

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

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

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋微, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区内环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 万金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪污固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌渠中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相微萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓明, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及其影响因素	刘敏霞, 杨玉玉, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

人工湿地净化工业区含菲污染降雨径流的效果研究

敬丹丹¹, 万金泉^{1,2*}, 马邕文^{1,2}, 李东亚¹, 王艳¹, 黄明智¹

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 2. 华南理工大学制浆造纸国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 根据东莞市同沙水库集水区工业区降雨径流的水质特征, 采用水平潜流式人工湿地对工业区降雨径流进行模拟净化研究, 分析径流主要污染物于湿地床体内的空间变化规律. 本研究主要考察了湿地系统中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 及菲的空间分布特征, 以及湿地系统上层多酚氧化酶(PPO)、硝酸盐还原酶(NR)酶活性的变化规律; 同时监测湿地系统 DO、pH、ORP 及水温这4项理化指标, 并分析它们对系统中污染物去除效能及酶活性的影响. 结果表明, DO、pH、ORP 及水温均表现为横向降低趋势, COD、TP 及菲的吸附去除在床体前端 1/4 处已基本完成; 纵向, 上层 DO、ORP 均显著高于底层, 水平潜流系统总体处于缺氧、厌氧状态, 上层 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及菲去除率分别为底层的 1.17~1.36、2.04~2.11、1.40~1.92、1.37~2.30、1.07~1.36 倍, 净化效能的差异纵向强于横向. NR 活性与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著正相关, 横向上 NR、PPO 活性差异不明显.

关键词: 人工湿地; 降雨径流; 菲; 酶活性; 差异性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3095-07

Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene

JING Dan-dan¹, WAN Jin-quan^{1,2}, MA Yong-wen^{1,2}, LI Dong-ya¹, WANG Yan¹, HUANG Ming-zhi¹

(1. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to the water characteristics of industrial rainfall runoff in the catchment of Tongsha Reservoir, Dongguan City, a subsurface-flow constructed wetland (SSFCW) was used to treat simulated rainfall and the spatial variation of removal efficiency of contaminants in the wetland bed was analyzed. The longitudinal and vertical variation of removal efficiency of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, TP and phenanthrene were examined. Enzyme activity of polyphenol oxidase (PPO) and nitrate reductase (NR) along the wetland bed were analyzed as well, meanwhile, four biogeochemical indexes of the wetland system, including DO, pH, ORP and water temperature, were monitored and their influences on the removal efficiency of contaminants and enzyme activity were analyzed. Results showed that DO, pH, ORP, water temperature all presented a decreasing tendency along the wetland bed, and the removal of COD, TP and phenanthrene occurred mainly in the front quarter of the wetland system; in the vertical direction, DO and ORP in the upper wetland bed were significantly higher than those in the ground floor, suggesting that the horizontal subsurface system was in an anaerobic or anoxic condition. The removal rates of COD, TP, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and phenanthrene were 1.17-1.36, 2.04-2.11, 1.40-1.92, 1.37-2.30, and 1.07-1.36 times higher than those at the bottom, respectively. Therefore, the vertical variation of purification efficiency was more significant than the longitudinal variation. A significant positive correlation was determined between the enzyme activity of NR and the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration, but the longitudinal variation in the enzyme activity of NR and PPO was not obvious.

Key words: constructed wetland; rainfall runoff; phenanthrene; enzyme activity; spatial variation

近年来,随着经济社会发展进步,因城市降雨径流污染而导致城市周边水体水质恶化的现象日趋突出,降雨径流污染已成为仅次于农业非点源污染的第二大非点源污染^[1]. 滞留池、滞留塘、地下涵水池、人工湿地等构筑物,是目前国际上解决城区初期径流污染所采取的主要措施,而人工湿地系统尤其是潜流型人工湿地(subsurface-flow constructed wetlands, SFCWs),因其运行维护成本低、生态属性好,在北欧和美国得到较广泛应用^[2,3].

