

垂直流人工湿地的设计及净化功能研究

吴振斌 成水平 付贵萍 贺 锋

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, 武汉市

摘 要

本文阐述了垂直流人工湿地小试系统的设计, 并测试其冬季污水净化效果。垂直流人工湿地由分别为下行流和上行流方式的两池组成。对受污染地面水体中的 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 TSS 的去除率分别为 53.6%、78.7% 和 80.2%。对细菌、总大肠菌、粪大肠菌和藻类的平均去除率分别达到 99.4%、85.9%、89.7% 和 97.7%。对 KN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的平均去除率分别为: 39.2%、16.5% 和 25.8%。各系统对污染物的去除作用无明显差异。系统出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于进水, 而有植物系统中又高于无植物的对照, 表明湿地植物的存在有利于硝化作用。由此, 下行 - 上行流人工湿地在冬季仍能较好地改善水质, 是一种有效的水处理技术, 对水体水质改善和水生态系恢复具有重要意义。

关键词: 人工湿地, 垂直流, 下行 - 上行流, 污水净化

壹、前 言

随着社会的发展, 城市化的进程加速, 大量污水的无处理排放, 造成世界范围内水质污染问题愈来愈严重, 导致水资源的可利用性降低、水生态系退化, 已经严重地影响到人类的生活水平和生存环境。为解决这些危及人类生存发展的问题, 改善水质、水生态系恢复是目前极为紧迫的任务。污水全部采用工厂化处理, 财力不堪重负, 且大量小城镇的出现, 大型污水处理场所无法满足日益分散的污水处理。多元化处理污水, 充分开发生态工程净化污水技术是降低污水处理的能源消耗、节省开支的重要渠道。

湿地是一种高生产力的生态系统, 具有污水净化功能。但自然湿地存在淤积、效率低、占地面积大等缺点。20 世纪 70 年代, 国际上开始采用人工湿地净化污水^[1]。基质、水生湿生植物和微生物是人工湿地的基本组成。湿地净化污水是湿地中基质、植物和微生物相互关联, 物理、化学、生物学过程协同作用的结果。

国际上湿地水处理技术发展较快, 欧洲芦苇床技术应用较广泛^[2,3]。但大多采用水平流、单一的垂直流等方式, 且欧洲芦苇普遍存在着衰退的现象^[4]。本研究为欧盟国际合作项目内容, 综合中欧湿地技术, 发展上行 - 下行流人工湿地作为一种水处理技

术, 改善水质, 促使退化水生态系的恢复和水资源的持续利用。本文主要报道垂直流人工湿地小试系统的设计及在冬季的污水净化功能, 而该系统对藻毒素和磷的去除作用方面的研究已经作了报道^[5, 6]。该系统已经在深圳、德国科隆等地大规模实施用于生活污水处理及地面水质改善。

贰、材料与方法

一、人工湿地小试系统构造

由串联的两个 1m×1m×1m 池组成, 共十二套。

填料: 底层 15 cm 厚为石头 (直径 40~80 mm), 上部为细砂 (粒径 0~4 mm), 其中下行池砂深 55 cm, 上行池砂深 45 cm。下行池填料高于上行池 10 cm。

水生植物: 各池栽培不同种水生植物。植物的选择, 以武汉地区及亚热带区域较典型的水生、湿生, 根系发达, 生物量较大, 多年生的植物为样品。各套小试系统中的植物组合如表 1。

表 1 人工湿地小试系统植物组合

| 系统 | 下行池 (Downflow chamber) | 上行池 (Upflow chamber) |
|-----|------------------------------------|--|
| P1 | 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | 水葱 <i>Schoenoplectus lacustris</i> |
| P2 | 茭白 <i>Zizania latifolia</i> | 菖蒲 <i>Acorus calamus</i> |
| P3 | 荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i> | 刚毛草 <i>Scirpus subulatus</i> |
| P4 | 草 <i>Scirpus triqueter</i> | 苔草 <i>Carex sp.</i> |
| P5 | 菰 <i>Zizania caduciflora</i> | 慈菇 <i>Sagittaria trifolia</i> |
| P6 | 无植物 (作对照 Control) | |
| P7 | 香蒲 <i>Typha latifolia</i> | 鸢尾草 <i>Iris pseudacorus</i> |
| P8 | 水烛 <i>Typha angustifolia</i> | 灯心草 <i>Juncus effuses</i> |
| P9 | 莎草 <i>Cyperus alternifolius</i> | 水雍菜 <i>Ipomoea aquatica</i> |
| P10 | 薏苡 <i>Coix lacryma-jobi</i> | 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> |
| P11 | 光头稗 <i>Echinochloa colonum</i> | 水芹 <i>Oenanthe javanica</i> |
| P12 | 稗 <i>Echinochloa crusgalli</i> | 水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> |

