第 25 卷 第 1 期　　水 生 生 物 学 报　　Vol. 25, No. 1
2001 年 1 月　　ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA　　Jan., 2001

人工湿地系统对污水磷的净化效果

吴振斌　陈辉蓉　贺　锋　成水平
付贵萍　金建明　邱东茹　任明迅
(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　430072)

摘要: 建立以亚热带湿生、水生植物为主的十二套下行流—上行流人工湿地系统作为处理城镇生活污水的对策。以其中四套研究其在不同的水力负荷及气候条件下对污水中磷的去除效果。人工湿地系统随处理运行时间的推移趋于稳定, 对污水中的总磷、无机磷显示较好的净化效率, 平均去除率在冬季达到 40% 以上, 夏季达到 60% 以上, 出水达到国家地面水 III 级标准。水生植物在系统中起到明显作用, 有植物系统的除磷效率及稳定性均高于无植物对照, 其中 2 号茭白—石菖蒲系统的效果最好, 总磷平均去除率为 65%。4 号　草—苔草系统在高水力负荷下的净化效果优于 2 号。水力负荷的增加对系统的净化效果没有明显影响。

关键词: 人工湿地; 总磷; 无机磷; 去除率
中图分类号: X117　　文献标识码: A　　文章编号: 1000-3207(2001)01-008

人工湿地作为一种新兴的污水处理工艺, 兴起于 70 年代的美国、澳大利亚、荷兰、丹麦、英国等国家, 因其建造及运转费用低、维护简单、效果好、适用面广、对负荷变化的适应能力强等特点, 从而成为替代生化二级污水处理厂的切实可行的途径之一[1-3]。在我国, 由于中小城镇众多, 人口密集, 资金及技术有限, 发展大型的污水处理厂有很大的困难性。因此人工湿地技术在我国有着广阔的应用前景。国内数家研究单位已在深圳白泥坑、北京昌平等地进行了人工湿地系统的有益尝试[4, 5]。该文中的人工湿地系统借鉴了欧洲较先进的芦苇床技术, 并结合我国实际, 采用新型的下行—上行流设计方案, 种植多种水生湿生植物, 进行运行、管理、净化污水方面的研究。该文主要通过对系统运行一年多来对污水中磷的去除效果的研究, 探讨这一新型污水处理工艺在理论和实用上的可行性。

1　材料与方法

1.1　湿地结构　湿地系统共十二套, 由 1m × 1m × 1m 的 A、B 两池串联, 中有隔板、底部 15cm 相连。系统基质共分二层, 底层 15cm 为直径 40—80mm 的花岗岩碎石, 上层为粒径 0—4mm 的细沙。其中 A 池沙深 55cm, B 池沙深 45cm。A 池中表面中央为一根上半

收稿日期: 1999-03-18; 修订日期: 2000-06-06
基金资助: 国家杰出青年基金项目(39925007); 欧洲联盟合作项目(合同号 ERBIC18CT960059)
作者简介: 吴振斌(1956—), 男, 湖北省黄梅县人; 研究员; 主要从事环境生物学研究
通讯作者: 陈辉蓉。实验及论文的写作过程得到夏宜铮、刘保元、刘永定、W Grosse、谭渝云、詹发萃、邓家齐、况琪军、庄德辉、李家儒等的帮助, 在此一并致谢

面截除的布水管, B 池填料表面为“H”型收集管, 两池底部有“H”型排空管。

1.2　植物　试验所选湿地系统的植物组合如表 **1**。

表 **1**　人工湿地系统植物组合

Tab. 1　Composition of macrophytes in the constructed wetland systems

系统 Plots	A 池 Chamber A	B 池 Chamber B
P1	芦苇 *Phragmites australis*	水葱 *Schoenoplectus lacustris*
P2	茭白 *Zizania latifolia*	石菖蒲 *Acorus tartarinowii*
P4	草 *Scirpus triqueter*	苔草 *Carex*
P6	无植物(对照) No species as control	

1.3　系统运转　湿地系统进水来自东湖附近池塘, 经蓄水池初步沉淀处理后作为湿地进水。在后文分析中, 以“进水 1(Inf. 1)”代表池塘水,“进水 2(Inf. 2)”代表沉淀 4—8h 后的系统直接进水。系统经过三个阶段的运行, 其水力负荷具体调整情况见表 2。其中 10 月 26 日至 11 月 5 日期间因进行污水藻毒素冲击实验, 水力负荷降低至 400mm/d。