目前,大部分研究主要集中在人工湿地系统去

除效率上^[4],对于系统理化性质及污染物在整个床体中空间变化的研究尚不够全面,湿地床体纵向上净化效能差异的研究信息还很有限^[5],在已有的研究报道中,人工湿地深度从 0.35~1.1 m,没有统一标准^[6]. 因此,研究湿地床体中污染物空间去除效能变化对于认识湿地系统净化污染物机制,进而合

收稿日期: 2012-11-23; 修订日期: 2013-01-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2008ZX07211-006)

作者简介: 敬丹丹(1988~),女,硕士,主要研究方向为人工湿地技术, E-mail: jingdan183@sina.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: ppjqwan@scut.edu.cn

理配置湿地外部尺寸,减少湿地基建成本有着重要意义. 为此,本研究应用水平潜流型人工湿地,采用间歇运行方式,对工业区降雨径流进行模拟净化,考察了湿地系统 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 及菲处理效能的横纵向变化及相关酶活性,并对溶解氧、pH、ORP、水温这 4 项理化指标进行了分析,以期直观揭示各指标去除效能的空间分布特征,并为进一步提高湿地系统处理效能、节约湿地规模化应用的建设成本提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 人工湿地处理系统的构建

实验所用人工湿地装置位于华南理工大学大学城校区国家水专项雨水面源污染人工湿地控制示范基地内,池体由钢筋混凝土浇筑而成,长 $\times$ 宽 $\times$ 高=4.0 m $\times$ 2.0 m $\times$ 1.0 m(见图1). 填料选用碎石、细砂及本地土壤,从下往上依次为碎石(d : 20~30 mm)层 30 cm,细砂(d : 2~3 mm)层 30 cm,本地土壤层 20 cm. 设计水位为 40~75 cm. 湿地植物选取

华南地区常用的风车草(*Cyperus alternifolius*)和春芋(*Philodendron selloum* Koch),分两段种植,床体前段种植风车草,后段种植春芋,种植密度均为 10 株 $\cdot\text{m}^{-2}$. 人工湿地装置于 2011 年 10 月建造完成,进行养护,并于 2012 年 3 月中旬开始正常稳定运行.

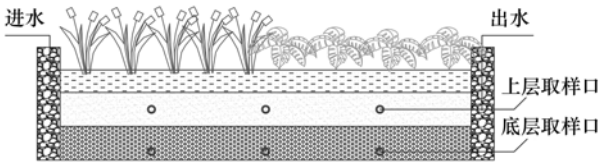


图1 水平潜流人工湿地处理系统装置
Fig. 1 Horizontal subsurface-flow constructed wetland treatment system

1.2 进水水质状况

本研究以人工模拟的工业区降雨径流作为湿地系统实验进水,进水氮磷营养物质分别以 NH_4Cl (分析纯)、 KH_2PO_4 (分析纯)配制. 主要水质指标如表 1 所示.

表1 实验用人工模拟工业区降雨径流水质指标¹⁾

Table 1 Characteristics of the simulated industrial rainfall runoff

项目	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	菲 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
实际雨水	100~260 (130)	2.29~3.83 (3.06)	3.36~4.92 (4.14)	0.59~1.96 (1.28)	0.07~0.51 (—)	6.3~6.7 (6.5)
模拟雨水	80.21~172.26 (136.72)	2.03~3.85 (3.17)	2.8~5.25 (4.33)	0.88~1.6 (0.69)	14.29~238.09 (144)	—

1) 括号内为平均值

1.3 实验设计及样品采集

人工湿地系统自 2012 年 3 月中旬起以间歇流方式运行. 监测湿地系统 DO、ORP、pH 及水温这 4 项理化指标及常规水质参数,包括 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 及菲,监测频率为每星期 2 次,监测数据以平均值表示. 多酚氧化酶、硝酸盐还原酶活性测定取 7 个平行样.

样品采集:湿地上层取样口位于基质表层下 40 cm 处,底层取样口位于基质表层下 80 cm 处(见图1). 横向上距离湿地床体进水端 1、2、3 m 处共设 3 个采样断面(分别为 1、2、3 号断面). 水样的采样位置、数量能够代表床体横向及纵向变化. 用于酶活性测定的土样取自湿地上层,即基质表层下 40 cm 处. 样品采集后立即测定.

1.4 测试分析方法

DO、pH、ORP 及水温这 4 项理化指标采用原

位测定法测定. 水质参数 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP 均依照文献[7]中方法测定. 菲的检测使用高效液相色谱(HPLC)法,色谱柱为 Hypersil 5 C18 反相柱(ODS, 250 mm $\times$ 2.0 mm, Phenomenex). 流动相为 90% 乙腈与 10% 甲醇混合液,流速为 1 mL $\cdot\text{min}^{-1}$. 菲浓度范围为 0.5~60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,采用荧光检测器检测(激发波长为 250 nm,发射波长为 364 nm); 60~1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,采用 UV 检测器在 250 nm 处检测. 多酚氧化酶、硝酸盐还原酶活性测定参照文献[8]进行.