二、系统运行管理

系统的管网采用直径为 70 mm 的 PVC 管。下行池中表面中央为一根上半面截除的布水管, 下钻小孔 (直径 6 mm), 使进水均匀地分布到湿地表面, 充分地利用垂直流湿地的界面作用; 上行池填料表面为“H”型收集管, 下钻小孔, 以均匀地收集出水; 下行-上行池底部为钻有小孔的“H”型管相连。

水流方式为下行-上行流, 根据净化水质的要求还可进行循环流方式。

进水方式采用间歇式, 以便于较低水力负荷时的布水均匀, 充分地利用湿地表面

和体积;另外,间歇式进水方式,造成湿地充氧的效果,有利于湿地中的有氧呼吸及硝化作用。根据不同的水力负荷,采用日进水 2~4 次。

水力负荷:本系统将进行不同的水力负荷试验。本文报道系统在冬季运转状况,采用下行-上行流、间隙进水、日进水 2 次、水力负荷为 200 mm/d 的运行方式。

三、分析测试

1997 年 10 月至 1998 年 1 月间,定期对湿地进出水水质进行了分析。本文主要报道以下几种水质指标的改善状况,并定期观测水生植物的生长状况。

1. 仪器测定进出水的水温、电导、电位、pH 值 (Cole Parmer 60648 型笔式电导仪、电位仪和 pH 计)、溶氧 (UC-12 型便携式溶氧仪);

2. 化学需氧量 (重铬酸钾法)、五日生化需氧量 (碘量法测氧)、总悬浮物 (滤纸称恒量);

3. 总磷 (过硫酸钾消解法)、无机磷 (钼锑抗分光光度法)、凯氏氮、硝基氮 (酚二磺酸光度法)、氨氮 (纳氏比色法);

4. 异养细菌总数 (平板计数法)、总大肠菌群、粪大肠菌数 (多管发酵法),藻类计数 (血球计数法)。

以上各种指标的测试方法均按国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》^[7]进行。

四、系统进水水源

该试验直接采用东湖 (水果湖) 周围池塘水体作为系统的进水水源,以实现水质改善,促使退化水生态系的恢复和水资源的持续利用。运行期间,进水水质状况见表 2。

表 2 人工湿地进水水质状况(平均值)

| 指标 (Index) | 单位 (Unit) | 数值 (Value) | 指标 (Index) | 单位 (Unit) | 数值 (Value) |
|-------------------------|--------------|---------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 水温(Temp.) | ℃ | 12.4(5~23.2)* | 凯氏氮(KN) | mg/L | 2.70(1.06) |
| 电导(Conductivity) | μ s/cm | 531(26.4) | 氨氮(NH ₄ ⁺ -N) | mg/L | 1.64(1.20) |
| 电位(ORP) | mV | 51(13.2) | 硝基氮(NO ₃ ⁻ -N) | mg/L | 0.103(0.041) |
| pH 值 | | 7.3(0.4) | 总磷(TP) | mg/L | 0.206(0.098) |
| 溶解氧(DO) | mg/L | 8.9(4.9) | 无机磷(IP) | mg/L | 0.023(0.017) |
| 化学耗氧量 COD _{Cr} | mg/L | 64.5(19.7) | 细菌总数(Bacteria) | ind./mL | 1.6(1.4)×10 ⁷ |
| 生化耗氧量 BOD ₅ | mg/L | 14.5(5.0) | 总大肠菌(TC) | MPN/100mL | 2.4(3.8)×10 ⁶ |
| 总悬浮物(TSS) | mg/L | 20.5(11.8) | 粪大肠菌(FC) | MPN/100mL | 2.0(2.0)×10 ⁶ |
| | | | 藻类(Algae) | ind./mL | 4.8(0.2)×10 ⁵ |

* 括号中数值为标准差 (其中水温为幅度)。

叁、实验结果与讨论

一、人工湿地系统进出水水温、电导、电位、pH、溶解氧

1997 年 10 月 23 日至 1998 年 1 月 15 日间,我们对人工湿地小试系统进出水水温、电导、电位、pH、溶解氧测试了 9 次,其平均值如图 2。

