

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,万金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,万金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究

何丽君¹, 马邕文^{1,2*}, 万金泉^{1,2}, 李东亚¹, 王艳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. 制浆造纸工程国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 根据东莞市同沙水库集水区工业区内降雨径流的水质、水量特征, 采用新型折流式人工湿地对其进行模拟及实地降雨径流净化研究. 对人工湿地不同运行阶段模拟降雨径流的净化效果进行对比, 分析 COD、SS、TN、TP、 NH_4^+-N 以及重金属 Pb、Zn、Cu 在湿地系统中的沿程变化, 探讨它们的主要去除机制. 模拟净化研究中, 除 TN 外, 湿地系统出水各污染物均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ类质量标准, TN 达Ⅳ类标准; 且大部分污染物在湿地前端被去除. 实地降雨径流净化研究中, COD、SS、TN、TP 及 NH_4^+-N 的平均去除率分别为 90.9%、97.0%、83.4%、92.2%、90.0%; 重金属 Pb、Zn、Cu 的平均去除率分别为 98.4%、94.1%、93.6%, 出水均能达地表Ⅲ类水标准. 研究表明, 折流式人工湿地系统对工业区降雨径流的净化效果显著, 湿地系统具有较强抗冲击负荷能力. 另外, 小幅温度变化对湿地系统中污染物的去除影响不大.

关键词: 人工湿地; 工业区; 降雨径流; 污染负荷; 重金属; 净化效果

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0817-08

Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland

HE Li-jun¹, MA Yong-wen^{1,2}, WAN Jin-quan^{1,2}, LI Dong-ya¹, WANG Yan¹

(1. The 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, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to water characteristics of industrial rain runoff in a catchment of Tongsha reservoir, Dongguan city, an improved baffled constructed wetland (BCW) was used for purification experiment study of simulated and on-the-spot rain runoff. The purification effects of simulated rain runoff were compared in different operated phases of BCW. Meanwhile, the variation of the pollutants (COD, SS, TN, TP, NH_4^+-N , Pb, Zn, Cu) along the BCW and their removal mechanism were analyzed and discussed, respectively. In the simulated experiment, the effluent water quality of BCW system met the needs of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002) Ⅲ, besides TN met Ⅳ, and most of the pollutants were removed in the front of the BCW. In the purification study of on-the-spot rain runoff, removal rate of COD, SS, TN, TP and NH_4^+-N were 90.9%, 97.0%, 83.4%, 92.2% and 90.0%, respectively; removal rate of Pb, Zn and Cu were 98.4%, 94.1% and 93.6%, respectively. The effluent met the grade Ⅲ. Results showed that there was remarkable treatment performance of industrial catchment rain runoff when BCW system was used, which also can withstand strong shock load. Moreover, a modest variation of temperature affected the removal of pollutants in the BCW insignificantly.

Key words: constructed wetland; industrial catchment; rain runoff; pollution load; heavy metal; purification effects

随着城市大气污染及地面污染的加剧, 降雨径流污染愈加严重, 尤其是污染物浓度较高的初期雨水及溢流雨污水. 2006 年, 东莞市将同沙水库列为东莞市备用饮用水源地之一, 其水体水质功能的管理目标为地表水 Ⅲ类水质. 但由于东莞市同沙水库集水区包含工业区, 其固有的工业生产模式导致工业区降雨径流中的铜、铅、锌等重金属严重超标; 且监测结果还显示, 其余监测指标均劣于地表水 V 类水质, 水体“富营养化”程度非常明显, 故改善水质的需求愈加迫切.

人工湿地作为一种新的生态处理技术源于德国^[1], 应用于污废水的深度脱氮除磷处理领域中,

具有运行费用低、污染物净化效果好、生态环境效益显著等优点^[2,3], 故人工湿地污水处理技术适合中国等发展中国家的基本国情^[4]. 近年来, 人工湿地技术在欧美及世界各国迅速发展^[5,6], 早期主要用于处理生活污水或二级污水厂出水, 目前则主要用于农业面源污染、城市雨水径流等非点源污染的治理等. 而我国直到“七五”期间才开始较大规模地研

收稿日期: 2011-05-04; 修订日期: 2011-07-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07211-006)

作者简介: 何丽君 (1987 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为人工湿地技术, E-mail: hhljj-1017@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ppywma@scut.edu.cn

究人工湿地, 20 世纪 90 年代中期起才逐渐重视雨水径流的控制与利用, 且目前国内鲜见有关人工湿地净化工业区雨水径流的研究.

