81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 28.19%,占系统总去除率的 22.01%.

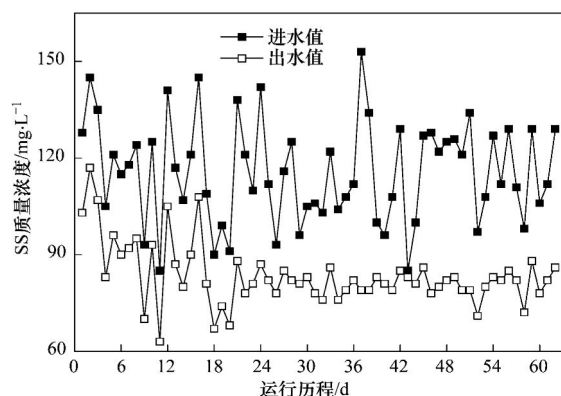


图7 一体化装置进、出水 SS 随运行历程变化

Fig. 7 Change of SS in the inflow and outflow of the natural reoxygenation/sinking device with the increase of running time

2.3 强化脱氮除磷槽运行特性与效果

在本系统中,强化除磷脱氮槽的最重要功能在于通过所添加除磷材料对磷的吸附、离子交换等,有效去除污水中的磷素. 同时,通过实施微曝气,提高流经污水的 DO,使形成其后的 A/O 或 A²/O 过程,进一步提高氨化、硝化率,提高 TN/NH₄⁺-N 的去除效果.

本研究在既添加除磷材料又曝气的情况下,对强化除磷脱氮槽的处理效果进行了探索,此阶段槽体的水力停留时间为 0.81 h,曝气量按气水比为 6:1 控制.

2.3.1 对 TP 的去除效果

图 8 为 TP 的去除效果. 从中可见,添加除磷材料保证了槽内较高的除磷率. 1 号槽对 TP 的去除率为 30.98%,占系统总去除率的 16.48%; 2 号槽对 TP 的去除率为 29.52%,占系统总去除率的 6.01%. 槽 2 出水的 TP 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准. 槽内的除磷材料对磷具有很强的吸附作用,能在较短的水力停留时间下达到强化处理作用,使出水 TP 达到一级 A 标准. 在曝气条件下,槽内水体受到了气体扰动混合作用,使强化除磷材料对水体中磷的吸附截留更加均匀,从而提高了磷的去除率.

2.3.2 对 TN/NH₄⁺-N 的去除效果

图 9 为 TN/NH₄⁺-N 的去除效果. 从中可见, 1 号槽对 TN 的去除率为 14.09%,占系统总去除率的

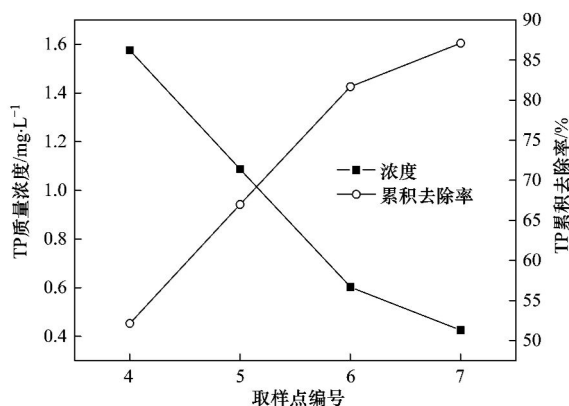


图8 添加除磷材料且曝气时 TP 去除效果

Fig. 8 Removal effect of TP under the condition of adding removing-phosphorus material and aeration

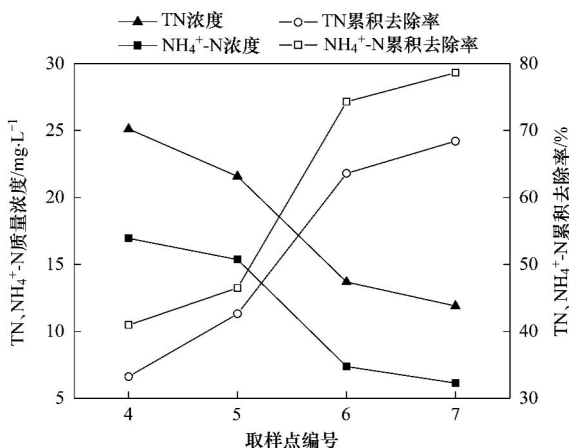


图9 添加除磷材料且曝气时 TN/NH₄⁺-N 去除效果

Fig. 9 Removal effect of TN/NH₄⁺-N under the condition of adding removing-phosphorus material and aeration

