

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

多介质土壤滤层系统 (MSL) 与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较

宋颖¹, 黄玉婷¹, 葛川¹, 张浩², 陈昕³, 张志剑², 罗安程^{1*}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 浙江大学环境与资源学院生物地球化学研究室, 杭州 310058; 3. 环保部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 为探索经济可行的海水养殖废水处理技术, 选取南美白对虾海水养殖废水, 对比研究了多介质土壤滤层 (multi-soil-layer, MSL) 系统和 4 种不同植物配置潜流式人工湿地 (大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型) 在 $400 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 水力负荷下的废水处理效果。结果表明, MSL 对化学需氧量 (COD)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 的平均去除率分别为 $80.38\% \pm 2.14\%$ 、 $68.14\% \pm 3.51\%$ 、 $40.79\% \pm 3.10\%$ 、 $42.68\% \pm 2.90\%$ 和 $54.19\% \pm 5.15\%$, 均高于其他 4 种不同植物配置的潜流式人工湿地的处理效果。4 种人工湿地系统对各污染物的去除率从高到低依次为: 大米草型 > 芦苇型 > 香蒲型 > 无植物型。

关键词: 多介质土壤层系统; 潜流式人工湿地; 海水养殖废水; 废水处理; 去除速率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3436-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.026

Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland

SONG Ying¹, HUANG Yu-ting¹, GE Chuan¹, ZHANG Hao², CHEN Xin³, ZHANG Zhi-jian², LUO An-cheng¹

(1. Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Biogeochemistry Laboratory, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: To evaluate the feasibility of using multi-soil-layer (MSL) system and subsurface flow constructed wetland to treat the wastewater of marine cultured *Penaeus vannamei* and to determine the suitable process for the local aquaculture wastewater pollution characteristics. In this study, MSL system and four constructed wetland systems with *Spartina anglica*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia* and unplanted system were evaluated for their potentials of pollutants removal capacity. The results showed the average removal rates of chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) by MSL system were $80.38\% \pm 2.14\%$, $68.14\% \pm 3.51\%$, $40.79\% \pm 3.10\%$, $42.68\% \pm 2.90\%$ and $54.19\% \pm 5.15\%$, respectively. Additionally, the ability of pollutants removal of other four wetland systems decreased in the order: *Spartina anglica*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia* and unplanted system.

Key words: multi-soil-layer (MSL) system; subsurface flow constructed wetland; wastewater of marine aquaculture; wastewater treatment; removal rate

近年来,随着海水养殖技术的发展和海产品市场需求量的增加,海水养殖业已趋向集约化、高密度、高产出的养殖模式。与此同时,海水养殖生产过程中产生的残饵、排泄物等污染物造成养殖水体严重污染,破坏近岸海域生态系统稳定性与多样性^[1,2],反过来也制约了海洋水产业的可持续发展。为此,研究经济可行的低成本、低能耗、高净化效率且操作简便的海水养殖废水处理技术已成为目前亟待解决的问题^[2,3]。目前国内外学者研发出多种海水养殖废水处理方法,郑瑞东等^[4]将泡沫分离法用于集约化水产养殖中闭合循环水处理,可有效去除废水中可溶性有机物和悬浮物,但该方法会把水

中有益的痕量元素一并去除;Tango 等^[5]采用臭氧水处理技术用于多种养殖废水水质的提高,并可起到消毒作用,但臭氧会残留在养殖水体中对养殖对象产生一定的毒性作用;Tal 等^[6]指出海水养殖废水生化处理中应用较多的是生物接触氧化、生物转盘、生物流化床等工艺,但由于海水养殖的盐度效应,这些生化处理工艺的总代谢选择性和有效微生物比例较低,系统的单位体积处理负荷不高。且

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2014-04-12

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(2010467014)

作者简介: 宋颖(1985~),女,博士,主要研究方向为养殖废水处理,
E-mail: songyingNJ@163.com

* 通讯联系人, E-mail: acluo@zju.edu.cn

这些方法对于养殖户来说,能耗较高,操作较复杂.同时海水成分复杂,这些常规单一的物理、化学、生物方法不再适合海水养殖废水的处理.