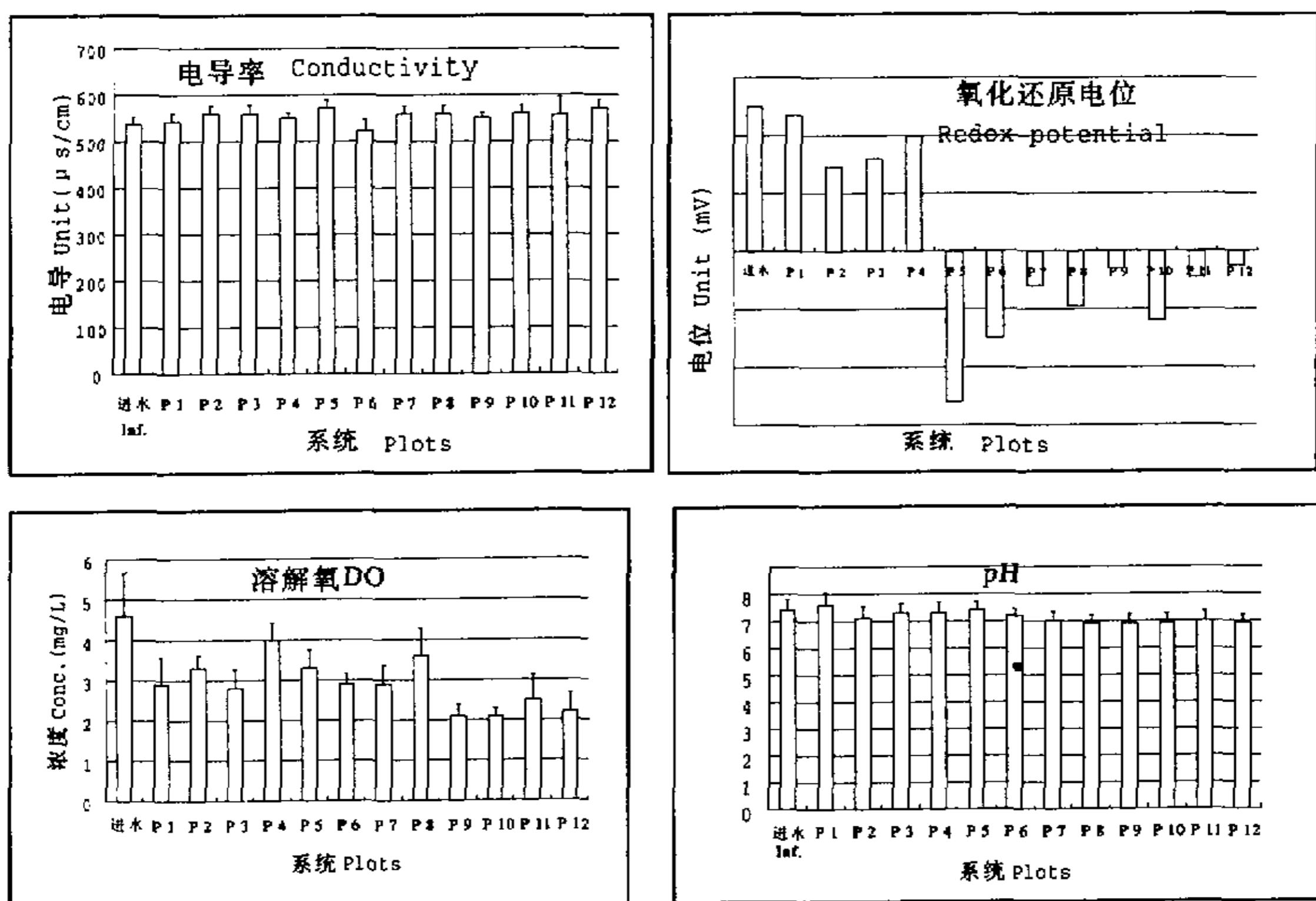


图 1 人工湿地小试系统进出水理化参数

人工湿地进出水水温变化不大。但气温在 0°C 以下,自然水温在 5°C 时,出水水温略高于进水。表明了湿地的保温作用,湿地中生物活动特别是微生物的发酵作用产热可能是维持湿地出水水温的主要因素。

无植物系统 (P6) 的出水电导低于进水,离子态物质略减,体现了湿地基质对离子的吸附作用;有植物系统的出水电导略高于进水,植物的释放作用及植物的生理活动改变了基质的酸碱等条件导致基质离子的释放可能是主要原因。

