

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响

李怀正¹, 章星异¹, 陈卫兵², 叶剑峰³

(1. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 中国石油乌鲁木齐石化公司, 乌鲁木齐 830019; 3. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 通过水平潜流人工湿地处理精养虾塘排水的中试试验, 探讨了在不同高水力负荷条件下 $[1.10 \sim 5.34 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 人工湿地对有机物、氮磷以及悬浮物的去除效果, 以期为其设计运行提供参考。结果表明, 水力负荷与COD、TN、TP、SS的去除率呈负相关; COD、TN、SS去除速率随水力负荷的升高, 先升后降, 最高分别达到69、1.8和117.6 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; TP的去除速率随水力负荷的升高变化并不明显。人工湿地在水力负荷2.52~3.24 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围内运行时, 污染物去除总量最高处理效果最佳。

关键词: 人工湿地; 精养虾塘; 水产养殖; 水力负荷; 基质拦截; 去除速率

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1597-07

Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland

LI Huai-zheng¹, ZHANG Xing-yi¹, CHEN Wei-bing², YE Jian-feng³

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Urumqi Petrochemical Complex, China National Petroleum Corporation, Urumqi 830019, China; 3. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: A pilot scale experiment of intensive shrimp aquaculture wastewater treatment using horizontal subsurface flow constructed wetland is carried out and the effect of treatment performance under high hydraulic loading conditions $[1.10 \sim 5.34 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ is investigated. The results show that, hydraulic loading and reduction efficiency of COD, TN, TP and SS is negatively correlated. However, with the hydraulic load increases, the removal rate of COD [up to 69 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], TN [up to 1.8 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] and SS [up to 117.6 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] first increased and then decreased, while the change of TP removal rate is not obvious. Therefore, under the range of 2.52 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ to 3.24 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ high hydraulic loading, constructed wetland shows best technically feasible for managing wastewater treatment of intensive aquaculture.

Key words: constructed wetland; intensive shrimp pond; aquaculture; hydraulic loading; substrate interception; removal rate

水产养殖水污染与城市生活污水和工业废水相比, 有其独特的特点, 即潜在污染物含量低、一次排水量大、与常见陆源污水存在差异, 处理难度大大增加。养殖废水中氮磷营养成分、溶解性有机物、悬浮物是处理的重点。随着我国水产养殖业的发展, 养殖废水排放污染环境的问题也越来越突出^[1]。

目前, 已初步形成的水产养殖水处理技术, 主要采用理化方法或生物方法。其中, 理化方法由于成本高、耗能大, 应用受到一定限制。而生物方法由于成本低、适应性广、具有生态效应等优点, 在目前得到广泛应用和持续研究^[2]。其中人工湿地净化技术具有技术成本低, 维护费用少, 生态经济双重效应, 被用于水产养殖废水的处理, 能够收到很好的效果^[3,4]。但由于受到土地面积的限制, 低水力负荷运行的人工湿地需要占用更大的面积, 实际建造和运行显然存在着一定的问题, 而且这并不符合养殖废水的排放规律。水力负荷的大小影响着湿地布水情

况, 进而影响其污染物去除效果, 有研究表明, 人工湿地在高水力负荷 $[1.57 \sim 1.95 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 条件运行时也能够有良好效果^[5,6]。因此, 本研究因地制宜地构造边坡人工湿地, 通过考察水力负荷对其处理精养虾塘排水的影响, 以期在确保处理效果的前提下获得最佳的水力负荷, 优化运行参数; 分析高水力负荷条件下人工湿地对水产养殖废水氮磷、有机物及悬浮物的去除机制, 以期为人工湿地在高水力负荷条件下处理水产养殖水的设计和运行提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

收稿日期: 2011-07-05; 修订日期: 2011-10-19

基金项目: 上海市重大科技攻关项目(08dz1900406)