表 **2**　人工湿地系统水力负荷变化

Tab. 2　Changes of hydraulic loading in constructed wetland

阶　段 Stage	运行日期 Operation time	水力负荷 Hydraulic load (L/d)	放水次数 Feeding times (Times/d)	平均水量 Average volume (L/Times/d)	停留时间 Retention time(h)
1	1998-06-01 启动	200	2	100	36
2	06—2~08—19	400	3	133	18
3	08—20~10—25	800	4	200	9
	10—26~11—5*	400	3	133	18
	11—6~	800	4	200	9

* 在此期间进行藻毒素冲击实验

1.4　测试　人工湿地系统自 **1997** 年 **10** 月开始运行, 每半月或一月采样一次, 测定系统进水及出水的理化因子及 N、P 等各项指标。总磷用过硫酸钾消解法, 可溶性无机正磷酸盐用钼锑抗分光光度法, 均参照水和废水监测分析方法[6]进行。

2　结果分析

人工湿地自 1997 年 10 月开始运行, 截止 1999 年 1 月共采样 20 次, 将此期间进出水总磷、无机磷含量变化按时间作图, 如图 1, 2。

从总磷和无机磷的浓度变化图可以看出进水浓度变化剧烈, 因进水来自鱼塘, 受天气、季节和人类活动的影响较大。进水中无机正磷酸盐(IP) 浓度与总磷(TP) 浓度密切相关, 符合方程: $IP = -0.0595 + 0.566TP$ ($r = 0.9109$, $p < 0.001$)

出水显示了一定的去除效果, 较明显的是 2 号和 4 号。无植物对照 6 号的浓度曲线明显高于其它系统, 并且有较大起伏。这一结果显示了湿生水生植物在人工湿地处理污水的过程中起到了重要作用, 其机制可能在于植物根系为微生物提供了附着物和代谢需要的氧气, 形成氧化态, 有利于好氧微生物分解矿化废水中有机物的作用[7—9, 11]。出水中的无机磷与总磷之间不再存在显著的相关关系, 而且无机磷占总磷的比例有所增加, 去除效果的变化与总磷不同。如在 5 月 26 日进水总磷浓度达到最高值(1.151mg/L), 出水

也受到影响, 1 号、4 号与 6 号出水出现明显上升, 但 2 号出水仍维持极低的总磷浓度(0.029mg/L), 同时各系统出水的无机磷浓度都较低, 去除效果较好。这一差异可能与不同形态磷在湿地中的分配与净化特性不同有关。以下按不同的水力负荷和停留时间, 将运行时期分三个实验阶段(排除藻毒素冲击实验阶段), 分别对各个时期的总磷、无机磷去除效果进行分析。

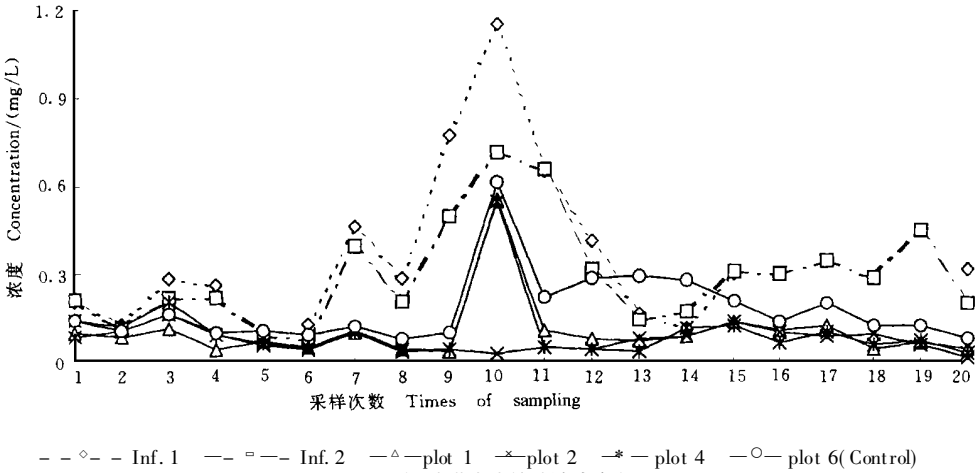

图 1 人工湿地进出水总磷浓度变化图

Fig. 1 Changes of total phosphorus concentration in inflow and outflow of constructed wetlands