1.5 数据处理

数据处理用 Origin 8.0 进行,相关性和显著性分析均利用 SPSS 18.0 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 人工湿地系统理化指标的空间分布

运行周期内对 DO、ORP、pH、水温这 4 项理化

指标进行了定期监测,各指标监测平均值如表 2 所示.

表 2 湿地床体理化性质

项目	进水	1 号		2 号		3 号		出水	
		上层	底层	上层	底层	上层	底层	上层	底层
DO/mg·L ⁻¹	2.64	1.77	0.74	0.97	0.62	0.73	0.46	0.85	0.34
pH	7.97	7.36	7.89	7.16	7.79	7.46	7.55	7.57	7.31
ORP/mV	138.8	110.8	-45.75	82.45	-50.95	44.35	-67.45	54.85	-63.7
t/℃	24	24.2	24.82	23.82	24.18	23.55	23.97	23.32	23.69

DO、ORP 在湿地床体横向递减,由图 2 可知,至系统末端 DO 略有回升,湿地前半程 DO 变化速率 [0.83 mg·(L·m)⁻¹] 远高于后半程 [0.06 mg·(L·m)⁻¹]. 分析原因可能是有机物的有效去除、NH₄⁺-N 的硝化均发生在湿地床体前 1/3 段,后 2/3 段去除作用较小^[9],从而前段溶解氧消耗量大于后段,加之系统前半程种植为根系发达的风车草,可能其根系泌氧作用强于春芋^[10],使得 DO 浓度横向递减. 至床体末端,大部分污染物已得以去除,有机物降解速率变慢,耗氧速率降低,此时由于植物光合作用及表层大气复氧作用,部分氧气传递至上层,使得上层末端 DO 浓度有所回升. 纵向上,上层 DO 水平显著高于底层 ($P < 0.05$). 植物根系泌氧与大气复氧的氧气能部分传递至上层,使得上层 DO 保持在一定水平,而这一部分的氧气来源很难传递至底层,因而底层几乎无氧补充. 底层较低的 DO,高浓度污染物,加之 pH、水温的影响,微生物代谢活动受到抑制,底层 ORP 值明显低于上层 ($P < 0.05$).

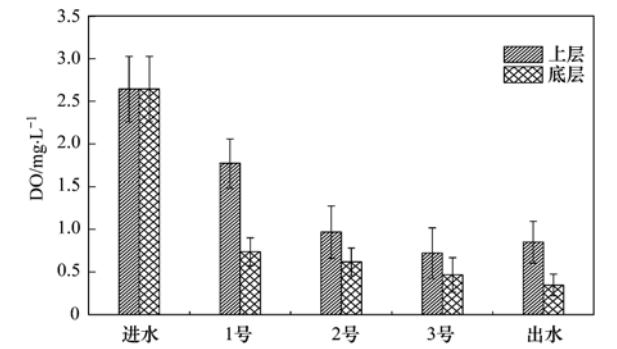


图 2 DO 的纵向及横向分布

Fig. 2 Vertical and longitudinal distribution of DO

由图 3 可知,横向上,pH 表现为先降低后升高,出现了拐点. 完全硝化 1 g NH₄⁺-N,需消耗碱度(以 CaCO₃ 计) 7.14 g,而 1 mol NH₄⁺-N 消耗会释放出 1.98 mol 的 H⁺^[11]. 本实验模拟进水以 NH₄Cl (分析纯) 配制,进水中氨氮浓度较高,加之前端 DO 水平

较高,利于氨氮去除,pH 降低,达最低点后 pH 开始回升,说明在 pH 达最低点处氨氮已消耗完毕,横向 pH 出现的拐点可作为湿地系统氨氮反应结束的指示指标^[6]. 纵向上,上层 pH 略低于底层,但两层之间差异未达显著性水平. 湿地系统上层 DO 水平高于底层,NH₄⁺-N 的氧化反应主要集中在上层,使得上层 pH 相应地降低了. 此外,植物的光合及根系呼吸作用等也会直接影响上层的 pH.