工业区雨水径流有其独特的水质特征, 水质受工厂作业强度、气候、干雨期长度、降雨事件强度及降雨持续时间的影响, 以 COD、SS 及重金属等污染物为主, 另包括 TN、TP、氨氮等其他污染物. 根据水质特征, 采用新型折流式人工湿地, 进行模拟工业区降雨径流及实地径流净化研究, 考察污染物在湿地中的沿程变化, 并探讨气候条件及人工湿地运行不同阶段对净化效果的影响, 以期为人造湿地广泛应用于工业区雨水径流处理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为长方体湿地床(见图 1), 用 10 mm 厚有机玻璃建成, 长 × 宽 × 高 = 1.6 m × 1.5 m × 0.8 m, 坡度为 1%, 设有导流墙将湿地床体分成 4 个串联的单元床(0.4 m × 1.5 m × 0.8 m), 导流墙上设置过水孔, 第 1、3 格单元床呈下行流, 2、4 呈上行流, 相邻导流墙过水孔呈上下对角线, 以实现水流的曲折性, 增加污水与湿地的接触, 提高湿地的利用率. 在各单元床出水口采集水样并监测分析, 考察水体中各污染物在湿地床中的空间分布规律, 并探讨其去除机制.

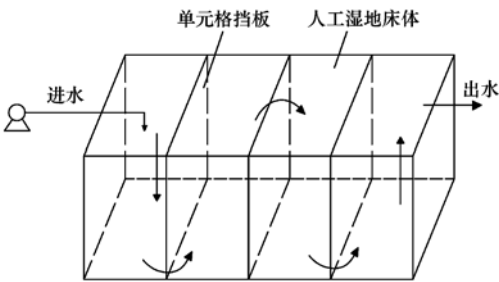


图 1 人工湿地构造及水流流向示意

Fig. 1 Structure and flow diagram of constructed wetland

人工湿地填料选用碎石、高炉渣、石灰石细砂及土壤, 由下往上依次为: 碎石 15 cm($d: 20 \sim 30$ mm), 高炉渣与石灰石混合物 20 cm($d: 10 \sim 20$ mm), 细砂 5 cm, 土壤 10 cm. 湿地植物选择华南地区常见的风

车草 (*Cyperus alternifolius*)、春 芋 (*Philodendron deliciosa*)、香 蒲 (*Typha latifolia*) 及 菖 蒲 (*Acorus calamus*) 等, 种植密度 10 株 · m⁻². 湿地正常运行时水位高度 60 cm.

1.2 人工湿地的运行

根据东莞市同沙水库集雨区工业区降雨径流的水质监测结果, 首先进行人工模拟雨水径流实验研究, 再以收集的工业区降雨径流作为人工湿地进水进行实验研究. 人工湿地连续进水, 定期放空, 水力停留时间(HRT)约 3 d, 取样间隔 2 ~ 3 d, 于每单元格进出口处采样. 实验时间为 2010 年 3 ~ 12 月, 气温 10 ~ 32℃.

人工模拟实验持续时间约 7 个月, 模拟现场监测的径流水质. 降雨过程中径流水质随时间呈规律性变化, 故模拟水质也有相应波动. 于天然水体中添加葡萄糖、KH₂PO₄、NH₄Cl、KNO₃、Pb(NO₃)₂、ZnSO₄、CuSO₄ 及其他小量、微量元素等配制成近似于工业区雨水径流的人工污水, pH 近中性. COD、TN、TP 面积负荷分别为 14.58、0.61、0.22 g · (d · m²)⁻¹.

人工湿地净化工业区降雨径流实验研究共约 1.5 个月, 湿地用水为同沙水库集水区工业区各主要出口所收集的降雨径流, 各出口同时段降雨径流混合后经保存处理及时用完.

实际 HRT 的确定采用刺激-响应法^[7], 于实验初期及后期测定人工湿地 HRT. 实际雨水径流具有短时流量大的特点, 不同于人工模拟实验中恒定流速供水模式, 故于净化研究实验同时进行了人工湿地的冲击负荷实验研究, 水力停留时间 26 h, 每 2 h 对进、出水水样监测一次. 其结果为强烈的冲刷作用引起磷的去除率下降, 一般 20 h 后湿地即可消除冲击负荷对系统产生的影响; COD 及 TN 出水浓度变化不大.

1.3 进水水质

工业区雨水径流中 COD、SS 及 TP 等浓度类似于典型生活污水的污染物浓度, 重金属 Pb、Zn、Cu 浓度均高于文献[8]中的限值. 实验进水各指标水质如表 1.

表 1 人工湿地进水水质/mg · L⁻¹

Table 1 Influent quality of the constructed wetland/mg · L⁻¹

实验进水	COD	SS	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	Pb	Zn	Cu
模拟进水	82.24 ~ 198.80	154.78 ~ 321.09	4.36 ~ 7.84	0.36 ~ 3.10	2.70 ~ 6.53	—	—	—
实地径流	148.38 ~ 184.33	137.66 ~ 289.13	3.7 ~ 6.35	0.58 ~ 2.35	3.01 ~ 4.68	0.31 ~ 0.95	2.81 ~ 3.58	2.1 ~ 5.4

1.4 分析方法

监测指标有 COD、SS、TN、TP、 NH_4^+ -N 等, 根据文献[9]中的标准方法进行分析测定; 重金属 Pb 采用石墨炉原子吸收法, Zn、Cu 采用 ICP-AES 法测定; 温度、pH、ORP 等采用原位测定法, 温度采用玻璃温度计测定, pH 及 ORP 用 pH-3C 酸度计测定。