作者简介: 李怀正(1962~), 男, 研究员, 主要研究方向为污水处理理论与技术, E-mail: lih_z_tj@yahoo.cn

试验所用湿地构筑在排水河道与塘堤之间的河岸边坡上,湿地剖面示意详见图 1. 试验区域湿地总宽度 10 m,深度 1.1 m(有效深度 0.85 m),长度 3.0 m,集水高度为 0.45 m,底边坡度 0.22,边坡坡度 0.3,靠近河岸处设置木桩挡墙(高出水面 32 cm). 湿地底坡覆 1~2 cm 水泥砂浆. 湿地出水区内每 1 m 设置一取样口(穿孔 PVC 管, DN50, 孔距 0.2 m, 孔径 6 mm, $n = 3$, 加盖), 在木桩挡墙处设置略低于其高度的防渗膜(高出水面 5 cm), 用于湿地溢流水. 水平推流湿地共需基质体积 25 m^3 . 基质从左至

右依次为布水区砾石 30 cm, 粒径 16~32 mm, 瓜子片(粒径 < 10 mm)层 250 cm, 瓜子片上层采用砂土混合物覆盖 20 cm, 不设集水区^[7]. 湿地上表面种植栀子花, 起到美化边坡及湿地供氧的作用.

为了优化湿地运行参数, 把湿地分隔成 10 块小湿地, 1 m 为一单元, 每 2 块湿地为一平行组, 详见湿地平面图 2. 试验区利用潜水泵从虾塘抽水, 在泵吸入口设置不锈钢拦污网, 防止大杂质进入泵体导致损坏. 泵后接阀门以及水表控制流量.

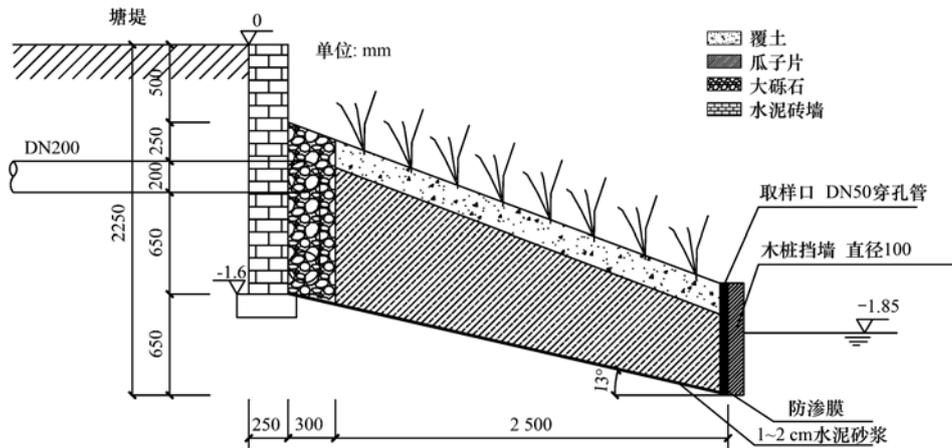


图 1 人工湿地剖面示意

Fig. 1 Profile drawing of slope constructed wetland

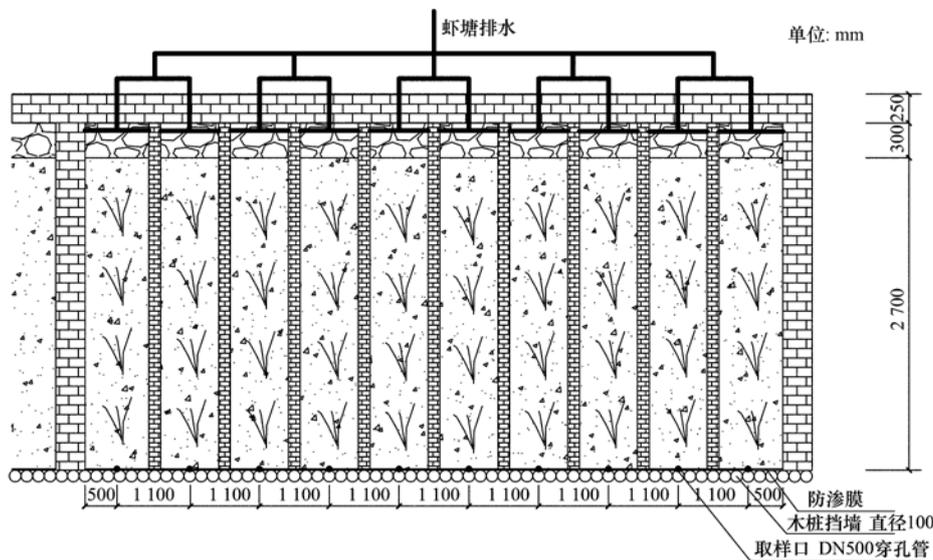


图 2 人工湿地平面示意

Fig. 2 Layout plan of constructed wetland

1.2 进水水质

虾塘养殖周期为 1 a, 4~5 月开始放养虾苗, 平均每亩虾塘投放虾苗 5~6 万尾; 7 月开始第一次换水, 水质开始有一定波动, 9 月中旬至 10 月底, 分批次收获, 换水频率根据水质情况以及养殖收获情况