多介质土壤滤层系统(MSL)和人工湿地是利用物理、化学、生物三重协同作用处理污水,兼具显著的环境效益、生态效益和经济效益,而且适用性较广^[7,8].目前这两种系统已广泛应用于生活污水、垃圾渗滤液、养殖废水等的处理^[9~13].MSL系统主要通过系统内基质的吸附作用和微生物的降解去除污水中的污染物^[7],人工湿地则主要通过系统内基质和植物根系的拦截、吸附和系统内微生物代谢等机制^[10]达到去除污染物的目的.目前MSL系统应用在海水养殖废水处理上的研究鲜有报道,人工湿地在海水养殖废水处理研究也仍处于探索阶段^[14,15].为此,本研究选取了设计成本低、能耗低、净化效率高且操作简便的两种处理技术(MSL系统和不同植物型的潜流式人工湿地),对比其对南美白对虾海水养殖废水污染物的去除效果并分析其特点,可根据不同需求选择适合海水养殖废水处理的技术,以期海洋生态健康及海水养殖行业的可持续发展提供技术保障.

1 材料与方法

1.1 实验装置

MSL系统处理装置采用玻璃钢材质,装置大小

为1.0 m(长)×1.0 m(宽)×1.0 m(高).系统由土壤混合层(普通沙土、秸秆、膨润土和铁屑,四者质量干重比为7:2:1:1,单体深15 cm)和通水层(天然斜发沸石,单体深10 cm)组成.土壤混合层与通水层交叠组成3个次生单元,底部铺设10 cm厚的鹅卵石作为衬托,系统顶部不封闭;在MSL底部安装直径为70 mm的出水管(图1).

潜流式人工湿地处理装置为12个小型实验级模拟装置,由玻璃钢材料制成,每个装置大小同样为1.0 m(长)×1.0 m(宽)×1.0 m(高)(图1).底部填充10 cm厚的鹅卵石(直径为60~110 mm).鹅卵石上设有“丰”字型穿孔PVC管,管子上部再铺设少许大卵石以防PVC管孔被堵;向上依次铺设40 cm厚沸石填料和40 cm厚的土壤基质层(南美白对虾养殖厂内砂壤土壤);装置底部安装直径为70 mm出水管(图1).4个人工湿地处理中,1种处理不种植物,其余3种处理分别种植大米草、芦苇和香蒲,种植密度为17棵·m⁻².

上述各实验装置在实验进行时均设3组平行.

1.2 进水水质及运行方式

实验用水均采用舟山绿源水产养殖有限公司二分厂南美白对虾养殖塘废水,废水水质见表1.