1.5 实验仪器

XJ-III 消解装置; GI54DW 立式自动压力蒸汽灭菌器; WFZ UV-2000 紫外可见分光光度计; DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱; CAAM-2001A 型多功能原子吸收光谱仪; JY-238 电感耦合等离子光谱仪; 玻璃温度计; pH-3C 酸度计等。

2 结果与讨论

2.1 人工湿地系统对工业区降雨径流的模拟净化

2.1.1 COD 的去除行为

人工湿地中 COD 的去除机制主要有: 截留、过滤、微生物的新陈代谢^[10]及植物的吸收。其中微生物的降解是有机物去除的主要途径^[11], 植物对有机物的吸收相对较小, 但植物对有机物的去除有促进作用: 植物庞大的根系为微生物膜提供附着场所, 且输送氧气至湿地床体内^[12]。

人工湿地平均去除率分别为: 82.0% (3 月, 平均温度 17.9℃)、90.7% (7 月, 28.6℃)、86.6% (11 月, 19.6℃) 以及 89.8% (12 月, 16.5℃); COD 去除负荷分别为 13.57、14.51、11.36 及 11.50 $\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 远大于项学敏等^[10]所报道的 5 $\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 。

图 2 为 2010 年 3 ~ 12 月人工湿地中 COD 的去除率和进出水浓度, 从中可知, 去除率与进水浓度变化总趋势基本相同。3 月, 由于人工湿地系统处于初期运行阶段, 植物生长初期, 系统内微生物种类、数量及活性水平均未达理想状态, 故出水 COD 较高, 平均 28.99 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率相对标准偏差 (RSD) 5.3%。随着进水浓度的增加, 去除率小范围波动, 但总趋势上升。7 月, 去除率在 88.4% ~ 92.9% 之间, RSD 为 2.1%, 11 月 COD 去除率 RSD 为 1.7%, 可认为湿地系统已达到稳定状态。另 7 月平均气温数全年最高, 植物生长率大, 根系发达, 微生物活性增强, 数量增多, 使得湿地床体对 COD 的截留、过滤作用及生物吸收作用增强, 故出水 COD 较低, 平均 15.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。11 月, 平均去除率较 7 月下降 4.1%, 出水平均值 17.66 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 略高于 7 月平均值。12 月, 平均去除率与 7 月持平, 出水平均浓度

12.33 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为以上四监测阶段最优。由此可推断: ①温度差值较大 (7 月 > 11 月), COD 去除率随温度升高而小幅增加; ②一定浓度范围内, 去除率随进水浓度 (7 月: 160.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 11 月: 131.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 增大而略增加; ③超出②所述的浓度范围, 去除率将随进水浓度的增加而减小, 而高温优势 (7 月 > 12 月) 可在某种程度上抵消去除率的降低。

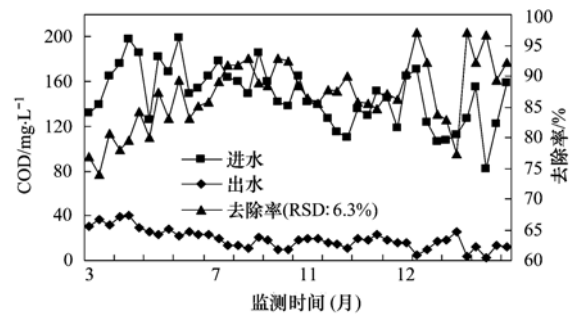


图 2 COD 去除率及进/出水浓度

Fig. 2 Removal rates and influent/effluent concentration of COD

人工湿地稳定运行后, COD 在 16.5 ~ 28.6℃ 的平均温度下, 出水均能达《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类质量标准。

2.1.2 TN、 NH_4^+ -N 的去除行为

人工湿地中, 氮主要经微生物的氨化、硝化及反硝化, 植物的吸收与挥发, 基质的吸附、过滤与沉淀等作用去除^[15]。微生物作用是氮的主要去除途径, 使污水中各种价态的氮最终转变为氮气, 从而达到脱氮目的, 其基本条件是系统中具有大量氨化菌、硝化菌、反硝化菌和适宜的土壤环境^[13]。植物根系能输氧及释氧, 使湿地床内存在大量好氧、缺氧和厌氧区, 相当于许多串联或并联的 A²/O 小单元, 硝化和反硝化作用得以同时发生, 提高氮去除速率。当 pH > 8.5 时, 氮会以 NH_3 的形态挥发, 本研究中, 监测湿地系统各进出水口 pH 均小于 8, 可忽略此作用。

氮在废水中主要以有机氮、氨态氮、硝态氮及亚硝态氮形态存在, 只要系统内存在氨化菌、硝化菌和反硝化菌, 以上各形态氮就会发生转化。

TN、 NH_4^+ -N 去除率及进出水浓度分别如图 3、图 4 所示。人工湿地运行初期 (3 月), TN 去除率逐渐增大, 整月平均进水浓度 5.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率 71.3%, 出水浓度 1.51 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 7、11、12 月平均进水分别为 6.90、5.75、6.25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 87.2%、84.9%、83.1%, 出水分别为 0.88、0.87、1.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 月 TN 去除率最低, 其一是由

于运行初期,湿地系统内相应微生物群还未适应系统内部微环境,活性水平较低,不能完全参与到氮的转化过程中;其二是温度较低,会抑制厌氧微生物基质酶的活性,如抑制反硝化菌的生长,抑制反硝化过程从而减小氮的去除率.7月与11月、12月相比,去除率稍高,出水浓度较低,这是由7月进水浓度高、脱除负荷高[7、11、12月分别为 0.61 、 0.49 、 $0.52 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$],气温升高使得植物与微生物的协同作用加强等综合因素所导致的.从图3可知,湿地稳定运行后,去除率与进水浓度变化趋势一致,且在7月有个持久的进水浓度、去除率高峰.