而定; 11 月底分批清塘, 至次年 4 月为闲置期. 试验湿地 6 月建成, 虾塘水经潜水泵直接进入湿地, 精养虾塘水质即试验进水水质, 经过 1 a 的养殖周期实际检测分析, 换水期间水质(7~11)月平均变化如表 1 所示.

表 1 精养虾塘水质 7~11 月平均变化

月份	COD /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	水温 /°C
7	79.924	0.962	2.588	29.12
8	98.227	0.928	3.755	29.35
9	105.386	0.605	4.241	25.55
10	112.346	0.610	5.277	21.38
11	101.573	0.577	4.952	16.39

1.3 试验方法

根据文献调研中各污染物指标的去除速率和去除率,结合本试验虾塘水质,估算所需表面水力负荷为 $2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右较适宜^[3-6],水力负荷以此数值为依据进行高水力负荷试验设计,不同水力负荷运行工况详见表 2. 湿地以阶段 1 的水力负荷启动,稳定运行后阶段 1~2 在每个试验分区进行,阶段 3~7 在每 2 个试验分区平行组同时进行. 每个试验阶段至少运行 4 周,运行稳定后对进水中各污染物指标进行测定. 温度对人工湿地运行有重要影响,因此,根据虾塘实际运行期间的温度(20~25°C)环境对稳定运行的数据进行分析,并计算净化效果.

表 2 排水处理系统水力负荷

阶段	项目	最大值	最小值	平均值
1	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.35	0.22	0.28
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	1.40	0.87	1.10
2	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.48	0.30	0.39
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	1.90	1.20	1.55
3	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.47	0.42	0.43
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	1.86	1.69	1.74
4	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.68	0.57	0.63
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	2.70	2.30	2.52
5	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.89	0.75	0.84
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	3.54	3.02	3.34
6	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1.25	1.03	1.15
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	4.99	4.13	4.60
7	进水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1.50	1.27	1.33
	表面水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	5.98	5.07	5.34

1.4 分析方法

试验选择的主要分析指标为 COD、TN、TP、DO、SS、pH, 其中 COD 采用标准重铬酸钾滴定法(GB 11901-89)测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定, TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定, DO 采用便携式溶解氧仪现场测定(GB 11913-89), SS 采用重量法

(GB 11901-89)测定, pH 值采用 PHS-P 型酸度计测定(GB 6920-86).

2 结果与讨论

2.1 有机物的去除效果

COD 去除率随着水力负荷的升高而降低, 相关性达到 0.991(图 3), 但 COD 的去除速率却随着水力负荷的升高, 先升后降, 并在 $1.74 \sim 4.60 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的水力负荷范围内保持着较高 [$55 \sim 69 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 的去除速率(图 4).

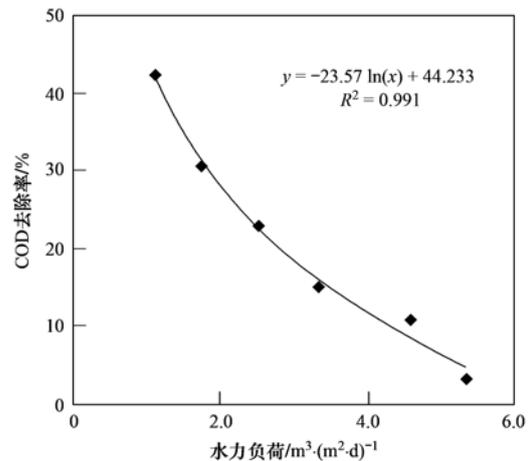


图 3 水力负荷与 COD 去除率相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between hydraulic loading and COD reduction efficiency