13.17%; 对 NH₄⁺-N 的去除率为 9.33%,占系统总去除率的 6.18%. 2 号槽对 TN 的去除率为 13.15%,占系统总去除率的 6.70%; 对 NH₄⁺-N 的去除率为 16.82%,占系统总去除率的 4.85%. 且污水经过槽 2 处理后,出水中 TN 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准. 强化材料一方面通过过滤作用截留大量的 TSN,另一方面,通过直接吸附或离子交换固定氮,去除了大量氨氮. 但需要指出的是,通过填料过滤、截留的悬浮态有机氮会在微生物作用下缓慢矿化,从而部分分解为溶解态氮^[14],而通过强化材料吸收的铵态氮最终也将通过相关途径转化,因此,这种对氮的吸附去除是短暂的^[15]. 但由于除磷脱氮槽的特殊设计,可定期更换除磷材料,从而减少短期吸附作用的影响. 而曝气作用使污水得到搅拌混合,使悬浮态氮与强化材料均匀接触,最终保证了对 TN 较高的去除率. 同时,槽中所添加的强化材料不仅对

NH_4^+-N 有一定的吸附作用,同时也为微生物的生长提供附着界面,使硝化细菌具有繁殖生长的条件.在曝气条件下,槽内硝化作用得以加强,使 NH_4^+-N 去除率提高,并进一步促进 TN 去除率的提高.

2.3.3 对 COD 的去除效果

图 10 为 COD 的去除效果.从中可见,1 号槽对 COD 的去除率为 5.06%,占系统总去除率的 2.49%;2 号槽对 COD 的去除率为 9.20%,占系统总去除率的 2.64%.且污水经槽 2 处理后,出水中 COD 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准.但由图 10 可见,添加的除磷材料对溶解性 COD 去除率不高,这是由于添加的除磷材料对 TP 有选择性吸附,对 COD 吸附作用甚微.曝气增加了微生物的活性,为其降解反应提供了好氧环境,同时,曝气对 COD 也有一定的氧化和吹脱作用.

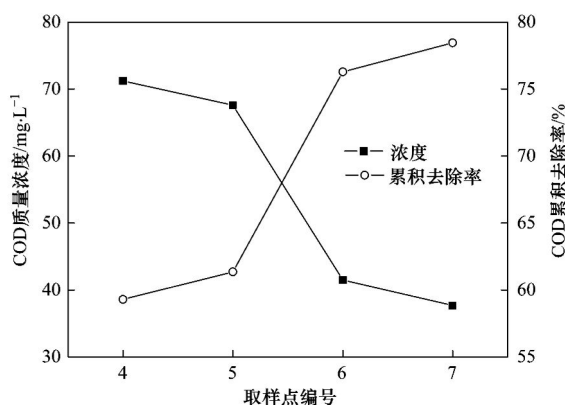


图 10 添加除磷材料且曝气时 COD 去除效果

Fig. 10 Removal effect of COD under the condition of adding removing-phosphorus material and aeration

2.3.4 对 SS 的去除效果

图 11 为 SS 的去除效果.从中可见,1 号槽对 SS 的去除率为 22.96%,占系统总去除率的 12.98%;2 号槽对 SS 的去除率为 21.18%,占系统总去除率的 5.52%.可见,强化除磷材料对 SS 有很好的截留、吸附、过滤作用.且由于曝气对水体产生搅拌混合作用,使布水更加均匀,从而进一步提高了强化除磷材料对 SS 的截留过滤效果.

2.3.5 对 DO 的影响

图 12 为 DO 的变化.通过实施微曝气,槽内 DO 浓度升高,起到了强化充氧作用.所添加的除磷材料,其内部的孔隙相当于在槽内形成了无数狭小的通道,相对于未添加除磷材料时,水流路径及速度均发生变化,形成一定的扰动作用,提高了水体与氧的传质界面,从而改善了槽内的氧传递环境.

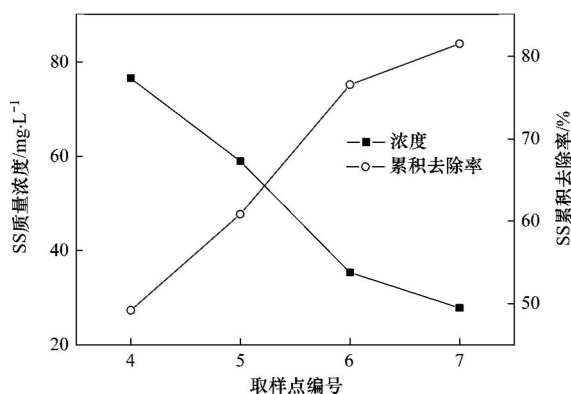


图 11 添加除磷材料且曝气时 SS 去除特性

Fig. 11 Removal effect of SS under the condition of adding removing-phosphorus material and aeration