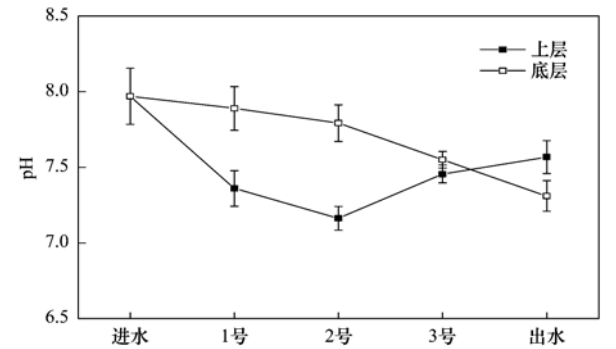


图 3 pH 的纵向及纵向变化

Fig. 3 Longitudinal and vertical variation of pH

湿地系统纵向上层温度总体略低于底层,这种差异在前半程表现尤为明显. 横向上湿地前半程的温度较后半程略高. 一方面,湿地基质本身具有一定的保温作用. 另一方面,湿地前半程作为有机质、氨氮降解的重要场所,好氧菌氧化有机质、氨氮等污染物时也释放出一定的热量,使得前端温度略高于后端.

2.2 湿地床体 COD 及氮磷净化效能的空间变化

COD 在湿地床体空间变化如图 4 所示. 从中可知,横向上 COD 浓度不断降低,床体前端下降较为明显,进水至 1 号断面,上层、底层去除率分别占总去除率的 80.96%、69.32%. 床体后端 COD 浓度下降较为平缓,去除率变化缓慢. 纵向上,上层 COD 浓度要低于底层,上层 COD 去除率是底层的 1.17 ~ 1.36 倍. 在人工湿地系统中 COD 主要依靠植物根系吸附吸收、基质拦截过滤及微生物分解转化而得以去除,其中微生物降解代谢是其最主要的去除

途径^[12]. 湿地床体中 COD 及 DO 前端高于后端、上层高于底层,因微生物活性高,新陈代谢作用旺盛,进而表现为 COD 去除效能前端优于后端,上层优于底层.

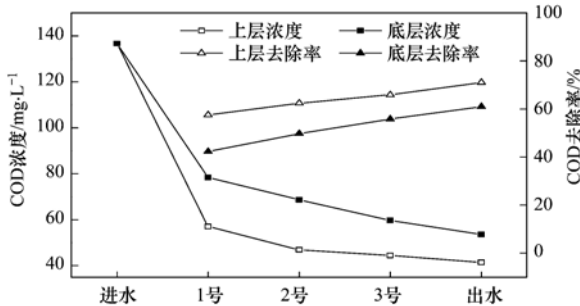


图 4 COD 浓度及去除率的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of the concentration and removal rates of COD

湿地床体内氮磷去除效能空间变化如图 5 所示. TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 浓度横向降低,进水至 1 号断面,上层、底层 TP 去除率分别占总去除率的 93.33%、94.25%;进水至 2 号断面,上层、底层 TN 去除率分别为总去除率的 81.33%、81.63%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为总去除率的 81.03%、48.65%. 磷的吸附在床体横向 1/4 处(1 号断面)即基本完成,大量研究表明^[12-15]人工湿地系统中磷的去除主要依赖于基质的物理、化学吸附沉淀,本湿地装置为新建,初期运行时基质吸附能力强,但随着运行时间的推移,前端基质吸附将趋于饱和,磷的去除场所也将会横向推移. 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 在床体前 1/2 段去除效率高,由图 5 可知,前半程上层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除负荷依次为 $0.320 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.348 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,分别占湿地系统总去除负荷的 81.01% 和 80.93%,可见氮素的有效去除主要发生在床体前半程,后半程去除作用较小. 分析原因可能是前端 DO 较高,微生物丰度及活性均高于后端,加之前端风车草长势明显优于后端春芋,进而前端微生物对氮素的转化及植物吸收作用均大于后端,湿地床体前端成为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除的主要场所.