人工湿地出水的氧化还原电位均低于进水,特别是 P5~12 的出水呈现负值,表明污水中的氧化物质被还原、降解。这一结果与出水的溶解氧下降相对应。系统的出水溶解氧显著地低于进水 ($P < 0.05$)。系统在净化污水的过程中消耗了部分氧气,这与我们已经报道的人工湿地的结果相一致^[4]。P1~4 出水的氧化还原电位呈现正数可能与系统中植物的输氧作用有关,相对来说, P1~4 出水的溶解氧亦略高于其他系统,且该四组系统的植物生长较为旺盛。

进水 pH 值为 7.9~8.6, 偏碱性, 而出水中的 pH 值 (除 P1 外) 低于进水, 甚至有偏酸性的出水。我们曾经报道过人工湿地的出水偏酸性^[8]。微生物的降解活动产生了有机酸类, 以及基质的离子交换、释放和植物的生理活动等使系统中的水体酸性增强。

二、人工湿地净化污水有机物、总悬浮物的效果

1997 年 10 月至 1998 年 1 月间, 对人工湿地小试系统进出水的 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 TSS (总悬浮物) 进行了 5 次测试, 其平均值如图 2。

人工湿地对污水中的 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 TSS 净化效果较好, 其去除率分别达到 53.6%、78.7% 和 80.2%。除对照中 TSS 去除率略低于其他系统外, 各湿地系统对上述污染物质的去除作用没有明显的差异 ($p>0.05$)。这可能是由于系统运行时间较短, 植物生物量较小, 植物及其相关的净化作用尚未充分显现出来而造成的。

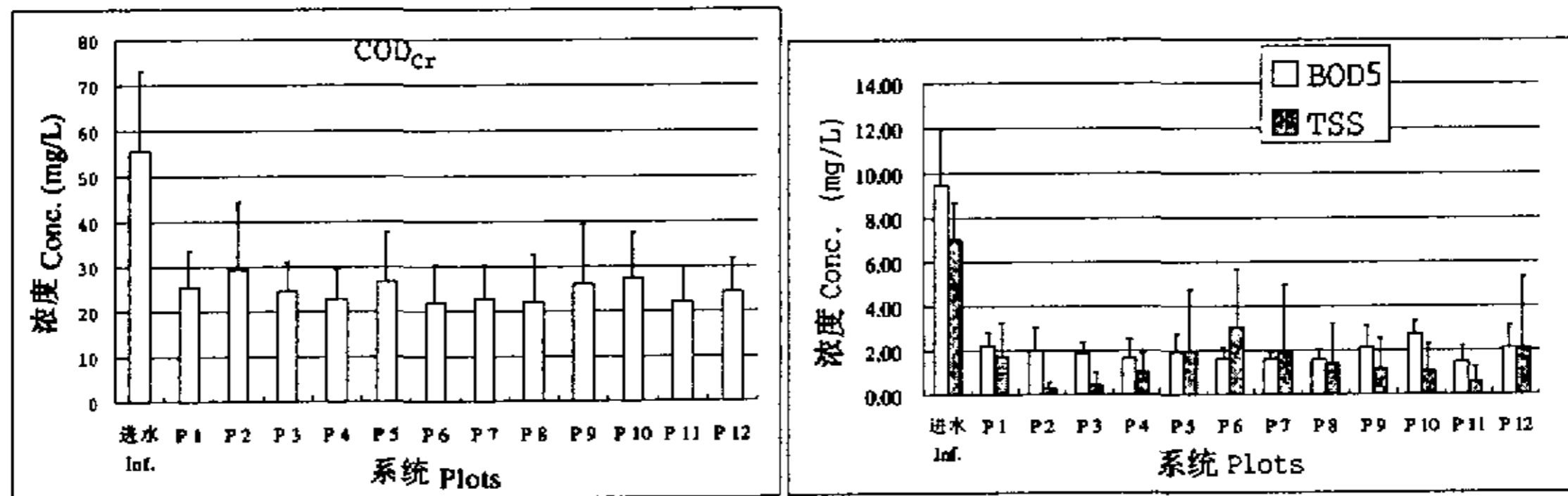


图 2 人工湿地进出水 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 TSS 浓度

出水 COD_{Cr} 平均浓度在 21.9~29.4 mg/L 之间, 大部分在 25 mg/L 以下, 达到国家地面水环境质量标准 V 类水标准 (GB 3838—83); BOD_5 浓度皆在 3mg/L 以下, 可以达到 I 类水标准; TSS 极低, 部分几乎未检测出。由此, 该系统特别是在冬季仍能表现出对受污染水体有机物、总悬浮物较好的净化效果。