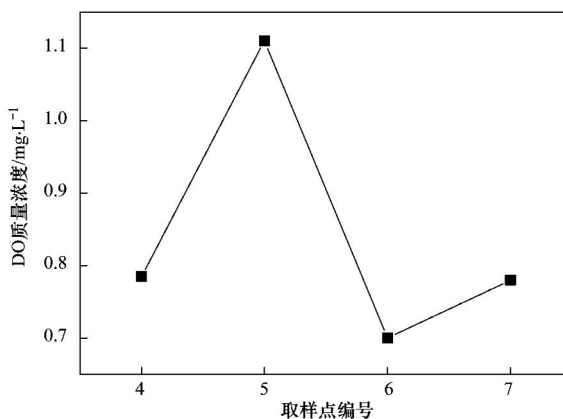


图 12 添加除磷材料且曝气时 DO 的变化

Fig. 12 Changes of DO under the condition of adding removing-phosphorus material and aeration

3 结论

(1) 稳定运行状态下,水解池对 COD 的平均去除率为 30.07%,占系统总去除率的 38.05%;对 SS 的平均去除率为 29.12%,占系统总去除率的 34.82%; NH_4^+-N 的平均增长率为 2.41%.表明水解池对 COD、SS 均有较强的去除作用,对含氮不溶解性有机物有稳定的水解酸化作用.

(2) 稳定运行状态下,一体化装置出水 DO 稳定在 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上;对 SS 的平均去除率为 28.19%,占系统总去除率的 22.01%.

(3) 在添加除磷材料且曝气条件下,1 号槽对 TP 的去除率为 30.98%,占系统总去除率的 16.48%;2 号槽对 TP 的去除率为 29.52%,占系统总去除率的 6.01%.且槽 2 出水的 TP 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准.1 号槽对 TN 的去除率为 14.09%,占系统总去除率的 13.17%;对 NH_4^+-N 的去除率为 9.33%,占系统总去除率的 6.18%.2 号

槽对 TN 的去除率为 13.15%, 占系统总去除率的 6.70%; 对 NH_4^+ -N 的去除率为 16.82%, 占系统总去除率的 4.85%。且强化脱氮除磷槽 2 出水的 TN 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准。1 号槽对 COD 的去除率为 5.06%, 占系统总去除率的 2.49%; 2 号槽对 COD 的去除率为 9.20%, 占系统总去除率的 2.64%。且污水经槽 2 处理后, 出水的 COD 已达到 GB 18918-2002 一级 A 标准。1 号槽对 SS 的去除率为 22.96%, 占系统总去除率的 12.98%; 2 号槽对 SS 的去除率为 21.18%, 占系统总去除率的 5.52%。1 号槽对 DO 的提高率为 42.30%, 2 号槽对 DO 的提高率为 32.86%。

(4) 辅以水解池、一体化装置的预处理及强化除磷脱氮槽的复合人工湿地系统, 可有效解决目前常规人工湿地运行中的诸多制约性的问题, 大大提高各类污染物去除效果, 这对促进我国人工湿地技术的更广泛应用具有重要作用。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2008 环境统计年报[R].
- [2] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] Arias C A, Del Bubba M, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. Water Research, 2001, **35**(5): 1159-1168.
- [4] Westholm L J. Substrates for phosphorus removal-potential benefits for on-site wastewater treatment? [J]. Water Research, 2006, **40**(1): 23-36.
- [5] 郭本华, 宋志文, 韩潇源. 碎石、沸石和页岩陶粒构建人工湿地的除磷效果[J]. 工业用水与废水, 2005, **36**(2): 46-47.
- [6] 刘丽娜, 刘志明, 吴德意, 等. 粉煤灰吸附去除城市景观水体中磷的初步研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(2): 40-42.
- [7] 袁东海, 张孟群, 高士祥, 等. 几种粘土矿物和粘粒土壤吸附净化磷素的性能和机理[J]. 环境化学, 2005, **24**(1): 7-11.
- [8] Rousseau D P L, Lesage E, Story A, *et al.* Constructed wetlands for water reclamation[J]. Desalination, 2008, **218**(1-3): 181-189.
- [9] Ugurlu A, Salman B. Phosphorus removal by fly ash [J]. Environment International, 1998, **24**(8): 911-918.
- [10] 王世和, 黄娟, 鄢璐, 等. 可更换填料人工湿地强化除磷脱氮方法及强化除磷脱氮槽 [P]. 中国专利: CN 20061009674. 7. 2008-06-24.
- [11] 王世和, 黄娟, 鄢璐, 等. 防堵塞人工湿地进水分水器 [P]. 中国专利: CN 200710022270. 2. 2009-04-29.
- [12] 王世和, 鄢璐, 黄娟, 等. 人工湿地出水收集器 [P]. 中国专利: CN 200710022269. X. 2009-02-11.
- [13] 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.
- [14] Zemanova K, Picek T, Dusek J, *et al.* Carbon, Nitrogen and Phosphorus Transformations are Related to Age of a Constructed Wetland[J]. Water Air and Soil Pollution, 2010, **207**(1-4): 39-48.
- [15] 王凯军, 贾立敏. 城市污水生物处理新技术开发与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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