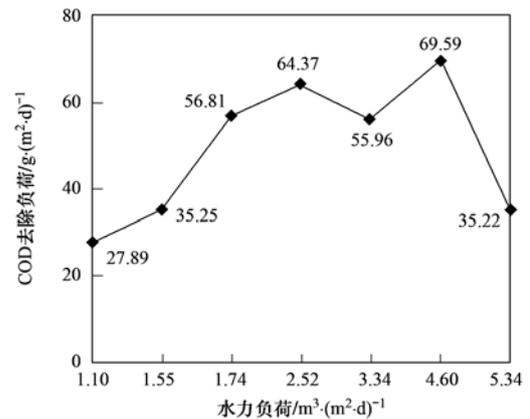


图 4 水力负荷对 COD 去除速率的影响

Fig. 4 Effect of hydraulic loading on COD removal rate

水产养殖排水中的有机物主要含有不溶性有机物和可溶性有机物. 其中不溶性有机物以悬浮固体的形式通过沉降、基质拦截、植物拦截、土壤过滤等作用被截留下来, 之后再被基质中生长的微生物加以利用; 而可溶性有机物则可通过基质吸附、植物吸收以及微生物的代谢过程被去除, 一般认为基质和植物的吸收对有机物的去除贡献率不大^[8], 水体

中有机物被微生物分解需要大量氧气参与. 水平潜流湿地的供氧主要依靠大气复氧、植物泌氧以及进水携氧^[9]. 潜流人工湿地处理水产养殖排水时氧供需平衡模型见图 5.

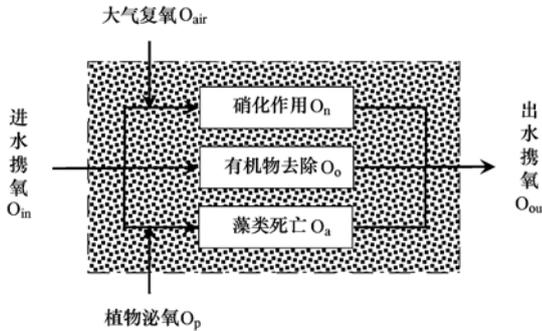


图 5 氧供需平衡模型

Fig. 5 Oxygen supply and demand model

湿地中如要通过微生物对污染物进行有效去除,需满足方程(1).

表 3 不同水力负荷湿地供氧以及进出水携氧量分析/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

Table 3 Effect of hydraulic loading on oxygen supply and DO analysis of inlet and outlet water in constructed wetland/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

项目	水力负荷/ $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$						
	1.10	1.55	1.74	2.52	3.34	4.60	5.34
平均供氧量	11.47	14.01	14.13	22.55	29.05	39.05	44.92
空气扩散供氧量 O_{air}	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
植物泌氧量 O_{p}	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
进水携氧量 O_{in}	8.91	11.45	11.57	19.99	26.49	36.49	42.36
出水携氧量 O_{out}	1.09	0.26	0.10	0.91	1.56	4.29	7.25

从表 3 可以看出,进水携氧为湿地供氧量的主要来源. 大气复氧以及植物泌氧量有限. 藻类死亡分解时又会消耗大量氧气^[12,13], 因此,用于有机物去除的氧量十分有限. 随着水力负荷的增加,供氧量也有所增加,微生物作用可利用的氧量也会增加,但水力负荷的增加会对湿地基质拦截沉降作用带来一定影响,这个规律与水力负荷和 COD 去除率的关系一致. 由此看来,在 $5.34 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 水力负荷下, COD 去除速率下降显著(图 4), 主要是因为水力负荷过大,拦截作用减弱,且有可能将之前在基质间隙中拦截下来的有机物冲出,导致实际去除速率变得更低. 综上,可以认为 COD 去除主要依靠湿地拦截作用,水力负荷越大拦截作用去除 COD 的贡献越大; 微生物作用次之.