人工湿地稳定运行后, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均去除率约85%,出水水质稳定,均不超过 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱除负荷 $0.35 \sim 0.47 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$.12月前,去除率与进水浓度变化趋势一致,但12月进水浓度升高,去除率保持平稳不再增加,有两方面原因,其一是由于温度降低使得湿地生物活动减弱从而导致硝化作用减弱,其二是湿地系统对氨氮负荷有一承受限值.在寒冷地区可以通过必要的湿地床体保温措施来减弱这种限制.

TN、氨氮平均进水浓度(3月除外)分别为 $6.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $4.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水分别为 $0.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进、出水氨氮占TN分别为76%、74%.陈秀容等^[14]提出,人工湿地进水氮主要形态为氨氮时,氨氮在人工湿地中主要去除途径为植物吸收、吸附和硝化、氨化.钟成华等^[15]认为这是由于系统中厌氧主导,不能提供良好的硝化环境,不能产生大量反硝化作用底物——亚硝酸盐和硝酸盐,从而抑制反硝化作用.由进出水氨氮/TN值可知,人工湿地复氧能力欠佳,湿地系统中氨化作用及硝化作用较弱,从而反硝化过程受阻,导致TN出水浓度较高.TN出水能达到或接近地表Ⅲ类水标准,氨氮出水则优于地表Ⅲ类水标准.

2.1.3 TP的去除行为

人工湿地去除TP的主要途径是微生物的吸收,植物的吸收,基质的吸附和络合,及与基质的沉淀反应等^[16].某些高效除磷菌在有氧且碳源充足的环境中能超量摄取磷;植物根主要吸收可溶性磷酸盐(HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^-)并同化为植物的有机成分(如磷脂、ATP、DNA等);不溶性磷酸盐在物理作用下可沉积于湿地内部.

基质对磷的吸附沉淀是主要除磷机制之一,其过程受湿地内ORP、pH值、Al、Fe、Ca和基质磷本底值等因素的影响,而本实验人工湿地内pH近于中

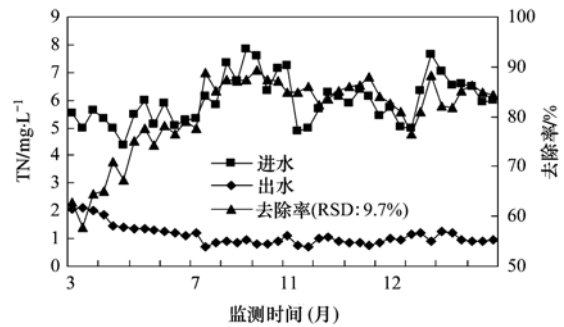


图3 TN去除率及进/出水浓度

Fig. 3 Removal rates and influent/effluent concentration of TN

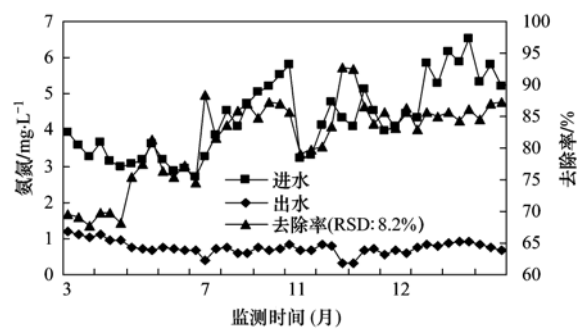


图4 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率及进/出水浓度

Fig. 4 Removal rates and influent/effluent concentration of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$

性,又选用Ca、Fe较高的石灰石和高炉渣作为湿地基质填料,使磷以不溶性Ca-P、Fe-P沉淀为主^[17,18];当吸附位点饱和后,吸附作用将停止甚至在来水浓度较低时基质会释放磷,基质在某种程度上相当于一个“磷缓冲容器”以调节水中的磷浓度^[19].

TP去除率及进出水浓度如图5所示.3月,湿地运行初期,TP去除率在58%~83%之间,去除率波动较大,出水浓度低于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达地表Ⅲ类水标准,其原因一方面进水浓度较低(平均 $0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),另一方面是基质吸附能力还很强.7月、11月和12月的TP平均进水浓度分别 2.54 、 1.87 和 $2.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水均低于 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率稳定,均90%以上,脱除负荷分别为 0.24 、 0.18 和 $0.21 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$.11月进水浓度较低,脱除负荷也对应较低;12月温度比7月低,在进水浓度相近时,其出水浓度、去除率和脱除负荷与7月几乎持平,则本实验条件下,TP的去除受温度影响较小.