三、人工湿地净化污水中氮、磷的效果

我们选择四组植物生长较好的湿地系统 (P1, P4, P8, P11) 和无植物的对照 (P6), 研究其对污水中氮、磷的净化效果。

以上系统对 KN 、 NH_4^+-N 和 TP 的平均去除率分别为: 39.2%、16.5% 和 25.8%。各系统之间亦无明显差异。出水 KN 浓度为 0.876~1.27 mg/L, 而进水 KN 浓度高达 2.67 mg/L, 达到国家地面水环境 III 类水标准; 出水 TP 浓度也在 0.2 mg/L 以下, 处于 III 至 IV 类水之间。可见, 该系统能改善水质, 去除受污染地表水中部分氮、磷物质, 达到地面水质标准。

人工湿地出水中的可溶性磷酸盐 (IP) 浓度高于进水, 其中对照 (P6) 最高, 表明系统中有机磷、不可溶性磷酸盐的分解释放了正磷酸盐, 还可能有基质的释放作用。而有植物系统出水中 IP 低于对照, 显示了植物对可利用态磷的吸收利用。

系统出水 NO_3^--N 浓度高于进水, 且有植物系统中又高于对照, 表明该系统硝化作

用较强,植物的存在更有利于系统硝化作用的发生。

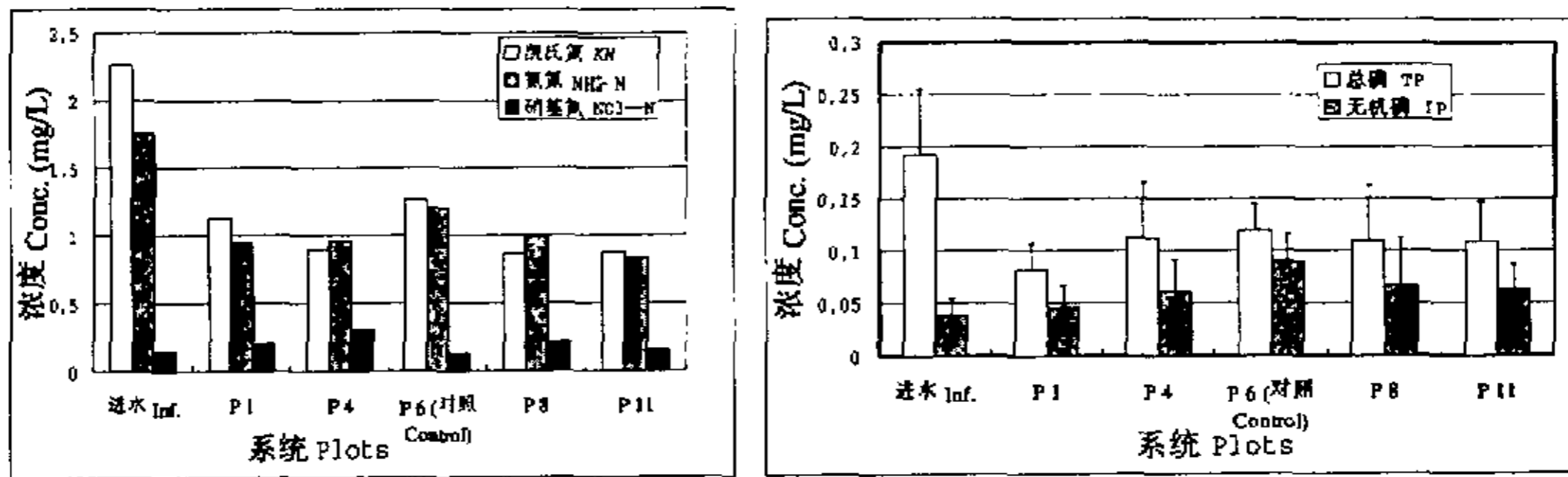


图3 人工湿地进出水氮、磷浓度

五、人工湿地对污水中生物学指标的净化效果

在冬季,我们测试了人工湿地对污水中细菌、总大肠菌、粪大肠菌和藻类的去除作用。

人工湿地对细菌、总大肠菌、粪大肠菌和藻类的平均去除率分别为 99.4%、85.9%、89.7%和 97.7%。而各系统之间的净化作用无明显的差异 ($P>0.05$)。