2.2 TN 的去除效果

TN 去除率随着水力负荷的升高而降低,相关系数为 0.991(图 6), 但在水力负荷为 $4.60 \sim 5.34 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时去除率降至 6% 以下. 且 TN 的去除速率随着水力负荷的升高,先升后降,并在 $2.52 \sim 3.34 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 的水力负荷范围内保持较高的

$$O_{\text{in}} + O_{\text{air}} + O_{\text{p}} \geq O_{\text{out}} + O_{\text{n}} + O_{\text{o}} + O_{\text{a}} \quad (1)$$

式中, O_{in} 为进水携氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{air} 为大气复氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{p} 为植物泌氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{out} 为出水携氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{n} 为硝化耗氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{o} 为有机物去除耗氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; O_{a} 为藻类死亡耗氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

湿地中,氧气通过水气表面和介质空隙进入,由于水平流在一定水力负荷条件下维持一定水位,故不存在空气动态对流供氧,而空气扩散供氧量根据报道一般为 $0.11 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[9]. 植物根部泌氧作用比较好的美人蕉为 $2.45 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[10], 美国 EPA 推荐的植物泌氧能力最大值为 $3.0 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[11]. 不同水力负荷下湿地供氧以及进出水携氧量分析见表 3. 植物泌氧量取美人蕉的泌氧速率值.

去除速率 $1.7 \sim 1.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (图 7).

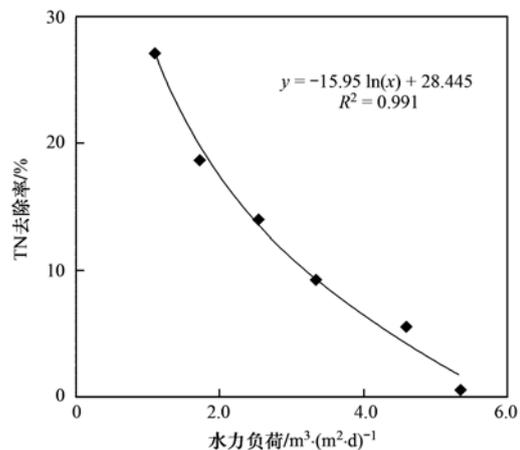


图 6 水力负荷与 TN 去除率相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between hydraulic loading and TN reduction efficiency

水平潜流人工湿地对水产养殖排水中的氮素去除主要通过植物吸收、基质吸附拦截、微生物硝化反硝化去除,因前置无预处理,进水所含藻类进入湿地后释放的氮素会增加实际的进水负荷. 方程(2)表示湿地氮素去除的平衡式.

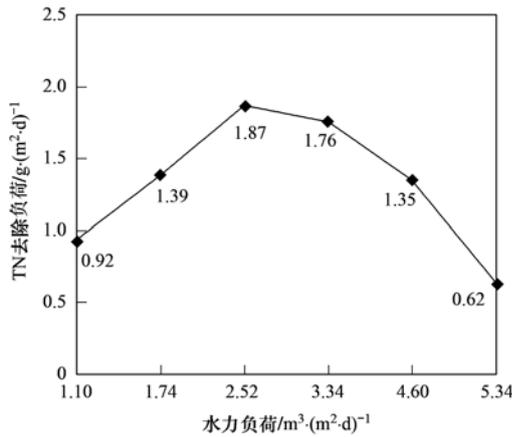


图7 水力负荷对 TN 去除速率的影响

Fig. 7 Effect of hydraulic loading on TN removal rate

$$N_R = N_p + N_m + N_i + N_b - N_a \quad (2)$$

式中, N_R 为湿地氮去除量; N_p 为植物吸收氮量; N_m 为基质吸附氮量; N_i 为基质拦截氮量; N_b 为微生物

去除氮量; N_a 为藻类释放氮量.

植物吸收氮量取值为 $0.03 \sim 0.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ [11], 瓜子片理论最大吸附氮量为 $0.1324 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [8]. 因此, 湿地中所用瓜子片最大吸附氮量为 $0.18 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 且仅在前期的作用较强, 后期因吸附容量的限制, 作用相对变小.

表4列出了2个水力负荷条件下, 在2个技术断面上(湿地进水、湿地出水)氮素各形态分析以及pH值. 从 $1.10 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1.74 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 这2个水力负荷的氮素形态分析中可以发现, 出水中氮素以有机氮为主体, 主要原因是养殖塘中有一定的藻类积累, 且有机氮去除量占总氮去除量最大, 另外湿地中微生物作用将藻类释放的有机氮分解为氨氮, 因此, 湿地出水中氨氮比例增大. 硝态氮的增加表明存在一定硝化作用, 湿地进出水pH值的减小也表明其中存在着一定硝化作用.