对于监测期间获得稳定的高去除率,主要为湿地基质如石灰石和高炉渣具有较高的吸附沉淀能力^[20],另外植物根系输氧和水面复氧使湿地系统中存在好氧、厌氧交替的微环境,为微生物过量积累

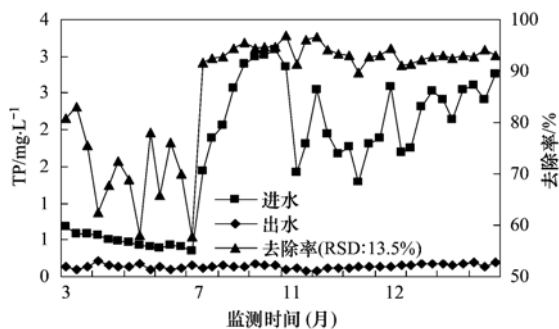


图5 TP去除率及进/出水浓度

Fig. 5 Removal rates and influent/effluent concentration of TP

磷^[21]提供可能。

2.1.4 SS 的去除行为

SS 在人工系统中主要靠植物根茎拦截、湿地动物摄食、微生物降解和基质过滤等途径被去除。基质去除 SS 的机制有: 废水中 SS 向基质表面的迁移机制和土壤颗粒表面的黏附机制。图 6 为 7 月所监测到的 SS 去除效果及进出水浓度。

由图 6 可看出, 进水 SS 浓度在 154.78 ~ 321.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水 SS 浓度 $< 9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 97.2%。由于湿地基质和植物根系构成了过滤层, 使湿地系统保持了较高的 SS 去除率和较好的出水浓度。

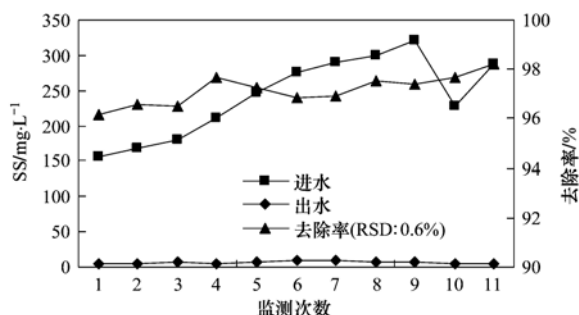


图6 SS去除率及进/出水浓度

Fig. 6 Removal rates and influent/effluent concentration of SS

另外, 监测期间, 尽管 SS 进水浓度变化跨度较大, 但其去除效果稳定, 去除率稳定在 96% ~ 98% 之间, 这表明人工湿地对 SS 有较强的抗冲击能力。

SS 的去除率还关系到有机物及氮、磷的去除, 因为进水中会有部分有机物及氮、磷黏附在 SS 表面, 且随 SS 被过滤、拦截等作用而被截留于湿地系统中, 最终被微生物或植物等所利用而去除。

2.2 人工湿地系统对工业区降雨径流的净化行为及各污染物的沿程变化

2.2.1 人工湿地对工业区降雨径流污染物的去除行为

人工湿地模拟净化实验中, 各污染物得到有效的去除。为进一步研究人工湿地对工业区降雨径流的净化效能, 以及验证模拟净化实验的准确性, 于 2010 年 9 月收集东莞市同沙水库集水区工业区降雨径流作为人工湿地进水, 观察人工湿地进、出水中各污染物浓度变化及去除率, 分析实验结果, 并与模拟净化实验进行比较。

工业区降雨径流各污染物在人工湿地中的进、出水浓度及去除率如图 7。

由图 7 可看出, COD 去除率较稳定, 保持在 90% 左右, 出水浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 脱除负荷为 $15.0 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 比 7 月的模拟实验稍高; TN 进水浓度变化较大, 在 $3.70 \sim 6.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水基本都低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率保持在 81% 以上, 脱除负荷为 $0.48 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 比 7 月的 $0.62 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 低; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在 88% ~ 94% 之间, 平均出水浓度 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 脱除负荷为 $0.38 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 跟 7 月相近; TP 去除率随进水浓度 ($0.58 \sim 2.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 增大而升高, 最终稳定在 92% 左右, 出水浓度 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 脱除负荷 $0.15 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 低于 7 月的 $0.24 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; SS 去除率与进水浓度变化趋势一致, 但一直保持较高的去除率 (96% ~ 97%), 出水浓度均在 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