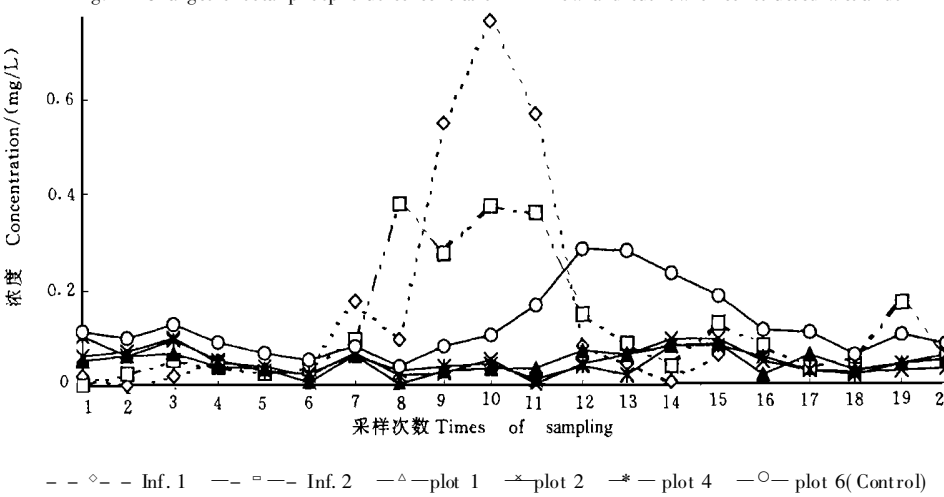

图 2 人工湿地进出水无机磷浓度变化图

Fig. 2 Changes of inorganic phosphorus concentration in inflow and outflow of constructed wetlands

第一阶段: 从系统运行至第二年(1998 年 6 月 1 日), 水力负荷 200mm/d, 停留时间 36 小时, 采样 10 次。进水总磷浓度平均为 0.277mg/L, 且起伏较大, 各系统出水浓度在 0.1mg/L 左右, 其中 2 号茭白—石菖蒲组合系统最低, 为 0.075mg/L, 6 号无植物对照系统最高, 达 0.163mg/L。去除率普遍达到 30%以上, 1 号, 2 号, 4 号, 6 号系统平均去除率分别为 53.5%, 59%, 43% 和 31.7%。无机磷方面, 进水无机磷在此期间平均浓度为 0.130mg/L, 标准差为 0.143, 显示出极大的波动性。相比之下, 出水无机磷浓度普遍较稳

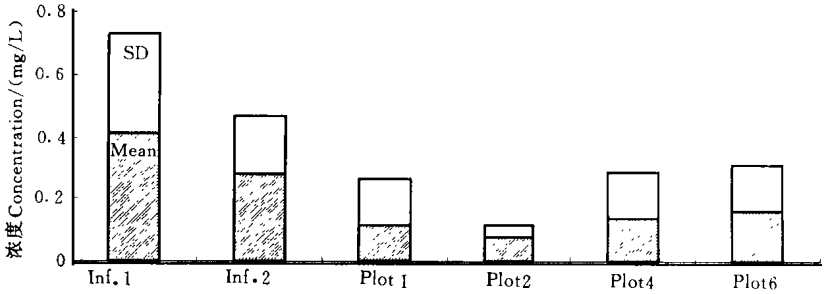

图 3　阶段一进出水总磷浓度比较

Fig. 3　Comparisons of TP concentration of inflow and outflow during stage I

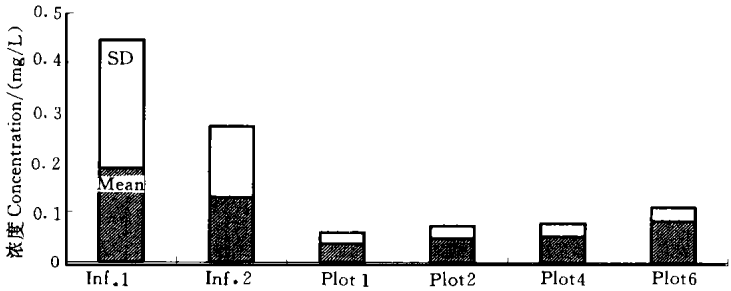

图 4　阶段一进出水无机磷浓度比较

Fig. 4　Comparisons of IP concentration of inflow and outflow during stage I

定, 变化幅度不大。1 号, 2 号, 4 号, 6 号的平均无机磷浓度分别为 0.038mg/L, 0.05mg/L, 0.054mg/L 和 0.085mg/L, 有一定的去除效果。在系统运行初期, 进水无机磷含量较低的情况下(0—0.05mg/L 之间), 各系统都出现了无机磷释放现象, 基质向系统中释放了磷酸盐, 致使出水无机磷浓度升高, 其中尤以 6 号最明显。这一磷释放现象其他研究者也有报道[7—9]。至春季以后, 各系统才开始显示对无机磷的去除效果。

