

武汉三角湖复合垂直流人工湿地对重金属元素的去除研究

胡胜华¹, 张婷^{1,2}, 周巧红¹, 贺锋¹, 梁威¹, 吴振斌^{1*}

1. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 10049

摘要: 对武汉三角湖复合垂直流人工湿地进、出水口中 10 种重金属元素(As、Ba、Cd、Cr、Cu、Li、Mn、Ni、Pb、Zn)去除进行了周年监测(2007 年 2 月—12 月)。人工湿地进水口重金属含量较低, 无超标重金属元素。三角湖人工湿地进水口重金属元素含量排序为: Ba > Mn > Zn > Li > Cu > As > Pb > Cr > Ni > Cd。三角湖人工湿地出水口对重金属去除效果排序为: Cd > As > Mn > Pb > Zn > Cr > Cu > Ba > Li > Ni。研究表明复合垂直流人工湿地可以有效的去除重金属, 对受污染水体水质改善和水生态系统恢复具有重要意义。

关键词: 复合垂直流人工湿地; 重金属; 去除; 周年监测

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 10-2468-06

人工湿地(CW)污水处理系统是一种包含土壤、植被、微生物的生态工程系统, 它利用自然的净化能力来处理污水, 具有投资少、能耗低、管理简便、过程稳定、处理效果好、无二次污染等优点^[1-2]。CW 污水处理系统于 20 世纪 70 年代首先出现在德国, 继而迅速推广到世界各地。我国在“七五”期间开始人工湿地的研究, 并且在北京昌平、深圳白泥坑等地建设了一批人工湿地工程。复合垂直流人工湿地(IVCW)是在“九五”期间, 中国科学院水生生物研究所与德国科隆大学、奥地利维也纳农业大学共同承担的欧盟国际合作开发项目。

IVCW 对各态氮(有机氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮)与磷普遍具有良好的去除效果, 其对氮、磷的去除机制包括基质的吸附、过滤、沉淀以及氮的挥发、植物的吸收和湿地中微生物硝化与反硝化作用的去除^[2-8]。

但关于 IVCW 对重金属去除的研究报道很少。重金属不仅污染水体, 阻碍水生生物生长, 而且还通过食物链途径危害人体健康。近年来, 国内对水体及沉积物、水生物体内重金属含量开展了相关研究^[9-12]。但是, 关于人工湿地对重金属去除的研究较少^[13-15]。

三角湖为武汉市一小型浅水湖泊, 面积为 2.77 km², 容积为 360×10⁴ m³, 平均水深为 1.3 m。三角湖功能区划为一般鱼类保护区, 区域规划水质为地表水Ⅲ类水质, 由于周边的农业面源污染, 及江汉大学校园生活污水直接排入湖中, 湖泊的水质已有恶化的趋势。2004 年 8 月, 针对三角湖区域水环境恶化、湖岸带水生植物群落布局零散及景观效果不

佳等现状, 构建了复合垂直流人工湿地工程。

本文研究时间跨度为 2007 年 2—12 月, 期间对三角湖人工湿地进、出水口进行了监测, 重点针对国内外研究中普遍认为对生态环境有重要影响的砷(As)、钡(Ba)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、锂(Li)、锰(Mn)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn), 探讨复合垂直流人工湿地对重金属的去除效果。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

三角湖人工湿地位于江汉大学校园内行政楼东北方向的湖滨空地。该地段属三角湖西南湖汊, 湖滨有水塘, 沿岸水域内分布有荷花、芦苇、香蒲等。工程选址区域水体透明度不高, 氮、磷浓度较高^[16]。

1.2 工艺选择

针对三角湖的具体情况, 由于具有占地面积大, 运行和基建费用高, 景观效益低及对周边环境负效应严重等缺点, 常规二级污水处理工艺, 如活性污泥法、氧化沟、氧化塘, 均不纳入该项目技术选择范围。