MSL系统和人工湿地系统均采用24 h连续进水.实验用水由蠕动泵控制流量并引入装置,均采用上进下出的进出水方式.MSL系统由位于装置正

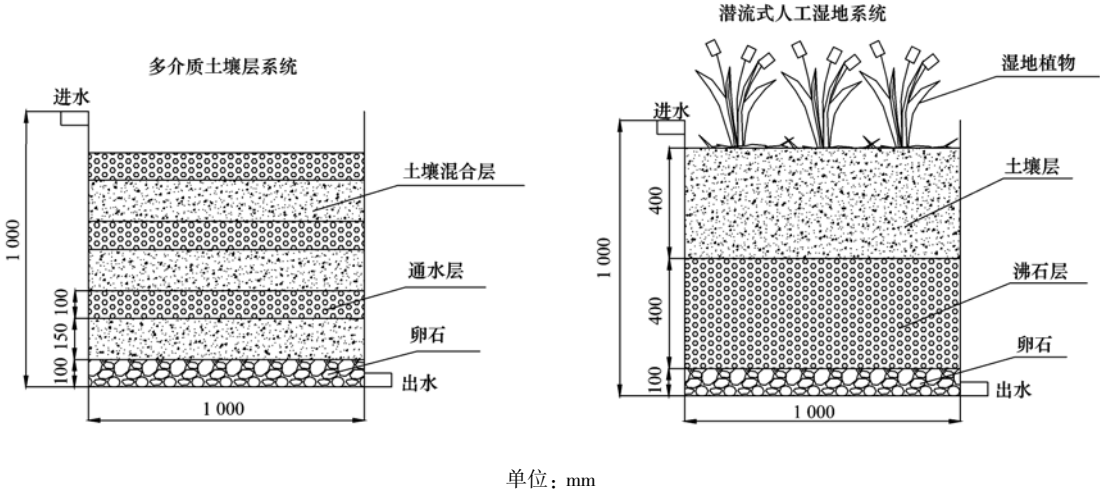


图1 污水处理装置结构
Fig. 1 Structure of wastewater treatment

表1 污水水质 /mg·L⁻¹
Table 1 Characteristics of the wastewater/mg·L⁻¹

水质指标	COD	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
平均值±标准差	203.11±18.66	2.87±0.38	8.82±0.47	9.24±0.71	0.67±0.08

中多孔丰字型 PVC 管均匀布水,孔径约 1 cm,孔间距 5 cm,管直径为 10 cm,管长约 70 cm,管间距 15 cm;出水经过 PVC 管排入沟渠. 4 种人工湿地采取装置内部正中的多孔丰字型 PVC 管均匀布水,该管尺寸同 MSL 系统内布水管.

1.3 实验步骤

实验过程中采取同一养殖塘的养殖废水,MSL 系统处理和 4 种不同植物型潜流式人工湿地处理的进水水力负荷统一为 $400\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,水力停留时间为 2.5 d. 装置经过两月运行进入稳定状态后,于 2012 年秋季,每隔 3 d 检测进出水水质.

1.4 分析测试方法

实验中水质指标测定均按国家标准方法进行^[16],由于盐度的干扰,废水中化学需氧量(COD)

的测定采用高锰酸钾法. 经酸性过硫酸钾消煮预处理后,废水总磷(TP)测定采用钼锑抗分光光度法,总氮(TN)测定采用紫外分光光度法,氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)测定采用纳氏试剂光度法,硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的测定采用紫外分光光度法.

1.5 数据处理

采用 SPSS 16.0 统计软件进行数据统计分析.

2 结果与分析

2.1 MSL 系统和潜流式人工湿地对海水养殖废水处理效能比较

MSL 系统和 4 种人工湿地系统对 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净化效果见表 2. MSL 系统对各污染物的去除效果均强于其余 4 种人工湿地系统.

表 2 MSL 系统和各人工湿地对污染物的净化效果¹⁾

Table 2 Treatment performance of tested systems

项目	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (去除率/%)				
	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	TP
MSL	39.89 ± 5.74 (80.38 ± 2.14)e	5.06 ± 0.38 (42.68 ± 2.90)d	1.32 ± 0.28 (54.19 ± 5.15)d	5.47 ± 0.50 (40.79 ± 3.10)d	0.21 ± 0.03 (68.14 ± 3.51)e
大米草型湿地	72.11 ± 9.54 (64.51 ± 3.40)d	6.17 ± 0.57 (30.00 ± 5.86)c	1.85 ± 0.27 (35.74 ± 3.21)c	6.41 ± 0.69 (30.78 ± 4.13)c	0.46 ± 0.04 (30.97 ± 6.74)d
芦苇型湿地	84.78 ± 11.23 (58.32 ± 3.67)c	6.93 ± 0.74 (21.46 ± 6.71)b	2.00 ± 0.29 (30.38 ± 3.36)b	6.92 ± 0.67 (25.17 ± 3.44)b	0.53 ± 0.06 (20.91 ± 5.94)c
香蒲型湿地	99.28 ± 15.62 (51.27 ± 4.95)b	7.16 ± 0.89 (18.81 ± 8.94)ab	2.07 ± 0.28 (28.00 ± 4.28)b	7.36 ± 0.78 (20.44 ± 4.01)b	0.56 ± 0.07 (17.16 ± 5.42)b
无植物型湿地	111.00 ± 11.32 (45.33 ± 2.91)a	7.48 ± 0.61 (15.26 ± 4.84)a	2.32 ± 0.36 (19.57 ± 3.74)a	7.52 ± 0.69 (18.66 ± 2.49)a	0.59 ± 0.07 (12.36 ± 4.18)a