表4 不同水力负荷条件下各技术断面氮素形态及 pH 分析

Table 4 Effect of hydraulic loading on different nitrogen forms of inlet and outlet water and analysis of pH value in constructed wetland

水力负荷 $/\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	技术断面	硝酸盐氮 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	占 TN 的 质量分数 /%	亚硝酸盐氮 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	占 TN 的 质量分数 /%	氨氮 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	占 TN 的 质量分数 /%	有机氮 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	占 TN 的 质量分数 /%	总氮 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
1.10	湿地进水	0.010	0.4	0.000	0.0	0.369	15.2	2.056	84.4	2.435	9.00
	湿地出水	0.124	6.4	0.000	0.0	0.490	25.4	1.312	68.1	1.926	8.40
1.74	湿地进水	0.000	0.0	0.023	0.5	0.749	17.2	3.579	82.3	4.351	8.51
	湿地出水	0.234	5.8	0.026	0.6	1.679	41.7	2.088	51.9	4.027	7.67

水力负荷的增加会对湿地基质拦截沉降作用带来一定影响, 这个规律与水力负荷和 TN 去除率的关系一致. 综上, 可以认为 TN 去除主要依靠湿地拦截作用, 微生物作用次之.

2.3 TP 的去除效果

TP 去除率随着水力负荷的升高而降低, 相关系数为 0.992 (图8). TP 的去除速率在前期随着水力负荷的升高, 变化并不明显, 而在水力负荷增加的后期下降明显 (图9).

水平潜流湿地对水产养殖排水中磷素的去除主要通过植物吸收、基质吸附拦截、微生物同化去除. 因前置无预处理, 藻类进入湿地后释放的磷素会增加实际的进水负荷. 方程(3)表示湿地磷素去除的平衡式.

$$P_R = P_p + P_m + P_i + P_b - P_a \quad (3)$$

式中, P_R 为湿地磷去除量; P_p 为植物吸收磷量; P_m 为基质吸附磷量; P_i 为基质拦截磷量; P_b 为微生物同化作用; P_a 为藻类释放磷量

植物吸收磷量微乎其微, 取值为 $0.04 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ [14]. 由于潜流湿地不排泥, 运行初期因

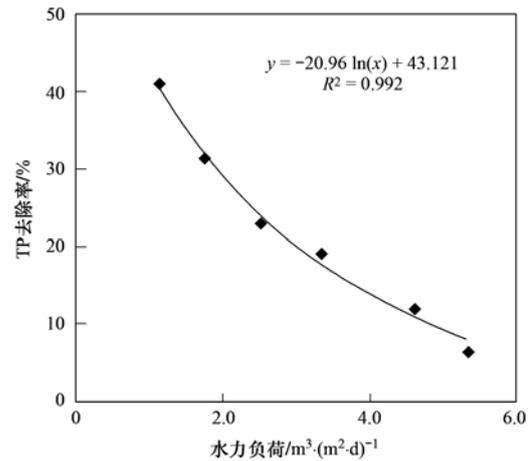


图8 水力负荷与 TP 去除率相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between hydraulic loading and TP reduction efficiency

湿地系统内部微生物系统的成熟过程, 微生物对磷的去除有一定贡献, 湿地稳定运行一段时间后微生物作用逐渐减少, 这个规律与水力负荷和 TP 去除率的关系一致. 瓜子片理论最大吸附磷量为 $0.4261 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [8], 因此, 湿地中所用瓜子片最大吸附磷量为 $0.57 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 而瓜子片的磷解析率仅为 5%