纵向上,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 的去除上层优于底层,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 上层去除率分别为底层的 1.40~1.92、1.37~2.30、2.04~2.11 倍. 人工湿地系统内氮素的彻底去除主要依赖于硝化、反硝化作用,硝化作用是脱氮的限速步骤. 由 ORP 值的分布可见,除进水及 1 号上层 ORP > 100 mV,其余取样点 ORP 绝对值均 < 100 mV,表明湿地床体大部分

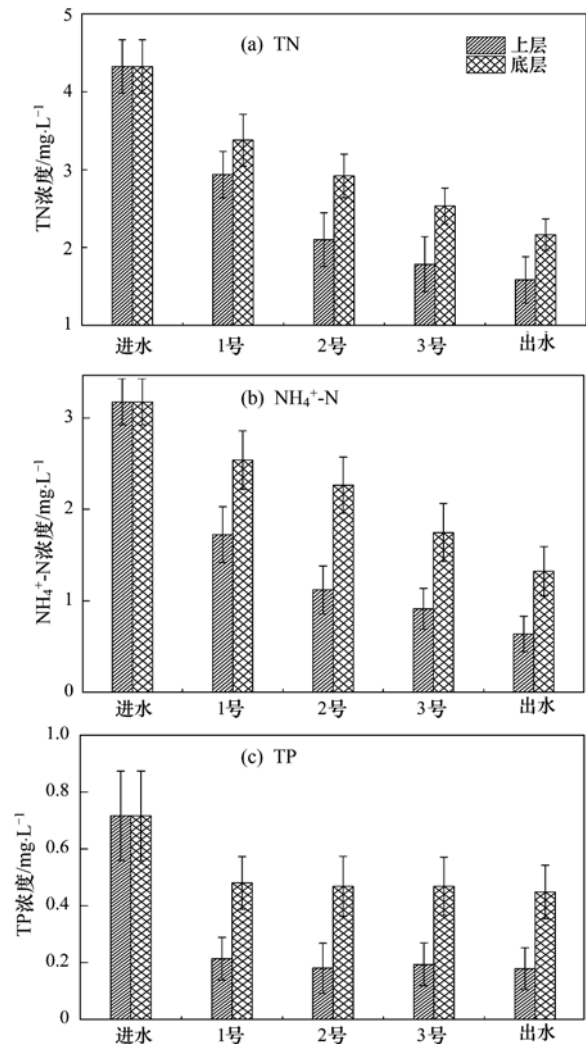


图 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 及 TP 浓度的空间变化

Fig. 5 Spatial variation of the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP

区域处于缺氧、厌氧状态^[16],硝化细菌的生长繁殖及硝化反应被抑制,反硝化潜力受限. 底层 ORP 在 $0 \sim -100 \text{ mV}$,更利于反硝化反应的进行,但实际上几乎所有微生物在好氧环境转为缺氧、厌氧环境后均可参与反硝化过程^[17],底层微生物量、活性均低于上层,进而反硝化强度弱于上层,上层对于氮素的去除占优势. 且进水至 2 号断面,上层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率占总去除率的 81.03%,而底层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仅占总去除率的 48.65%,由此可知上层、底层硝化反应并不同步. 由 pH 的横纵向分布可知,床体上层在 2 号断面处 pH 出现拐点,而底层 pH 在 2 号断面处才开始有比较明显的降低,这与氨氮净化效率的空间分布一致,由此可见将 pH 的拐点作为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 反应结束的指示指标是可行的. 对于 TP,上层基质粒径远小于底层($d_{\text{细砂}}: 2 \sim 3 \text{ mm}$, $d_{\text{碎石}}: 20 \sim 30 \text{ mm}$),较之于碎石层,细砂层更大的比表面积非常利于磷

素的吸附沉淀. 另一方面, 底层 ORP 较低 ($0 \sim -100$ mV), 低的 ORP 能抑制磷的沉淀-吸附反应^[18], 底层氧环境状态在一定程度上增加了磷的解吸释放^[14].

2.3 菲去除效能的空间变化及多酚氧化酶、硝酸盐还原酶活性

进水至 1 号断面, 上层、底层菲去除率分别达 91.44%、67.14%. 人工湿地系统内菲去除的主要机制仍依赖于基质吸附^[19], 菲的非生物损耗占菲总去除率的 83.4%^[20]. 实际上, PAHs 的大量去除主要依赖于表层基质的吸附 ($>95\%$)、拦截^[21, 22]. 本实验使用新建湿地装置, 初期运行阶段新鲜基质吸附能力强, 至 1 号断面处菲的吸附去除基本完成. 较之于 3 号断面, 出水浓度略有回升 (图 6), 表明在接近出口处菲有轻微的“释放”现象. 纵向上, 上层去除率略优于底层, 是底层的 1.07 ~ 1.36 倍. 一方面, 上层细砂粒径小, 比表面积大, 更利于菲的沉积、吸附. 另一方面, 本湿地床体内植物生长旺盛, 基质表面下 40 cm 处仍有大量根系存在, 根组织对菲的吸收、拦截作用一定程度上增加了菲的去除; 此外, 根系还能分泌与 PAHs 进行共代谢的化合物, 影响根际微生物群落的组成, 诱导 PAHs 降解酶的形成^[20], 进而促进 PAHs 的生物降解.