工业区降雨径流还包括特有的污染物——重金属, 根据已监测到的工业区降雨径流水质情况, 本实验着重考察 Pb、Zn、Cu 这 3 种重金属在人工湿地中的去除行为。

重金属的主要去除机制有植物吸收和微生物富集作用、基质的吸附沉淀及金属离子与 S^{2-} 形成硫化物沉淀^[22]等。植物对重金属的吸收以被动吸收为主, 其巨大的体表面积有利于重金属的附着、吸收、积累及降解等作用。Cheng 等^[23]曾报道风车草能吸收富集水体中 30% 的铜, 对锌、铅的富集也在 5% ~ 15%。微生物能吸附重金属离子到细胞内, 而某些细菌能释放蛋白质而使可溶性重金属离子沉淀, 且在厌氧条件下, 硫酸盐还原菌将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 而与重金属反应生成溶解度低的金属硫化物沉淀。重金属的最主要去除方式是和基质发生吸附及一系列化学反应, 一般不能与基质发生化学反应形成沉淀, 但可络合而转化为低毒状态。

由图 7 可知, 降雨径流经过人工湿地后, 这 3 种重金属均能被有效去除, 去除率均在 90% 以上。Pb 进水浓度在 $0.31 \sim 0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水浓度 $\leq$

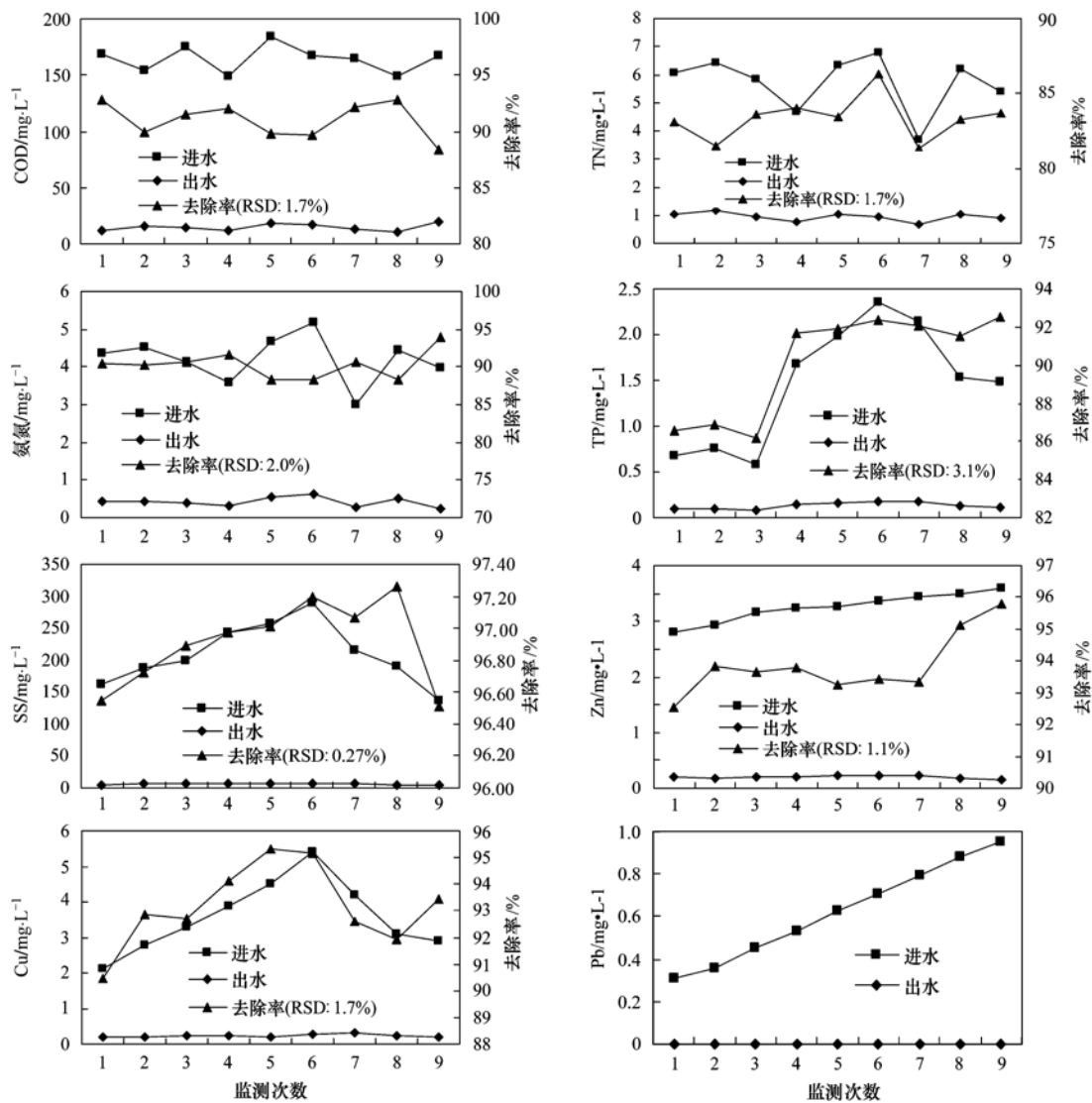


图7 工业区降雨径流污染物的去除率及进/出水浓度

Fig. 7 Removal rates and influent/effluent concentration of contaminants in industrial park rain run-off

$0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率 $> 98\%$; Zn 进水浓度 $2.81 \sim 3.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水浓度 $\leq 0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率 $> 92\%$; Cu 进水浓度 $2.1 \sim 5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\leq 0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率 90% 以上. 工业区降雨径流 Pb、Zn、Cu 平均浓度分别超出《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准 11.4 、 2.25 、 2.58 倍, 经人工湿地净化后, 出水水质均优于Ⅲ类标准.