1) 小写字母代表同一指标不同处理的差异性

表 1、2 显示,当 COD 进水浓度为 $203.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MSL 系统和 4 种潜流式人工湿地(大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型)的 COD 出水浓度波动不大,平均值分别为 39.89、72.11、84.78、99.28、 $111.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明各装置都具有较稳定的 COD 去除效果. 统计表明,5 个处理中 COD 的去除率存在显著性差异($P < 0.05$),且由高到低依次为 MSL (80.38%)、大米草型湿地 (64.51%)、芦苇型湿地 (58.32%)、香蒲型湿地 (51.27%)、无植物型湿地 (45.33%) (表 2).

5 个处理对于氮的去除效果差异明显. 由图 2 及表 2 可知,MSL 系统和 4 种潜流式人工湿地(大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型)的出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均去除率分别为 54.19%、35.74%、30.38%、28.00%、19.57%; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别为 42.68%、30.00%、21.46%、18.81%、15.26%; TN 平均去除率分别为 40.79%、

30.78%、25.17%、20.44%、18.66%. 统计表明,MSL 系统对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 的去除率均显著高于人工湿地系统,而人工湿地系统去除率由高到低依次为大米草型、芦苇型、香蒲型、无植物型.

TP 进水平均浓度为 $0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表 2 显示 MSL 系统和 4 种潜流式人工湿地(大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型)的 TP 出水浓度波动不大,平均值分别为 0.21、0.46、0.53、0.56、 $0.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 5 个处理的 TP 平均去除率存在显著性差异(表 2),由高到低依次为 MSL (68.14%)、大米草型湿地 (30.97%)、芦苇型湿地 (20.91%)、香蒲型湿地 (17.16%)、无植物型湿地 (12.36%).

2.2 MSL 系统和 4 种潜流式人工湿地对污染物去除速率比较

如表 3 所示,在相同水力负荷条件下,MSL 系统对 COD 的去除速率为 $26.11\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,而湿地系统对 COD 的去除速率在 $14.74\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (无