多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 是一种氧转移酶^[8, 23], 参与芳香族化合物的转化, 可通过沉淀或转化为其他产物来作用于某些特殊的难降解污染物. PAHs 及其降解产物可作为基质增强 PPO 活性, 在一定浓度范围内, 菲的浓度与 PPO 活性正相关^[24], 菲的存在促进了 PPO 活性增加. 由图 6 可知, 2 号取样点处 PPO 活性略有降低. 分析原因可能是 2 号取样点正好位于风车草、春芋的交汇区, 植物种类增加, 根系生物量增多, 因根区对酚类物质的大量吸附使得可直接利用的酚类物质减少, PPO 活性略有降低, 酚氧化酶活性与植物种类多样性极显著负相关^[25] ($P < 0.01$). 但总体上由于在湿地床体前 1/4 段, 菲经基质、根系的吸附拦截已基本完全去除, 流经 1、2、3 号处的水流中残余菲浓度变化不大, 故 PPO 活性前后差异不明显.

硝酸盐还原酶 (nitrate reductase, NR) 是反硝化过程的重要酶类, 是非增值的反硝化细菌活性的一部分, 参与反硝化反应的第一步, 催化 NO_3^- -N 还原为 NO_2^- -N^[26]. 为了便于考察硝酸盐还原酶活性, 将模拟进水中 NH_4Cl 浓度增至 $57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, NO_3^- -N 浓度及 NR 活性横向变化如图 7 所示. 处理水由 NH_4Cl 配

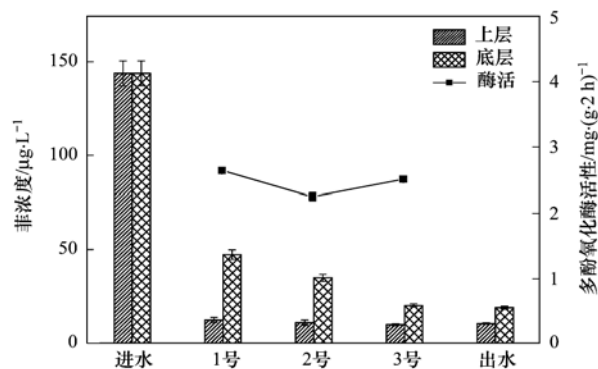


图 6 菲浓度的空间变化及多酚氧化酶活性

Fig. 6 Spatial variation of phenanthrene concentration and polyphenol oxidase activity

制, 进水中几乎检测不到 NO_3^- -N ($0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 床体后端 (2 号、3 号) 的去除负荷是前端 (1 号、2 号) 的 4.99 倍. NR 活性与 NO_3^- -N 浓度显著正相关 ($P < 0.01$). 本实验中取样点位于基质表面下 40 cm 处, 但 NR 活性仍较高. Li 等^[27] 的研究表明在潜流污水渗滤系统 (SWIS) 中纵向 0.3 ~ 0.7 m 区域内, 硝化反应强度最大. 本湿地床体中基质表面下 40 cm 深度处 NO_3^- -N 浓度仍较高, 可促进诱导硝酸盐还原酶的合成, NR 活性较高. 总体来说, 除 1 号取样点处 ORP 稍高外, 其余点位处 ORP 均小于 100 mV, 为缺氧环境, 在湿地缺氧、厌氧大环境下, NR 活性横向差异不明显, 表明在水平潜流系统缺氧、厌氧的大环境下硝化反应受抑, 反硝化反应潜力得不到发挥, 反硝化不是系统脱氮的限速步骤.