与已有的人工湿地处理含重金属污废水的研究相比, Mungur 等^[24]进行了小试规模的人工湿地去除暴雨径流中重金属的研究, 结果表明: 当进水中的 Pb、Zn、Cu 浓度在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时, 该人工湿地能截留 99% 的重金属; 另广东韶关市凡口铅锌采矿废水经湿地系统处理后, Pb、

Zn、Cu 的去除率均在 92% 以上. 由此可看出, 人工湿地作为一种生态处理系统对重金属的净化具有一定优势.

COD、TN 等在人工湿地中也得到了有效的净化, 出水平均浓度均能达地表Ⅲ类水标准. 其中, TN、TP 脱除负荷与模拟净化实验相比有所降低, 这可能是由于重金属对湿地系统中 TN、TP 的去除有一定的负面影响. Lim 等^[25]的研究表明, 重金属由于络合作用和螯合作用, 大多数被基质和植物根茎所固定, 少量留存于液相中, 正是留存于液相中的溶解态重金属抑制了脱氮途径之一——硝化作用, 且重金属对植物摄取氮也有一定抑制作用. 至于 TP, 因为基质吸附沉淀是其主要去除基质, 而重金属主

要去除机制之一也是与基质发生吸附及一系列化学反应,而基质表面的吸附位有限,故重金属的存在可能会抑制 TP 的去除.

2.2.2 工业区降雨径流各污染物在人工湿地中的沿程变化

实验所采用的折流式人工湿地,含 4 个单元格,水流形态第 1、3 格呈下行流,第 2、4 格为上行流.各污染物在人工湿地中的沿程变化能进一步深化各污染物的去除机制.工业区降雨径流各污染物在人工湿地中的沿程变化如表 2.

表 2 污染物在人工湿地中的沿程变化¹⁾

Table 2 Variation of contaminants along the constructed wetlands flow						
指标	进水 /mg·L ⁻¹	第一单元格 /mg·L ⁻¹	第二单元格 /mg·L ⁻¹	第三单元格 /mg·L ⁻¹	第四单元格 /mg·L ⁻¹	总去除率 /%
COD	148.38~184.33(164.35)	60.83~88.64(72.53)	34.20~53.28(48.27)	20.50~30.15(26.18)	10.8~19.45(14.83)	
COD 去除率/%		55.8	14.8	13.4	6.9	90.9
TN	3.7~6.35(5.72)	2.25~4.46(3.16)	1.94~3.43(2.61)	1.32~1.85(1.48)	0.69~1.19(0.95)	
TN 去除率/%		44.7	9.6	19.8	9.3	83.4
NH ₄ ⁺ -N	3.01~4.68(4.21)	1.85~2.86(2.47)	1.26~1.89(1.62)	0.52~1.00(0.71)	0.24~0.61(0.42)	
NH ₄ ⁺ -N 去除率/%		41.3	20.2	21.6	6.9	90.0
TP	0.58~2.35(1.66)	0.39~0.61(0.56)	0.26~0.44(0.38)	0.12~0.28(0.16)	0.08~0.18(0.13)	
TP 去除率/%		66.3	10.8	13.2	1.8	92.2
SS	137.66~289.13(209.00)	20.20~31.80(26.36)	5.71~8.50(7.48)	5.15~7.80(7.01)	5.20~7.70(6.38)	
SS 去除率/%		87.4	9.0	0.2	0.3	97.0
Pb	0.31~0.95(0.62)	0.14~0.37(0.20)	0.06~0.12(0.10)	0.02~0.04(0.03)	≤0.01	
Pb 去除率/%		67.7	16.1	11.3	≥3.23	≥8.4
Zn	2.81~3.58(3.25)	1.48~2.46(1.85)	0.88~1.63(1.13)	0.21~0.66(0.31)	0.15~0.23(0.19)	
Zn 去除率/%		43.1	22.1	25.2	3.69	94.1
Cu	2.1~5.4(3.58)	1.25~3.11(1.82)	0.34~1.26(0.64)	0.24~0.81(0.38)	0.19~0.31(0.23)	
Cu 去除率/%		49.16	33.0	7.3	4.2	93.6

1) 括号内是平均浓度值

由污染物沿程变化情况看,各污染物都主要在第 1 格被去除,其中,COD、TP、SS 及 Pb 均有一半以上的去除率发生在第 1 格.

随着 COD 沿程进水浓度及污染物负荷减小,其去除率逐渐下降.首先,第 1 格基质及植物根系的过滤和截留作用能有效地去除大量 COD;其次,第 1 格进水浓度较高,而去除率在一定进水浓度限值内,与其正相关;再者,进水夹带氧气,使得第 1 格内微生物活性水平较高,好氧、厌氧区分层明显,有利于 COD 及 TN、TP 等营养物质的被吸收.此外,沿程相邻两格进水浓度差值逐渐减小,去除率的差异也逐渐缩小,表明随着污染物负荷的减小,其对去除率的影响减弱.