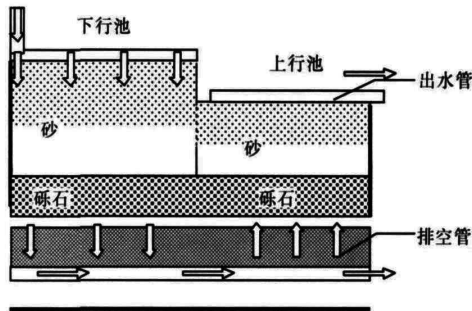
综合考虑人工湿地(表面流湿地、潜流湿地、复合垂直流湿地)的净化功能、污染负荷、占地面积、建设费用等因素后, 该工程选取复合垂直流人工湿地工艺^[16]。该处理系统是将污水投配到一定级配的砂、石等介质中, 使之经常处于淹没状态, 同时在介质中种植水生植物, 污水经过耐水植物、介质、微生物的综合作用得以净化(图 1)。该系统对细菌、总大肠菌群、粪大肠菌与藻类的平均去除率分别达 99.4%、85.9%、97.7%^[16]; 对酞酸酯的平均去除率

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808172; 20877093; 30870221); 国家十一五水专项(2009ZX07106-002-004)

作者简介: 胡胜华(1978 年生), 男, 博士, 主要研究方向为湖泊生态系统环境分析及藻类生态学。

*责任作者: 吴振斌。E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

收稿日期: 2010-10-13

图1 复合垂直流人工湿地基本构造剖面图^[16]Fig.1 Cross-section of integrated vertical flow constructed wetland^[16]

> 99.95%^[17], 对总氮的去除率 > 50%^[18]; 春、夏季对总磷的去除率可达 60%以上, 冬季也可以达到 40%^[8], 同时, 该处理技术还具有建设、运行、维护费用低的特点。

1.3 工艺流程、平面布置及系统设计

复合垂直流人工湿地工程设计处理水量为 1 000~1 500 m³·d⁻¹, 占地面积为 1 034 m², 水力停留时间为 7.5 h, 水力负荷为 1 286 mm·d⁻¹^[16]。

根据选定区域地形, 该工程将湿地处理单元分为并联的 3 组下行流湿地与上行流湿地。湖水首先由提升泵引入并联的 3 组下行流湿地, 经过这一级湿地处理后, 水流进入并联的 3 组上行流湿地。经过 2 级湿地净化后, 水流跌水进入排水明渠, 最终排入江汉大学河方向。湿地四周采用土坝围坝, 内衬采用 HDPE(高密度聚乙烯)防渗膜。湿地内部填充特定级配的砂石填料, 填料表面种植耐污水水生植物。

采用绝对高程, 三角湖控制最高水位为 19.65 m, 最低控制水位为 18.65 m, 常水位为 19.15 m。

湿地植物选择耐污能力强、景观效果好的挺水植物, 如马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica*)、美人蕉(*Canna indica*)、香蒲(*Typha orientalis*)、灯心草(*Common Rush*)、纸莎草(*Cyperus papyrus*)与芦苇(*Phragmites australis*)。本工程选择美人蕉、富贵竹(*Dracaena sanderiana*)、花叶芦荻(*Arundo donax* Var. *Versicolor*)为湿地主体植物。上述植物在人工湿地中栽种时, 由湿地边缘到中心, 植株逐渐增高, 形成高低错落的植物带并通过搭配风车草(*Cyperus alternifolius*)、香根草(*Vetiver zizanioides*)、纸莎草、千屈菜(*Lythrum salicaria*)等植物, 使其四季都能通过呈现美的景观。

1.4 样品采集、处理与测定

本次研究的数据为三角湖复合垂直流人工湿地 2007 年 2—12 月的进(出)水口重金属元素(As、Ba、Cd、Cr、Cu、Li、Mn、Ni、Pb、Zn)质量浓度指标。