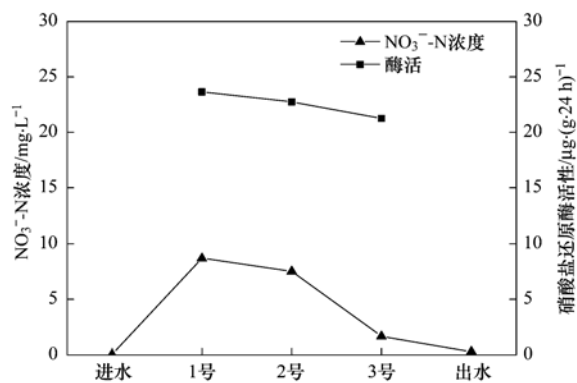


图 7 NO_3^- -N 浓度的横向变化及硝酸盐还原酶活性

Fig. 7 Horizontal variation of NO_3^- -N concentration and nitrate reductase activity

2.4 湿地床体对各指标的去除效能及横纵向比较

模拟净化实验中上层出水 NH_4^+ -N、TP 均能达《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类质量标准, 菲去除率达 92.83%, 但 COD 及 TN 净化效率总体不高 (上层出水 COD、TN 净化率分别为

71.05%、62.01%,见图8,这与模拟进水的低负荷有关,人工湿地处理微污染水体时,脱氮效率在40%以内仍是接受的^[28].此外,各指标的测定

均在停留时间1 d时进行,较短的停留时间内,COD、氮素等来不及被微生物分解代谢即被排出系统,去除效率总体不高.

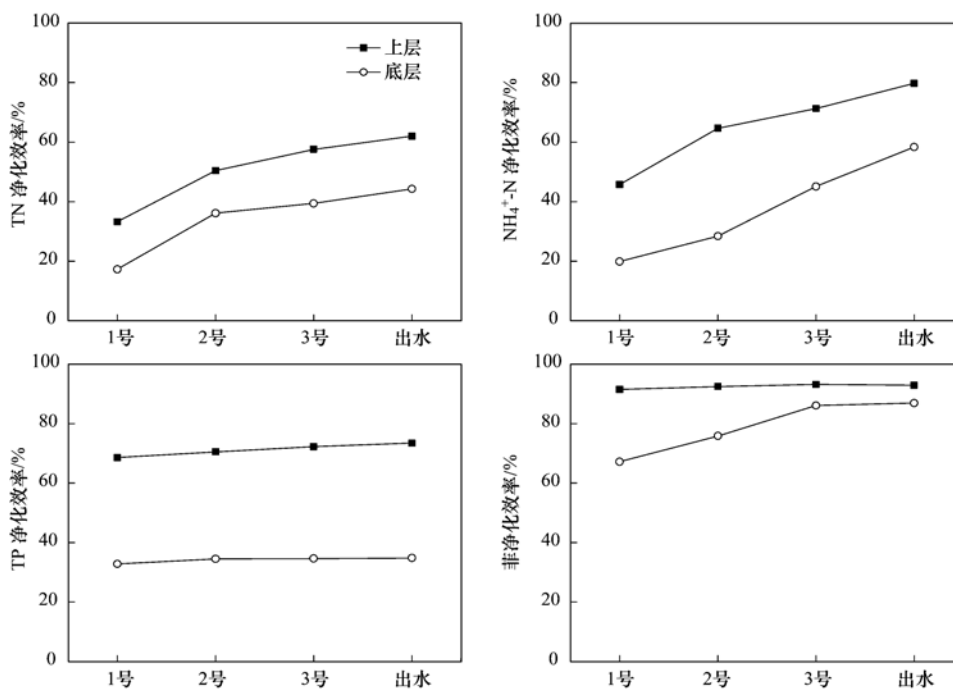


图8 各指标净化效能的空间变化

Fig. 8 Spatial variation of purification efficiency of each index

横向上,各指标的去除在床体前端即已完成,其中COD、TP及菲的去除在床体前端1/4处基本完成,氮素的去除主要发生在前端1/2处.床体后半程对各指标的去除作用不大,1号断面至出水处,净化效能的前后差异不明显.纵向上,各指标的净化效能上层均优于底层,其中COD、NH₄⁺-N、TN、TP及菲的去除率上层分别为底层的1.17~1.36、1.37~2.30、1.40~1.92、2.04~2.11、1.07~1.36倍.纵向上净化效能的差异强于横向.分析原因可能是系统理化性质的空间分布特征使得微生物群落结构差异纵向强于横向,纵向上微生物生物量及新陈代谢强度的差异更显著,进而各指标去除效能的差异纵向强于横向.表明床体设计的深度对于污染物净化效能的影响强于长度.因此,为得到更好的处理效果,保证适当的水位运行,并设出水口于床体的中上部是适宜的.