水流状态为下行流的第 1、3 格 TN、氨氮去除率较大,是由于随着水流的下渗,水面复氧加剧,使单元格内同时存在明显的好氧、厌氧区域,使得硝化、反硝化过程能同时、快速地进行,从而加大了氮的去除力度.而反硝化过程亦会由于有机碳源的不足而受限.故在保证 DO 及碳源供给的情况下,湿地系统沿程能有效发挥脱氮作用.

TP 在第 1 格中的去除率达 66.3%,与后续 3 格差异较大,沿程趋势减弱.这是由于湿地系统运行不

到一年时间,基质吸附未达到饱和状态,故在第 1 格就取得较大去除率.随着 TP 浓度迅速降低,其后续进水中 TP 浓度及污染负荷较低,故去除率也迅速降低.SS 也是在湿地系统的前端就得到了有效的去除,在最后两格中几乎没有去除行为.

重金属 Pb、Zn、Cu 在湿地系统中的去除率趋势沿程减小,第 1 格去除率最大.重金属的主要去除方式有与基质发生吸附等,而且在第 1 格即能取得较大的去除率,表明湿地系统具有较大的重金属去除能力.

3 结论

(1)工业区雨水径流净化实验取得较高的污染物去除效果,COD、SS、TN、氨氮及 TP 去除率分别为 90.9%、97.0%、83.4%、90%、92.2%;Pb、Zn、Cu 去除率分别为 98.4%、94.1%、93.6%.平均出水浓度均达地表Ⅲ类水标准.

(2)人工湿地稳定运行后,各污染物去除率有不同程度升高,且出水水质稳定;沿程污染物浓度逐渐降低,大部分污染物在湿地前端被去除.

(3)小幅温度变化对湿地系统中污染物的去除影响不大,且湿地系统对污染物浓度有较强的抗冲

击能力。

(4) 湿地系统能去除工业区雨水径流中 90% 以上的 Pb、Zn、Cu。

参考文献:

- [1] International Water Association. Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation [M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [2] 胡康萍, 许振成, 朱彤, 等. 人工湿地污水处理系统初步研究[J]. 上海环境科学, 1991, **10**(9): 41-46.
- [3] Haberl R. Constructed wetlands: a chance to solve wastewater problems in developing countries [J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(3): 11-17.
- [4] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. Ecological Engineering, 2001, **16**(4): 545-560.
- [5] Cooper P. Uk experience with reed bed and constructed wetland systems 1985 to 2003 [A]. In: Jan Vymazal W D, (ed.). The first international seminar on the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands [C]. Lisbon: Backhuys Publishers, 2003. 414-415.
- [6] Molle P, Lienard A, Boutin C, *et al.* How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of French systems [J]. Water Science and Technology, 2005, **51**(9): 11-21.
- [7] 詹德昊, 吴振斌, 张晟, 等. 堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(2): 1-4.
- [8] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [9] 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.
- [10] 项学敏, 杨洪涛, 周集体, 等. 人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究: 冬季和夏季对比[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 713-719.
- [11] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years' experience [J]. Ecological Engineering, 2002, **18**(5): 633-646.
- [12] Chan S Y, Tsang Y F, Chua H, *et al.* Performance study of vegetated sequencing batch coal slag bed treating domestic wastewater in suburban area[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(9): 3774-3781.
- [13] Reddy K R, D'angelo E M. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 1997, **32**(5): 1-10.
- [14] 陈秀容, 周琪. 人工湿地脱氮除磷特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(7): 526-529.
- [15] 钟成华, 李杰, 邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, **30**(4): 141-146.
- [16] Xu D F, Xu J M, Wu J J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems [J]. Chemosphere, 2006, **63**(2): 344-352.
- [17] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. Ecological Engineering, 1999, **12**(1-2): 5-12.
- [18] Prochaska C A, Zouboulis A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate [J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(3): 293-303.
- [19] Wang N M, Mitsch W J. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands [J]. Ecological Modelling, 2000, **126**(2-3): 101-130.
- [20] Prochaska C A, Zouboulis A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate [J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(3): 293-303.
- [21] Pant H K, Reddy K R. Potential internal loading of phosphorus in a wetland constructed in agricultural land [J]. Water Research, 2003, **37**(5): 965-972.
- [22] 吴长淋. 人工湿地处理含重金属废水的研究现状及展望 [J]. 化学工程师, 2009, **23**(3): 38-41.
- [23] Cheng S P, Grosse W, Karrenbrock F, *et al.* Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals [J]. Ecological Engineering, 2001, **18**(5): 317-325.
- [24] Mungur A S, Shutes R B E, Revitt D M, *et al.* An Assessment of metal removal by a laboratory scale wetland [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(5): 125-133.
- [25] Lim P E, Tay M G, Mak K Y, *et al.* The effect of heavy metals on nitrogen and oxygen demand removal in constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2003, **301**(1-3): 13-21.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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

国内外公开发刊