表3 人工湿地对污水中生物学指标的净化效果 (去除率%)

| 系统 (Plots) | 细菌 (Bacteria) | 总大肠菌 (TC) | 粪大肠菌 (FC) | 藻类 (Algae) |
|---------------|------------------|--------------|--------------|---------------|
| P 1 | 97.8(2.7)* | 93.6(6.0) | 96.7(4.0) | 98.3(0.2) |
| P 2 | 99.4(0.5) | 97.3(1.9) | 96.0(3.6) | 98.6(0.4) |
| P 3 | 99.6(0.2) | 90.5(7.2) | 94.9(3.8) | 98.3(0.4) |
| P 4 | 99.1(0.8) | 94.5(7.6) | 92.3(9.5) | 98.0(0.3) |
| P 5 | 99.4(0.4) | 76.8(20.5) | 95.6(4.0) | 96.8(0.1) |
| P 6 | 99.6(0.3) | 92.5(7.5) | 93.1(6.8) | 97.9(0.6) |
| P 7 | 99.3(0.6) | 73.2(19.6) | 88.4(7.8) | 98.1(1.0) |
| P 8 | 99.7(0.2) | 63.5(15.8) | 78.2(13.5) | 96.4(0.8) |
| P 9 | 99.8(0.2) | 85.3(14.9) | 81.1(17.3) | 95.1(1.8) |
| P 10 | 99.6(0.3) | 81.8(13.8) | 81.6(16.6) | 98.5(1.1) |
| P 11 | 99.9(0.1) | 93.3(7.6) | 94.4(7.5) | 98.6(0.7) |
| P 12 | 99.5(0.3) | 88.7(9.3) | 84.4(17.6) | 97.3(1.7) |

肆、小 结

通过上述研究,我们认为:

* 括号内为标准差。

一、在冬季,下行-上行流方式的人工湿地对污水中有机物、悬浮物和微生物等仍具有较好的去除效果,对氮、磷具有一定的净化作用,是一种有效的水链管理对策。

二、鉴于该系统在冬季对受污染地面水体的净化作用,我们认为人工湿地可因地制宜地应用于地表水和湖泊水体水质改善等。该系统已经在深圳、德国科隆等地大规模实施用于生活污水处理及地面水质改善。

三、由于运转时间较短,人工湿地中植物生长状况不是很好,生物量较小,植物及其相关的净化作用尚未充分显现出来,各系统净化污水的效果暂无明显差异。而从冬季植物地面部分的生长状况来看,水葱、草、灯心草至 1998 年 1 月仍能保持一定量的新蘖,水芹一直生长旺盛,是较为适宜的用于人工湿地的植物种类。

四、人工湿地中硝化作用较强,植物的存在有利于系统中硝化作用的发生。

致 谢

该项研究受国家杰出青年基金项目(39925007)和欧盟国际合作项目(ERBIC18-CT96-0059)资助,参与该项工作的还有金建明、陈辉蓉、任明迅、熊丽、邱东茹等同志,夏宜研究员,邓家齐、刘保元、詹发萃、况琪军、谭渝云、庄德辉副研究员,作者在此对他们表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

1. Fetter C W Jr, Slooy W E, Spangler, et al. Potential replacement of septic tank drain fields by artificial marsh wastewater treatment systems. *Ground water*, 1976, 14(6): 396~401
2. Brix H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat Sci Tech*, 1994, 30(8): 209~223
3. Cooper P F, Green B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom—the first 10 years' experience. *Wat Sci Tech*, 1995, 32(3): 317~327
4. Hartog C D, Kevt J, Sukopp H. Reed—A common species in decline. *Aquatic Botany*, 1989, 35: 1~4
5. 吴振斌, 陈辉蓉, 雷腊梅等. 人工湿地系统去除藻毒素研究. *长江流域资源与环境*, 2000, 9(2): 242~247
6. 吴振斌, 陈辉蓉, 贺锋等. 人工湿地磷的去除研究. *水生生物学报*, 2000, 26(1)
7. 国家环境保护局编. *水和废水监测分析方法(第 III 版)*. 中国环境科学出版社, 1989. 610
8. 成水平, 夏宜. 香蒲、灯心草人工湿地的研究 III(净化污水的机理). *湖泊科学*, 1998, 10(2): 66~71