在三角湖复合垂直流人工湿地进(出)水口设置了采样点, 合计布置了 2 处。这 2 处监测点每月采样 1 次, 采样时间均在上午 8:00—11:30 内完成, 每处监测点采水量为 5 L, 灌入塑料桶密封带回。

重金属元素采用美国 BAIRD 公司 PS - 6 真空型 ICP-AES 仪(电感耦合等离子体光谱仪)进行分析。该法通过使用孔径 0.45 μm 的混合纤维树脂滤膜, 将采集到的原水水样逐一抽滤, 每 1 个样品取 30 mL 并装入聚乙烯瓶, 并滴入 1 mL 浓硝酸(优级纯), 密封, 进行定性、定量测试。

2 结果与讨论

三角湖人工湿地进(出)水口的重金属元素(As、Ba、Cd、Cr、Cu、Li、Mn、Ni、Pb、Zn)2007 年 2—12 月的变化情况详见表 1 和图 2。

从表 1、图 1 可见, 在 2—12 月进水口都检测到 As, 进水口最高质量浓度出现在 4 月, 为 0.031 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度也出现在 4 月, 为 0.020 mg·L⁻¹; 进水口最低质量浓度出现 6 月与 7 月, 均为 0.002 mg·L⁻¹, 出水口最低质量浓度为 6 月, 均低于检测限。

在 2—12 月进水口都检测到 Ba, 进水口最高质量浓度出现在 9 月, 为 0.221 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度也出现在 12 月, 为 0.152 mg·L⁻¹; 进水口最低质量浓度出现 3 月, 均为 0.067 mg·L⁻¹, 出水口最低质量浓度 6 月, 为 0.007 mg·L⁻¹。

除了 4 月, 在 2—12 月年进水口都检测到 Cd, 进水口最高质量浓度均为 0.001 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度出现在 2 月, 为 0.001 mg·L⁻¹, 出水口 3—12 月均未检出。

除了 2、7、12 月, 其他月份进水口都检测到 Cr, 进水口最高质量浓度为 3 月, 达到 0.005 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度出现在 3 月为 0.004 mg·L⁻¹, 出水口最低质量浓度出现在 6、8、9、10、11 月, 均低于检测限。

在 2—12 月年进水口都检测到 Cu, 进水口最高质量浓度出现在 8 月, 为 0.018 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度也出现在 8 月, 为 0.012 mg·L⁻¹; 进水口最低质量浓度出现 4 月与 5 月, 均为 0.002 mg·L⁻¹, 出水口最低质量浓度为 3、4、5 月, 均为 0.001 mg·L⁻¹。

Li 的情况与 Cu 类似, 在 2—12 月年进水口检测到, 进水口最高质量浓度出现在 5 月, 为 0.006 mg·L⁻¹, 出水口最高质量浓度出现在 3 月和 5 月, 为 0.003 mg·L⁻¹; 进水口最低质量浓度出现 2、6、7 月、8、11 月, 均为 0.003 mg·L⁻¹, 出水口最低质量浓度为 4 月, 为 0.001 mg·L⁻¹。

在 2—12 月年进水口均检测到 Mn, 进水口最高质量浓度出现在 7 月, 为 0.030 mg·L⁻¹, 出水口最高

质量浓度出现在9月,为0.025 mg·L⁻¹;进水口最低质量浓度出现4月,均为0.007 mg·L⁻¹,出水口最低质量浓度为4月和12月,为0.003 mg·L⁻¹。

对照净化处理结果来看,在6—12月以外的时间里(2—5月)进水口都检测到Ni,进水口最高质量浓度出现在2月,为0.006 mg·L⁻¹,出水口最高质量浓度出现在3月,为0.002 mg·L⁻¹;进水口最低质量浓度出现5月,均为0.002 mg·L⁻¹,出水口最低质量浓度为5月,低于检测限。

在6—12月以外的时间里(2—5月)进水口都检测到Pb,进水口最高质量浓度出现在8月,为0.013 mg·L⁻¹,出水口最高质量浓度出现在4、5月,为0.008 mg·L⁻¹;进水口最低质量浓度出现于2月为0.003 mg·L⁻¹,出水口最低,3月未检出。