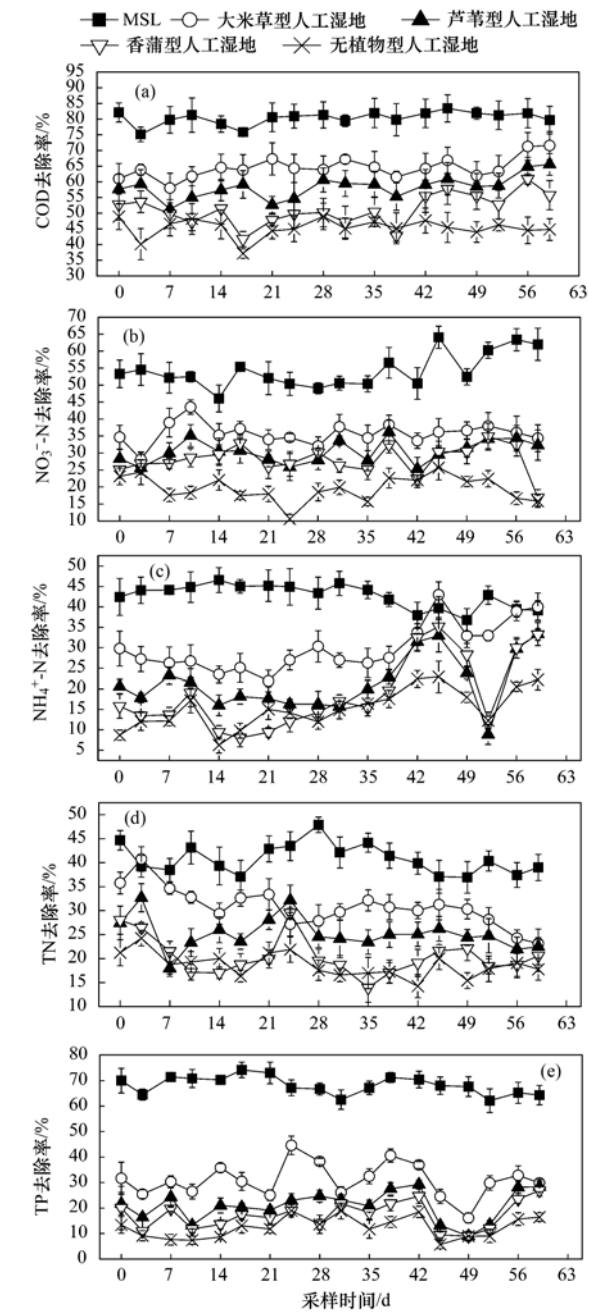


图2 MSL系统与4种人工湿地系统对各污染物去除率
Fig. 2 Removal of COD,NO₃⁻-N,NH₄⁺-N,TN and
TP by MSL system and four constructed wetlands

植物型) ~ 20.96 g·(m²·d)⁻¹ (大米草型). MSL 对 TN 的去除速率为 0.59 g·(m²·d)⁻¹, 而湿地系统对 TN 的去除速率最高为大米草型的 0.45 g·(m²·d)⁻¹, 最低的无植物型湿地仅为 0.27 g·(m²·d)⁻¹. 其中,MSL 系统对 NH₄⁺-N 的去除速率为 0.59 g·(m²·d)⁻¹, 而湿地系统对氨氮的去除速率为 0.21 (无植物型) ~ 0.42 g·(m²·d)⁻¹ (大米草型). 各系统对 TP 的去除速率较低,MSL 对 TP 的去除速率为 0.074 g·(m²·d)⁻¹, 相应地湿地系统去除速率仅为 0.013 (无植物型) ~ 0.034 g·(m²·d)⁻¹ (大米草型).

2.3 进水中不同污染物含量与去除量的关系

图3和表4显示,进水中各污染物浓度与MSL系统污染去除量之间存在线性关系,且以COD的相关性最好. 在本实验设定的水力负荷 400 L·(m²·d)⁻¹下,MSL 系统对 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除量随进水污染负荷的增加而增加,表明 MSL 系统对养殖废水尚有更大的负荷潜力. 而各人工湿地系统中,进水 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 含量与其去除量之间线性关系较差.

3 讨论

MSL 处理与4种不同植物型潜流式人工湿地对南美白对虾海水养殖废水都有一定的处理效果. 而MSL系统处理效果和单位面积污水处理负荷优于潜流式人工湿地. MSL 系统对 COD、氮和磷去除主要依靠土壤和沸石的吸附、以及系统中的微生物分解^[17]. 曝气可以提高MSL系统内的好氧微生物对有机物和NH₄⁺-N的降解活性,从而提高系统对其的去除效率^[18, 19]. 本实验中MSL装置设计有通气管,可增加系统的有氧环境,有利于系统对COD的降解,从而获得本系统COD去除率稳定达到75.10%以上(表2). 这种有利的通气条件同时也促进MSL系统对NH₄⁺-N的平均去除率至少高出其他人工湿地处理组12.68个百分点(表2). 南美白对

表3 MSL系统和各人工湿地对污染物的去除速率¹⁾/g·(m²·d)⁻¹
Table 3 Removal efficiency of tested systems/g·(m²·d)⁻¹

项目	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
MSL	26.11a	0.59a	0.59a	0.074a
大米草型湿地	20.96b	0.42b	0.45b	0.034b
芦苇型湿地	18.93c	0.30c	0.37c	0.022c
香蒲型湿地	16.61d	0.26cd	0.29d	0.018cd
无植物型湿地	14.74d	0.21d	0.27d	0.013d