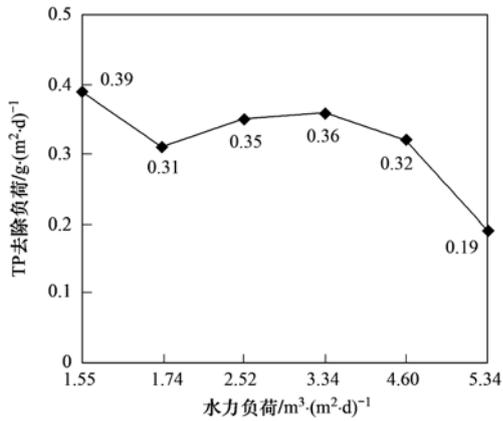


图9 水力负荷对 TP 去除速率的影响

Fig. 9 Effect of hydraulic loading on TP removal rate

左右. 湿地基质的吸附作用将 PO_4^{3-} 固定在介质表面^[15]. 湿地连续运行时, 湿地除磷能力随着基质吸附位的消耗而降低, 仅在系统运行前期存在, 后期吸附作用很少, 对 TP 的去除贡献有限. 因此, 本湿地磷素的大量去除只能通过基质拦截作用来进行, 但也会受到水力负荷的影响. 这个规律与水力负荷和 TP 去除率的关系一致. 在 $5.34 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 去除率与去除速率的下降, 可能是因为大水量对于湿地基质的冲刷, 将之前拦截的不溶性磷素带出的缘故. 综上, 可以认为 TP 的去除主要依靠湿地基质的拦截作用.

2.4 SS 的去除效果

随着水力负荷的增加, SS 去除率呈下降趋势. 同时 SS 的去除速率前期不断上升, 到 $3.34 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时到达极值 $117.58 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 水力负荷继续升高时反而有下降的趋势(图 10).

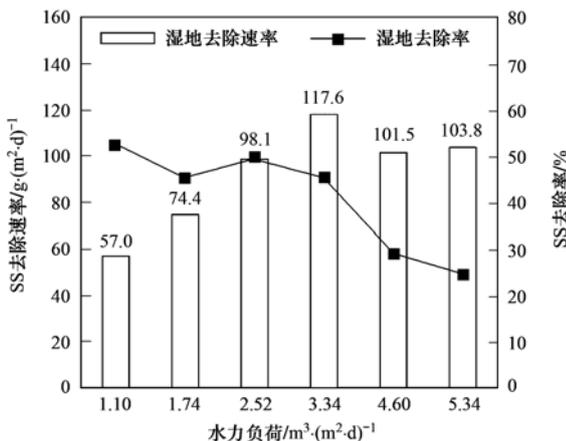


图10 不同水力负荷与 SS 去除速率和去除率变化曲线

Fig. 10 Effect of hydraulic loading on SS removal rate and reduction efficiency

水平潜流型人工湿地的悬浮物主要通过基质过滤、植物根茎拦截、微生物降解等得以去除. 水产养

殖排水进入湿地系统, 湿地基质颗粒对进水中固体颗粒产生拦截和吸附作用. 拦截作用在沉速较大时又可以在重力作用下脱离流线产生沉降作用. 此外, 湿地中根系密集发达交织在一起的植物亦能对固体颗粒起到拦截吸附作用. 同时, 微生物对积累的颗粒态有机物进行降解, 也能去除一部分悬浮固体.

水产养殖排水中的悬浮固体主要包含颗粒态的氮磷素、有机物等. 本研究分析进水中经过 $0.45 \mu\text{m}$ 定量滤纸过滤后滤液中可滤物质的含量, 来推算不可滤物质所占质量分数, 如表 5 所示.

表 5 湿地进水有机物、氮磷素可滤物质与不可滤物质所占质量分数/%

水质指标	COD	TN	TP
可滤物质	54.6	50.8	20.9
不可滤物质	45.4	49.2	79.1

从表 5 中不可滤物质所占质量分数可以看出, 有机物、氮磷素都占了将近一半的比例, TP 更是高达 79.1% 均为不可滤物质. 这表明能够通过湿地基质拦截作用去除的污染物比例比较高, 但一定孔隙率的基质所去除的量有一定限度, 而且随着水力负荷的增加, 湿地中水流速度增加, 可能带出之前已经被拦截的物质, 因此, 拦截作用越来越弱, 去除率呈下降趋势. 这个趋势与 COD、TN、TP 去除率趋势均一致. 由此表明, 在 COD、TN、TP 去除的作用中湿地基质的拦截作用为主要作用.

3 结论

(1) 水力负荷与 COD 的去除率呈负相关, 而 COD 去除速率却随着水力负荷的升高, 先升后降, 在 $1.74 \sim 4.60 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的水力负荷范围内 COD 达到 $55 \sim 69 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的去除速率; 人工湿地对水产养殖排水中有机物的去除主要依靠湿地基质拦截作用, 微生物作用次之.