在2—12月年进水口都检测到Zn,进水口最高质量浓度出现在5月,为0.052 mg·L⁻¹,出水口最高质量浓度出现在2月为0.034 mg·L⁻¹;进水口最低质量浓度出现10月,为0.004 mg·L⁻¹,出水口最低质量浓度也为10月,达到0.001 mg·L⁻¹。

10种重金属元素在三角湖人工湿地进水口监测期内均有检测到。10种重金属元素在三角湖水体中没有明显差异,波动变化是随机的。若与GB 3838—2002《地表水环境质量标准》III类水质要求相比,所研究10种重金属元素无一例外都低于该标

准,但Pb、Zn偏高,这一点与武汉墨水湖、金银湖、东湖的重金属污染情况相近^[14]。

根据表1与图2,可以得出以下几点观点:

(1) 三角湖水体10种重金属元素对照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》。除了Cu、Zn在I—II类水标准间,Pb在II—III类水外,其余均在I类水标准内。

(2) 监测期间内,三角湖湖泊水体重金属元素含量即进水口排序为:Ba > Mn > Zn > Li > Cu > As > Pb > Cr > Ni > Cd。虽然质量浓度较低,但三角湖复合垂直流人工湿地对水体10种重金属元素有着明显的去除,且去除效果较好。这表明复合垂直流人工湿地可以有效的去除三角湖水体中10种重金属元素。

3 小结

三角湖湖泊来水具有高氮、磷的特点,其所在汉阳区是武汉市传统工业区,故其水体中含有较多种类的重金属元素。这些重金属元素过量时往往具有高毒性,在环境中富集到一定程度后可能会导致公害问题出现。

就2007年2—12月三角湖人工湿地处理重金属效率来看As的去除率(表2、图2),春季、冬季去除率显著为低,随着环境温度的上升,去除率逐渐上升,去除率在夏季(6—10月)这一时期达到最

表1 三角湖人工湿地进出口重金属元素含量变化(2007年2—12月)

Tab 1 Annual changes of heavy metals contents in the influence and effluence of the Sanjiao lake integrated vertical-flow constructed wetland (Feb. 2007-Dec. 2007)