第二阶段: 水力负荷 400mm/d, 停留时间 18h。采样 3 次, 进水总磷平均浓度为 0.373mg/L, 大大高于上一阶段, 但湿地系统的出水与上一时期相比, 去除效果和稳定性均有较大提高, 1 号, 2 号, 4 号及 6 号平均总磷浓度依次为 0.086mg/L, 0.059mg/L, 0.041mg/L及 0.266mg/L。3 个有植物系统去除率分别达到 70%, 74.25 和 85.7%, 以 4 号　草—苔草组合效果最好, 而且其标准差也最小, 仅为 6.2。这一阶段对照与有植物系统

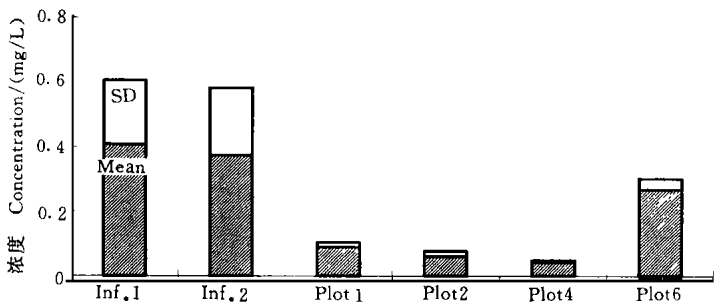

图 5　阶段二进出水总磷浓度比较

Fig. 5　Comparisons of TP concentration of inflow and outflow during stage II

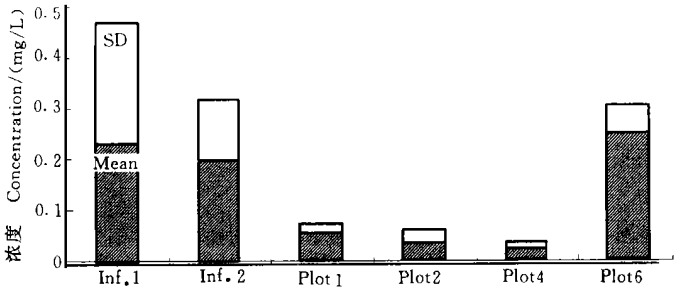

图 6 阶段二进出水无机磷浓度比较

Fig. 6 Comparisons of IP concentration of inflow and outflow during stage Ⅱ

的差异加大,对照 6 号的出水总磷浓度一直偏高,保持在 0.2—0.3mg/L 的水平,当进水的总磷浓度降低时仍维持这一水平,致使去除率降到 10% 左右,8 月 6 日的采样甚至出现出水高于进水的情况。无机磷的情况与此类似,6 号出现了其他系统所没有的磷释放现象。这一变化与植物的生长期重合,说明湿地中的植物在去除磷方面起着重要作用,并与植物的生长状况相关,在负荷增高,停留时间减少的情况下与对照相比显示出其稳定而高效的去除效果[7—10]。