1) 小写字母代表同一指标不同处理的差异性

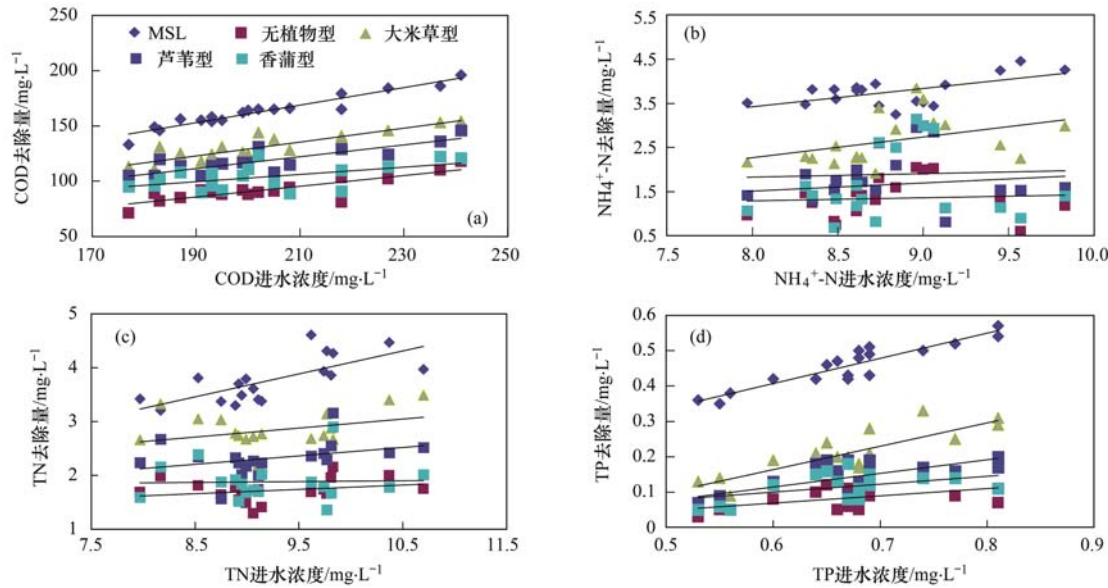


图3 污染物进水浓度与其去除量关系

Fig. 3 Relationship between the pollutants in influents and the pollutant removal amount

表4 污染物进水浓度与其去除量关系

Table 4 Relationship between the pollutants in influents and the pollutant removal amount

水质指标	处理	回归方程	R^2	P
COD	MSL	$y = 0.793\ 9x + 1.976\ 1$	0.922\ 4	0.000\ 0
	大米草型	$y = 0.627\ 6x + 3.522\ 3$	0.759\ 1	0.000\ 0
	芦苇型	$y = 0.536\ 6x + 9.347\ 3$	0.656\ 2	0.000\ 0
	香蒲型	$y = 0.329\ 3x + 36.947$	0.295\ 9	0.019\ 6
	无植物型	$y = 0.483\ 6x - 6.114\ 2$	0.690\ 4	0.000\ 0
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	MSL	$y = 0.415\ 0x + 0.102\ 8$	0.361\ 7	0.008\ 0
	大米草型	$y = 0.468\ 8x - 1.483\ 7$	0.154\ 9	0.106\ 0
	芦苇型	$y = 0.077\ 0x + 1.210\ 9$	0.003\ 6	0.813\ 0
	香蒲型	$y = 0.183\ 3x + 0.043\ 3$	0.011\ 5	0.672\ 0
	无植物型	$y = 0.071\ 3x + 0.715\ 4$	0.005\ 9	0.761\ 0
TN	MSL	$y = 0.426\ 2x - 0.165\ 5$	0.522\ 7	0.001\ 0
	大米草型	$y = 0.166\ 2x + 1.299\ 6$	0.104\ 5	0.191\ 0
	芦苇型	$y = 0.157\ 5x + 0.865\ 2$	0.123\ 1	0.153\ 0
	香蒲型	$y = 0.016\ 6x + 1.725\ 7$	0.001\ 2	0.893\ 0
	无植物型	$y = 0.079\ 4x + 0.983\ 2$	0.068\ 8	0.293\ 0
TP	MSL	$y = 0.713\ 5x - 0.020\ 9$	0.854\ 5	0.000\ 0
	大米草型	$y = 0.661\ 7x - 0.233\ 3$	0.694\ 7	0.000\ 0
	芦苇型	$y = 0.384\ 2x - 0.115\ 8$	0.438\ 4	0.003\ 0
	香蒲型	$y = 0.225\ 5x - 0.035\ 3$	0.215\ 6	0.052\ 0
	无植物型	$y = 0.203\ 8x - 0.053$	0.266\ 3	0.028\ 0