| 时间 | $\rho(\text{As})$ | $\rho(\text{Ba})$ | $\rho(\text{Cd})$ | $\rho(\text{Cr})$ | $\rho(\text{Cu})$ | $\rho(\text{Li})$ | $\rho(\text{Mn})$ | $\rho(\text{Ni})$ | $\rho(\text{Pb})$ | $\rho(\text{Zn})$ |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2月进水口 | 0.003 | 0.069 | 0.001 | 0.000 | 0.008 | 0.003 | 0.025 | 0.006 | 0.003 | 0.042 |
| 2月出水口 | 0.001 | 0.061 | 0.001 | 0.000 | 0.004 | 0.002 | 0.005 | 0.001 | 0.002 | 0.034 |
| 3月进水口 | 0.004 | 0.067 | 0.001 | 0.005 | 0.003 | 0.004 | 0.040 | 0.005 | 0.012 | 0.030 |
| 3月出水口 | 0.001 | 0.061 | 0.000 | 0.004 | 0.001 | 0.003 | 0.022 | 0.002 | 0.000 | 0.020 |
| 4月进水口 | 0.031 | 0.069 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.007 | 0.003 | 0.020 | 0.073 |
| 4月出水口 | 0.020 | 0.057 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.008 | 0.014 |
| 5月进水口 | 0.005 | 0.080 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.006 | 0.079 | 0.002 | 0.016 | 0.052 |
| 5月出水口 | 0.002 | 0.039 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.013 |
| 6月进水口 | 0.002 | 0.104 | 0.001 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.020 | -- | -- | 0.025 |
| 6月出水口 | -- | 0.007 | 0.000 | -- | 0.006 | 0.002 | 0.017 | -- | -- | 0.009 |
| 7月进水口 | 0.002 | 0.095 | 0.001 | -- | 0.004 | 0.003 | 0.030 | -- | -- | 0.006 |
| 7月出水口 | 0.001 | 0.069 | 0.000 | -- | 0.002 | 0.002 | 0.010 | -- | -- | 0.001 |
| 8月进水口 | 0.006 | 0.120 | 0.001 | 0.001 | 0.018 | 0.003 | 0.159 | -- | 0.013 | 0.050 |
| 8月出水口 | -- | 0.074 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.002 | 0.022 | -- | 0.003 | 0.042 |
| 9月进水口 | 0.010 | 0.221 | 0.001 | 0.003 | 0.009 | 0.005 | 0.044 | -- | -- | 0.059 |
| 9月出水口 | 0.002 | 0.127 | 0.000 | -- | 0.005 | 0.002 | 0.025 | -- | -- | 0.020 |
| 10月进水口 | 0.003 | 0.160 | 0.001 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.012 | -- | 0.002 | 0.004 |
| 10月出水口 | -- | 0.077 | 0.000 | -- | 0.002 | 0.002 | 0.006 | -- | -- | 0.001 |
| 11月进水口 | 0.003 | 0.173 | 0.001 | 0.002 | 0.006 | 0.003 | 0.038 | -- | 0.002 | 0.024 |
| 11月出水口 | 0.001 | 0.101 | 0.000 | -- | 0.002 | 0.002 | 0.007 | -- | 0.000 | 0.016 |
| 12月进水口 | 0.005 | 0.182 | 0.001 | 0.000 | 0.008 | 0.002 | 0.054 | -- | 0.002 | 0.043 |
| 12月出水口 | 0.001 | 0.152 | 0.000 | -- | 0.003 | 0.002 | 0.003 | -- | 0.000 | 0.025 |

表2 三角湖人工湿地 2007 年 2—12 月期间重金属月均去除率

Tab 2 The average monthly removal rate of heavy metals in the Sanjiao lake integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) during Feb. 2007 to Dec. 2007

| 时间 | As | Ba | Cd | Cr | Cu | Li | Mn | Ni | Pb | Zn |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2月 | 66.67 | 11.38 | 0 | 0 | 50 | 24.15 | 80 | 76.41 | 33.33 | 19.16 |
| 3月 | 75.00 | 8.70 | 100 | 14.52 | 66.67 | 21.09 | 45 | 60 | 100 | 31.97 |
| 4月 | 36.14 | 17.39 | 0 | 50 | 50 | 66.67 | 57.80 | 68.37 | 59.55 | 80.82 |
| 5月 | 61.49 | 51.19 | 100 | 0 | 50 | 50 | 100 | 100 | 50 | 74.54 |
| 6月 | 100 | 93.28 | 100 | 100 | 25 | 4.00 | 14.29 | 0 | 0 | 64.00 |
| 7月 | 40.91 | 27.37 | 100 | 0 | 50 | 33.30 | 66.67 | 0 | 0 | 86.44 |
| 8月 | 100 | 38.33 | 100 | 100 | 31.28 | 33.33 | 86.16 | 0 | 76.92 | 16.00 |
| 9月 | 80.58 | 42.70 | 100 | 100 | 45.56 | 59.57 | 42.79 | 0 | 0 | 66.10 |
| 10月 | 100 | 52.00 | 100 | 100 | 33.33 | 0 | 50 | 0 | 100 | 71.43 |
| 11月 | 66.67 | 41.45 | 100 | 100 | 65.45 | 33.30 | 82.01 | 0 | 100 | 31.91 |
| 12月 | 80 | 16.39 | 100 | 0 | 62.50 | 0 | 94.83 | 0 | 100 | 41.86 |
| 月去除率 | 73.40 | 36.38 | 81.82 | 51.32 | 48.16 | 29.58 | 65.41 | 27.71 | 56.35 | 53.11 |