(2) 水力负荷与 TN 的去除率呈负相关, 而 TN 去除速率却随着水力负荷的升高, 先升后降. 在 $2.52 \sim 3.34 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的水力负荷范围内 TN 达到 $1.7 \sim 1.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的去除速率; 人工湿地对水产养殖排水中 TN 的去除主要依靠湿地基质拦截作用, 微生物作用次之, 基质吸附以及植物吸收作用较小.

(3) 水力负荷与 TP 的去除率呈负相关, 但 TP 的去除速率在前期随着水力负荷的升高, 变化并不明显, 而在水力负荷增加的后期下降明显, 并在

5.34 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 水力负荷时下降至 0.19 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 人工湿地对水产养殖排水中 TP 的去除主要依靠湿地基质拦截作用, 基质吸附、植物吸收较小, 微生物作用可以忽略。

(4) 水力负荷与 SS 的去除率呈负相关, 而 SS 去除速率却随着水力负荷的升高, 先升后降, 在 3.34 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的水力负荷时 SS 达到极值去除速率 117.6 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 人工湿地对水产养殖排水中 SS 的去除主要依靠湿地基质拦截作用。

(5) 综上所述, 人工湿地在高水力负荷条件下净化处理养殖排水时, 在遵循养殖生产规律的情况下, 宜选用 2.52 ~ 3.24 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围内的水力负荷运行条件, 污染物去除总量最高, 处理效果最佳, 能够最大发挥人工湿地的潜能。

参考文献:

- [1] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [2] 章星异, 朱环, 李怀正, 等. 水产养殖水生物处理技术研究现状与展望[J]. 水处理技术, 2010, 36(1): 25-29.
- [3] Halide H, Ridd P V, Peterson E L, *et al.* Assessing sediment removal capacity of vegetated and non-vegetated settling ponds in prawn farms[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(4): 295-314.
- [4] Tilley D R, Badrinarayanan H, Rosati R, *et al.* Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. Aquacultural Engineering, 2002, 26(2): 81-109.
- [5] 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.
- [6] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system[J]. Aquaculture, 2002, 209(1-4): 169-184.
- [7] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 几种经济型人工湿地基质的除污效能分析[J]. 中国给水排水, 2007, 23(19): 27-30.
- [8] 叶建锋. 垂直潜流人工湿地中污染物去除机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [9] 杜晓丽. 高负荷单级人工湿地强化脱氮技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [10] 何连生, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 人工湿地氮转化与氧关系研究[J]. 环境科学, 2007, 27(6): 1083-1087.
- [11] USEPA. Constructed wetlands treatment of municipal wastewater manual. EPA625-R-99-010[S]. Cincinnati: Office of Research and Development, 2000.
- [12] 黄萌. 富营养化对水生生态系统的污染生态效应[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(20): 137-138.
- [13] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.
- [14] 刘超翔, 胡洪营, 张健, 等. 表面流与潜流式生态床处理农村污水[J]. 中国给水排水, 2002, 18(11): 5-8.
- [15] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393-399.
- [16] Sindilariu P D, Schulz C, Reiter R. Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland [J]. Aquaculture, 2007, 270(1-4): 92-104.
- [17] Vohlaa C, Alasa R, Nurk K, *et al.* Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1-3): 66-74.
- [18] Dušek J, Pícek T, Cížková H. Redox potential dynamics in a horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment: Diel, seasonal and spatial fluctuations[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(3): 223-232.
- [19] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, *et al.* Nitrate removal from groundwater using constructed wetlands under various hydraulic loading rates [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16): 7504-7513.
- [20] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y. The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture [J]. Environmental Pollution, 2003, 123(1): 107-113.
- [21] Carsten S, Jorg G, Bernhard R. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow[J]. Aquaculture, 2003, 217(1-4): 207-221.
- [22] Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3911-3922.
- [23] Comeau Y, Brisson J, Réville J P, *et al.* Phosphorus removal from trout farm effluents by constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 2001, 44(11-12): 55-60.
- [24] 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 129-134.
- [25] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正. 垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2166-2171.
- [26] 王晟, 徐祖信, 李怀正. 潜流湿地处理不同浓度有机污水的差异分析[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2194-2200.
- [27] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1965-1969.
- [28] 鄢璐. 人工湿地氧分布规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [29] 李远伟, 邓仕槐, 武俊英, 等. 人工湿地基质磷吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 643-648.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行