虾海水养殖污水中氮素污染物主要为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,同时含有部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等. MSL系统通水层和混合层内交替布局,内置通气管,可使系统内具有良好的有氧硝化环境,有机物被微生物分解和添加的铁屑被氧化时需消耗氧气,为反硝化菌创造了厌氧环境^[20],系统内硝化和反硝化这两大作用协同发生,使氮得到有力去除. MSL系统对磷的去除其中物化作用占主

导,包括混合填料对磷的吸附及与铁等形成沉淀^[21]. MSL系统土壤混合层中添加的膨润土和铁屑,都有利于MSL系统对磷的吸附固定.

相对而言,潜流式人工湿地对污染物的去除效果弱于MSL系统. 潜流式人工湿地对COD和磷的去除主要依靠基质和植物根系对有机物的拦截和吸附,进一步被微生物分解^[22]. 而潜流式人工湿地脱

氮的主要机理是通过微生物的有氧硝化与厌氧反硝化作用,以及植物的吸收和挥发作用^[23]。在本实验中4种湿地处理系统中都装有与MSL处理系统相同的通气管,但COD、氮素去除率显著低于MSL系统处理组。这说明,MSL系统独特结构和介质较潜流式人工湿地系统而言更有利于系统对有机物和氮的去除。相对于MSL系统,人工湿地除了沸石对磷酸的去除作用,其砂土基质对磷的净化能力不强^[24]。然而4种不同植物型的潜流式人工湿地对COD、氮和磷的去除效率也具有显著性差异,由高到低依次为大米草型湿地、芦苇型湿地、香蒲型湿地、无植物型湿地。植物可以为湿地系统提供氧来源和生物的附着点,从而增强湿地对有机物去除的能力,且不同物种的植物在湿地环境中的净化效率都会有较大差异^[25]。靖元孝等^[26]研究结果显示,植物型人工湿地与无植物型人工湿地相比,总氮的去除率可以提高17%。由于实验的海水养殖废水盐分浓度较高,湿地植物的长势与植物的耐盐性有关,即植物耐盐性越强,其长势就越好。大米草叶片具有发达的盐腺,是一种强耐盐植物^[27],而芦苇的耐盐性强于香蒲^[28]。实验中植物长势大米草最好,芦苇次之,香蒲最差。图3和表4显示人工湿地单位面积的污水处理负荷比MSL系统低,因此处理等量污染物时,人工湿地往往占地面积较大,且湿地植物长势受季节影响。虽然,4种人工湿地处理海水养殖废水的效果和单位面积的污水处理负荷不如MSL,但人工湿地与养殖塘结合可以构建养殖-湿地生态系统,可增加养殖场绿化面积。通过科学合理地规划,养殖-湿地生态系统可以成为集养殖生产、销售、休闲、环保于一体的综合性场所,从而提高海水养殖业的附加值。

4 结论

(1)在进水水力负荷 $400 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 下,MSL系统与潜流式人工湿地都对海水养殖废水有一定的处理效果。MSL系统对海水养殖废水的处理效果优于人工湿地系统,对COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TP的平均去除率分别为80.38%、42.68%、40.79%、54.19%、68.14%。

(2)4种潜流式人工湿地(大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型)对海水养殖废水的处理效果的大小主要受湿地植物种类与长势的影响,由高到底依次为大米草型、芦苇型、香蒲型、无植物型。

(3)MSL系统对海水养殖废水中污染物COD、

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TP的平均去除速率分别为26.11、0.074、0.59及 $0.59 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均高于4种潜流式人工湿地。

(4)在本实验条件下,MSL系统对海水养殖废水污染物的去除效果和对污染物承载负荷都优于其他4种潜流式人工湿地(大米草型、芦苇型、香蒲型和无植物型),但湿地系统可以增加养殖场绿化面积,增加养殖业附加值。