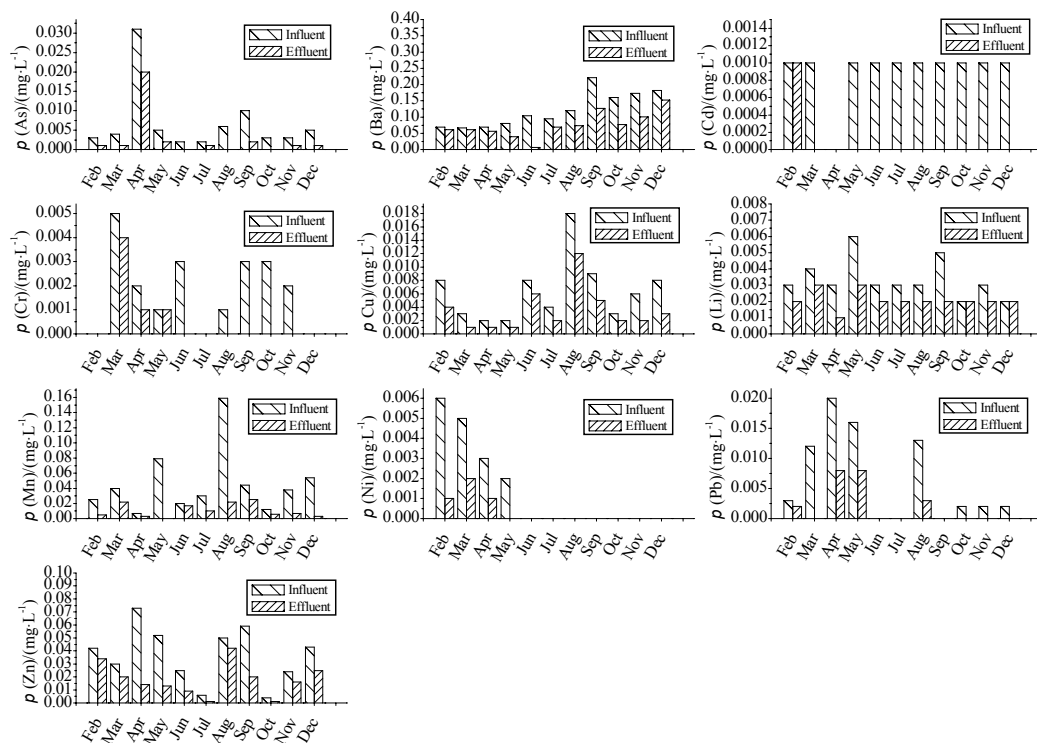


图2 三角湖人工湿地进出水口重金属元素质量浓度变化图 (2007年2—12月)

Fig.2 Annual changes heavy metals in the influence and effluence of the Sanjiao lake integrated vertical-flow constructed wetland (Feb. 2007-Dec. 2007)

高,随后逐渐下降。在监测 2007 年 2—12 月里,月去除率达到了 73.40%。

Ba 的去除率(表 2、图 2),春季、冬季去除率显著为低,随着环境温度的上升,去除率逐渐上升,去除率在夏季(6—11 月)这一时期达到最高,随后逐渐下降。在监测 2007 年 2—12 月里,月去除率达到了 36.38%。

Cd 的去除率(表 2、图 2),Cd 在进水口质量浓

度很低(均为 0.001 mg·L⁻¹)。2、4 月时进水未监测到 Cd,在监测时间段内,月去除率达到了 81.82%。

Cr 的情况与 Cd 相似,2、5、7、12 月时进水未监测到 Cr,6、8、9、10、11 月这一时期环境温度较高,适合湿地植物生长,净化效果较高,出水口均检测不到 Cr,月去除率达到了 51.32%(表 2、图 2)。