3 结论

(1)DO、ORP、pH及水温这4项理化指标均横向降低,纵向上DO、ORP上层显著高于底层.整个系统除1号上层,ORP均<100 mV,水平潜流系统大环境处于缺氧、厌氧状态.

(2)菲的吸附去除在床体前端1/4处基本完成,PPO活性在后3/4段差异不明显.NR活性与NO₃⁻-N浓度显著正相关,湿地缺氧、厌氧大环境下,NR活性横向差异不明显.水平潜流系统缺氧、厌氧的大环境使得硝化反应受抑,反硝化反应潜力得不到发挥,反硝化不是系统脱氮的限速步骤.

(3)各指标的去除主要在床体前端完成,后半程去除作用较小,纵向上各指标的去除效能上层均优于底层.净化效能的差异纵向强于横向,床体设计的深度对于污染物去除效能的影响强于床体长度.

参考文献:

- [1] 何丽君, 马邕文, 万金泉, 等. 新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 817-824.
- [2] Terzakis S, Fountoulakis M S, Georgaki I, et al. Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region[J]. Chemosphere, 2008, 72(2): 141-149.
- [3] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 253-256.
- [4] Steer D, Fraser L, Boddy J, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(4): 429-440.
- [5] Prochaska C A, Zouboulis A I. Treatment performance variation at different depths within vertical subsurface-flow experimental

- wetlands fed with simulated domestic sewage[J]. *Desalination*, 2009, **237**(1-3): 367-377.
- [6] 刘树元, 阎百兴, 王莉霞. 潜流人工湿地中氮磷污染物净化的分层效应研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 723-728.
- [7] 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.
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [9] 付玉玲. 水平潜流人工湿地根际微生物多样性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [10] Yao F, Shen G X, Li X L, *et al.* A comparative study on the potential of oxygen release by roots of selected wetland plants[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, **36**(9-11): 475-478.
- [11] 孙洪伟, 王淑莹, 张树军, 等. 高氮渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 129-133.
- [12] 黄德锋. 人工湿地净化富营养化景观水的效果及机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [13] 肖海文. 城市径流特征与人工湿地处理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [14] Zhao Y J, Zhang H, Xu C, *et al.* Efficiency of two-stage combinations of subsurface vertical down-flow and up-flow constructed wetland systems for treating variation in influent C/N ratios of domestic wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(10): 1546-1554.
- [15] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [16] Ong S A, Uchiyama K, Inadama D, *et al.* Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 696-703.
- [17] 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.
- [18] Yates C R, Prasher S O. Phosphorus reduction from agricultural runoff in a pilot-scale surface-flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(12): 1693-1701.
- [19] Fountoulakis M S, Terzakis S, Kalogerakis N, *et al.* Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and linear alkylbenzene sulfonates from domestic wastewater in pilot constructed wetlands and a gravel filter[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(12): 1702-1709.
- [20] Sun T R, Cang L, Wang Q Y, *et al.* Roles of abiotic losses, microbes, plant roots, and root exudates on phytoremediation of PAHs in a barren soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 919-925.
- [21] Diblasi C J, Li H, Davis A P, *et al.* Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(2): 494-502.
- [22] Cottin N, Merlin G. Removal of PAHs from laboratory columns simulating the humus upper layer of vertical flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(5): 711-716.
- [23] Sun M M, Luo Y M, Christie P, *et al.* Methyl- β -cyclodextrin enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and associated microbial activity in contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(5): 926-933.
- [24] Zhan X H, Wu W Z, Zhou L X, *et al.* Interactive effect of dissolved organic matter and phenanthrene on soil enzymatic activities[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(4): 607-614.
- [25] Zhang C B, Wang J, Liu W L, *et al.* Effects of plant diversity on nutrient retention and enzyme activities in a full-scale constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(6): 1686-1692.
- [26] García-Lledó A, Vilar-Sanz A, Trias R, *et al.* Genetic potential for N₂O emissions from the sediment of a free water surface constructed wetland[J]. *Water Research*, 2011, **45**(17): 5621-5632.
- [27] Li Y H, Li H B, Wang X, *et al.* Changes in microbial populations and enzyme activities during nitrogen biodegradation of domestic sewage treatment in the subsurface wastewater infiltration system (SWIS)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(4): 431-435.
- [28] 杨新萍, 周立祥, 戴媛媛, 等. 潜流人工湿地处理微污染河道水中有有机物和氮的净化效率及沿程变化[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2177-2182.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 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

国内外公开发刊