参考文献:

- [1] 宋志文,王玮,赵丙辰,等.海水养殖废水的生物处理技术研究进展[J].青岛理工大学学报,2006,27(1):13-17.
- [2] 崔毅,陈碧鹃,陈聚法.黄渤海海水养殖自身污染的评估[J].应用生态学报,2005,16(1):180-185.
- [3] 卜雪峰,曲克明,马绍赛,等.海水养殖废水的处理技术及应用前景[J].海洋水产研究,2003,24(4):85-90.
- [4] 郑瑞东,李田,刘鹰.泡沫分离法在工厂化养殖废水处理中的应用研究[J].渔业现代化,2005,(2):33-35.
- [5] Tango M S, Gagnon G A. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 29(3-4): 125-137.
- [6] Tal Y, Watts J E M, Schreier S B, et al. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system[J]. Aquaculture, 2003, 215(1-4): 187-202.
- [7] Chen X, Luo A C, Sato K, et al. An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas [J]. Water and Environment Journal, 2009, 23(4): 255-262.
- [8] Maltais-Landry M, Marangera R, Brissona J, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands[J]. Water Research, 2009, 43(2): 535-545.
- [9] Yang Q, Tam N, Y Wong, et al. Potential use of mangroves as constructed wetland for municipal sewage treatment in Futian, Shenzhen, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 57(6-12): 735-743.
- [10] Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(9): 2521-2526.
- [11] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate [J]. Environmental Pollution, 2005, 134(3): 411-421.
- [12] Pattnaik R, Yost R S, Porter G, et al. Improving multi-soil-layer (MSL) system remediation of dairy effluent [J]. Ecological Engineering, 2008, 32(1): 1-10.
- [13] Guan Y D, Chen X, Zhang S, et al. Performance of multi-soil-layering system (MSL) treating leachate from rural unsanitary landfills [J]. Science of the Total Environment, 2012, 420(15): 183-190.

- [14] Klomjek P, Nitisoravut S. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(5): 585-593.
- [15] 高锋, 杨朝晖, 李晨, 等. 人工湿地处理含盐生活污水的特性研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3820-3825.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 223-279.
- [17] Luanmanee S, Attanandana T, Masunaga T, *et al.* The efficiency of a multi-soil-layering system on domestic wastewater treatment during the ninth and tenth years of operation [J]. *Ecological Engineering*, 2001, **18**(2): 185-199.
- [18] Boonsook P, Luanmanee S, Attanandana T, *et al.* A comparative study of permeable layer materials and aeration regime on efficiency of multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment in Thailand [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, **49**(6): 873-882.
- [19] Luanmanee S, Boonsook P, Attanandana T, *et al.* Effect of organic components and aeration regimes on the efficiency of a multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, **48**(2): 125-134.
- [20] 罗安程, 张春娣, 杜叶红, 等. 多基质土壤混合层技术应用[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, **37**(4): 460-464.
- [21] Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Characterization of treatment processes and mechanisms of COD, phosphorus and nitrogen removal in a multi-soil-layering system [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2005, **51**(2): 213-221.
- [22] García J, Rousseau D P L, Morató J, *et al.* Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(7): 561-661.
- [23] 张春艳, 韩宝平, 王晓, 等. 从潜流式人工湿地设计谈提高氮去除率方法的途径 [J]. *四川环境*, 2007, **26**(1): 80-84.
- [24] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 51-55.
- [25] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(2): 36-40.
- [26] 靖元孝, 杨丹菁, 陈章和, 等. 两栖榕在人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果 [J]. *生态学报*, 2003, **23**(3): 614-619.
- [27] 王珠娜, 陈秋波, 余雪标. 盐生植物大米草在我国滩涂种植的利弊分析 [J]. *热带农业科学*, 2006, **26**(2): 43-46, 69.
- [28] 李双跃, 王丹丹, 杨静慧, 等. 芦苇、香蒲和荷花的耐盐性研究 [J]. *北方园艺*, 2012, (20): 61-63.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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

国内外公开发行人