Cu 在监测期间内进(出)水口都有发现,其去除

率无明显季节性,综合来看月去除率达到48.16%(表2、图2)。

Ni在三角湖水体中的质量浓度很低,综合来看月均去除率达到27.71%(表2、图2)。在有些月份(5—11月)水体未检测到Ni,在可检测到月份中其去除效果都在60%以上,显示了人工湿地对Ni的良好净化效果。

在6、7、8月中湿地进水口未监测到Pb,但总的来看三角湖人工湿地去除Pb的能力与效率较高,月去除率达到了56.35%(表2、图2)。

就2007年2—12月三角湖人工湿地处理重金属效率来看Zn的去除率(表2、图2),春季去除率显著为低,随着环境温度的上升,去除率逐渐上升,去除率在夏季(4—7月)这一时期达到最高,随后逐渐下降。在监测2007年2—12月里,月均去除率达到了53.11%。

综合三角湖人工湿地对10种重金属元素的监测结果,三角湖水水质重金属元素质量浓度在安全范围内,虽然人工湿地进水浓度较低,但对各重金属元素仍具明显的去除效果,其去除率依次为: Cd > As > Mn > Pb > Zn > Cr > Cu > Ba > Li > Ni。三角湖作为中小型封闭性湖泊,具有湖泊水体交换缓慢的基本特点,故根据水体检测结果,可以间接推测三角湖底泥中也不同程度受到重金属污染,可考虑后期开展对该湖泊底泥中的重金属分布和污染情况进行调查研究。

参考文献:

- [1] 郭明新,李万庆.天津市城市污水自由水面构筑物湿地处理系统中污水氮去除规律的研究[J].环境化学,1996,15(6):516-522.
GUO Mingxin, LI Wanqing. A study on elimination pattern of nitrogen in wastewater in land treatment system(FWCS) of Tianjin City[J]. Environmental Chemistry, 1996, 15(6):516-522.
- [2] 曹向东,王宝贞,蓝云兰,等.强化塘—人工湿地复合生态塘系统中氮磷的去除规律[J].环境科学研究,2002,13(2):24-28.
CAO Xiangdong, WANG Baozhen, LAN Yunlan, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in the pond-wetland combined system[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(2): 224-28.
- [3] GERSBERG R M, ELKINS B V, GOLDMAN C R. Nitrogen Removal in artificial wetland[J]. Water Research, 1983, 17: 1009-1014.
- [4] JENNIFER A S, ANDREW H B, CHRISTOPHER A S. An evaluation of a constructed wetland to treat waste water from a dairy farm in Maryland[J]. Ecological Engineering, 2000, 14(1/2): 199-206.
- [5] ARMSTRONG R. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants[J]. Nature, 1964, 204(1964): 801-802.
- [6] 吴振斌,詹德昊,张晟,等.复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(1):12-16.
WU Zhenbin, ZHAN Dehao, ZHANG Sheng, et al. Design method and purification efficiency of integrated vertical flow constructed wetland[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2003, 36(1): 12-16.
- [7] 吴振斌,徐光来,周培疆,等.复合垂直流人工湿地污水氮的去除效果研究[J].农业环境科学学报,2004,23(4):757-760.
WU Zhenbin, XU Guanglai, ZHOU Peijiang, et al. Removal effects of nitrogen in integrated vertical-flow constructed wetland sewage treating system[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2004, 23(4): 757-760.
- [8] 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,等.人工湿地对污水磷的净化效果[J].水生生物学报,2001,25(1):28-34.
WU Zhenbin, CHEN Huirong, HE Feng, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system[J]. ACTA Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(1): 28-34.
- [9] 乔胜英,蒋敬业,向武,等.武汉市湖泊中重金属污染状况[J].水资源保护,2007,23(1):44-48.
QIAO Shengying, JIANG Jingye, XIANG Wu, et al. Heavy metals pollution in lakes of Wuhan city[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(1): 44-48.
- [10] 李任伟,李原.渤海沿岸环境沉积调查:As,重金属,氮和磷污染[J].沉积学报,2008,26(1):128-138.
LI Renwei, LI Yuan. Environmental and sedimentological survey along the coast of Bohai Gulf[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 128-138.
- [11] 黄亮,李伟,吴莹,等.长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布[J].环境科学研究,2002,15(6):1-4.
HUANG Liang, LI Wei, WU Yin, et al. Distribution of heavy metals in aquatic plants of some lakes in the[J]. Research of environmental sciences, 2002, 15(6): 1-4.
- [12] 董德明,路永正,李鱼,等.吉林省部分河流与湖泊表层沉积物中重金属的分布规律[J].吉林大学学报:地球科学版,2005,35(1):91-96.
DONG Deming, LU Yongzheng, LI Yu. The distribution of heavy metals in the surface sediments in parts of rivers and lakes in Jilin Province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(1): 91-96.
- [13] 桑稳姣,程建军.墨水湖底泥重金属污染现状与评价研究[J].安徽农业大学学报,2008,35(3):469-472.
SANG Wenjiao, CHENG Jianjun. Assessment on pollution status of heavy metal in sediment of Moshui Lake in Wuhan[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2008, 35(3): 469-472.
- [14] 吴振斌,成水平,贺锋,等.垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J].应用生态学报,2002,13(6):715-718.
WU Zhenbin, CHENG Shuiping, HE Feng, et al. Design and purification performance of vertical-flow constructed wetland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 715-718.
- [15] 龚磊,周永章,蔡立梅,等.酸矿水中重金属人工湿地处理机理研究[J].环境科学与技术,2006,29(11):109-111.
DOU Lei, ZHOU Yongzhang, CAI Limei, et al. Removal of heavy metals from AMD by constructed wetlands[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(11): 109-111.
- [16] 张翔凌,张晟,付贵萍,等.复合垂直流人工湿地用于滨湖型校园湖泊水体修复[J].中国给水排水,2008,24(4):62-65.
ZHANG Xiangling, ZHANG Sheng, FU Guiping, et al. Application of integrated vertical-flow constructed wetland in restoration of lake Water in Lakeside Campus[J]. China water & wastewater, 2008, 24(4): 62-65.
- [17] 赵文玉,吴振斌,成水平,等.符合垂直流构建湿地净化酞酸酯的初步研究[J].应用与环境生物学报,2002,8(4):430-434.
ZHAO Wenyu, WU Zhenbin, CHENG Shuiping, et al. Purification of phthalic acid esters(PAEs) by integrated vertical constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(4): 430-434.

[18] 贺锋, 吴振斌, 付贵萍, 等. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 280-283.
HE Feng, WU Zhenbin, FU Guiping, et al. Phys-chemical character

and nitrogen changes in integrated constructed wetland at the initial stage of operation[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(3): 280-283.

The effect of integrated vertical-flow constructed wetland on removal of heavy metals in Sanjiao Lake (Wuhan) over annual time periods

HU Shenghua¹, ZHANG Ting^{1,2}, ZHOU Qiaohong¹, HE Feng¹, LIANG Wei¹, WU Zhenbin^{1*}

1. State Key Lab of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: This paper reported the results of monitoring 10 kinds of heavy metals in the influence and effluence of the integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) during Feb. 2007-Dec. 2007 which was constructed for improving water quality of Sanjiao lake in Wuhan, China. The results showed that the concentrations of detected heavy metals in the influent were lower than the standards of water quality and their concentration order was: Ba > Mn > Zn > Li > Cu > As > Pb > Cr > Ni > Cd. Although the concentration of heavy metals in the influent was low, the significant removal efficiency by IVCW was observed. The order of removal rate in the effluence was: Cd > As > Mn > Pb > Zn > Cr > Cu > Ba > Li > Ni. The experimental results suggested that IVCW was beneficial to improve water quality of the polluted water bodies and restore the aquatic ecosystem.

Key words: integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW); heavy metal element; removal; annual survey