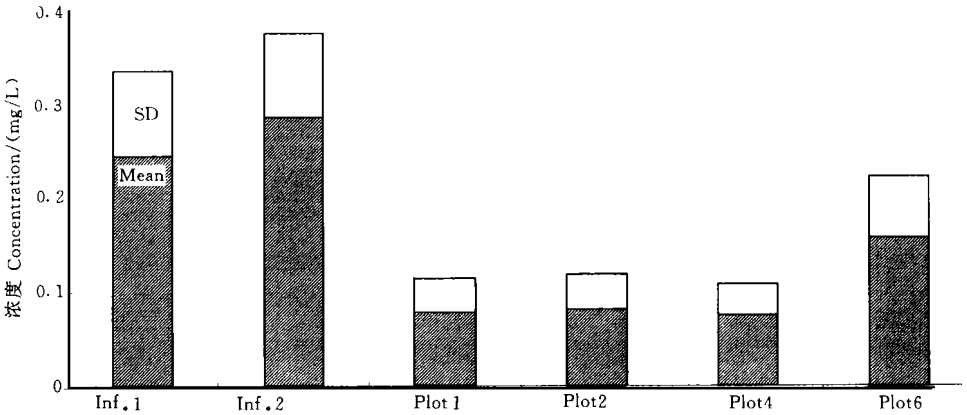

图 7 阶段三进出水总磷浓度比较

Fig. 7 Comparisons of TP concentration of inflow and outflow during stage Ⅲ

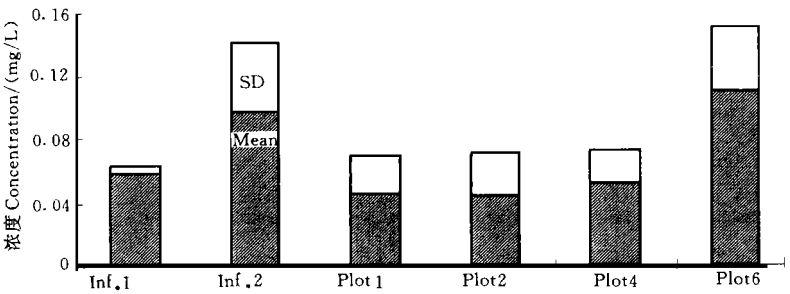

图 8 阶段三进出水无机磷浓度比较

Fig. 8 Comparisons of TP concentration of inflow and outflow during stage Ⅲ

第三阶段,从 8 月 20 日开始,进水负荷进一步加大,达到 800mm/d,停留时间减少到

9h。至 1999 年 1 月, 共采样 5 次, 进水总磷浓度平均为 0.309mg/ L, 仍维持较高水平。各系统出水有较大波动, 总体趋于一致, 1 号, 2 号, 4 号的总磷平均浓度分别为 0.078mg/ L, 0.081mg/ L 和 0.068mg/ L, 基本没有差异, 但各系统的标准差都在 0.03 以上, 4 号仍保持优于其他系统的去除率和稳定性。三套植物系统的平均去除率依次为 74.1%, 73.9%, 78.2%, 与上一时期相比变化不明显, 但 6 号对照系统与前两个时期相比, 达到了最好的净化效果, 总磷平均出水浓度为 0.134mg/ L, 平均去除率也达到 55.7%。同时 6 号无机磷的释放现象仍然存在。

整个运行过程中, 1 号、2 号、4 号、6 号的总磷去除率分别为 61%, 65%, 59% 和 28%, 三个有植物系统的去除率显著大于 6 号对照($P< 0.05$)。2 号系统的去除率最高, 但从前文分析中可知, 2 号系统仅在第一阶段具有最高的去除率, 在水力负荷上升的第二、三阶段, 4 号系统的去除效果一直优于其他三个系统。2 号系统总平均去除率较高可能是因为第一阶段运行时间较长所致。无机磷的浓度变化也显示出, 随着水力负荷的增加, 2 号系统出水中的无机磷浓度逐渐高于 4 号系统。但所有系统的无机磷去除率均较低。因此, 四个人工湿地系统中, 三个有植物系统的总磷去除率显著高于无植物对照, 2 号系统在系统运行初期总磷去除率最高, 水力负荷上升时, 4 号系统的总磷去除率超过 2 号。

3　讨论

水体中总磷主要由有机磷和无机磷组成, 其中每部分又分为可溶性和不溶性两种形态, 各种形态的磷在湿地中的循环和吸收过程受多种因素的影响, 有的并未完全为人们所了解。人工湿地对磷的去除一直是湿地设计者所关心的问题, 现有的湿地污水处理工程中, 对磷的去除常常不能达到令人满意的效果, 需要加大湿地面积, 增加停留时间以提高去除率, 而且冬季的去除效果也不能保证[1,2,5,7－10]。在该文中的湿地系统中由于采用了下行 —上行流的水力管理方式, 大大增加了湿地的作用面积, 减少了污水在系统中的停留时间, 平均停留时间仅有 18h, 与以往文献报道的湿地系统相比有极大的优势[5,9,12]。整个运行过程中, 水力负荷在该实验中不是决定湿地系统除磷效率的因子, 尤其是种植植物的湿地, 在水力负荷加倍时, 去除率也未明显下降, 仍然保持较高水平。

在该实验中, 有无植物在磷的去除率方面影响很大, 种植有植物的系统比无植物对照具有更高的去除率, 对照系统在各阶段的净化效果及稳定性均不及有植物系统。而且植物的生长状况直接影响到去除效果的好坏, 在春季和夏季, 植物生长迅速, 生物量增加, 对磷的吸收加快, 出水中磷含量减少, 而在秋季植物枯萎后, 吸收速度放慢, 冬季死亡的植株会释放磷到湿地中, 致使出水磷含量上升, 无机磷含量甚至高于进水。对照系统中由于没有植物的作用, 磷释放现象更为严重。不同的植物对磷的去除效果也不同, 2 号系统在整个运行期间的总磷平均去除率达到 65%, 但 4 号系统对高水力负荷的耐受力优于 2 号, 在水力负荷上升时, 去除率超过 2 号系统。

人工湿地进水中无机磷的含量与总磷密切相关, 说明进水中磷的成分比较稳定。但经过湿地处理后, 无机磷与总磷含量之间不再存在线性关系, 而且各系统出水中无机磷占总磷的比例都有了较大上升。各系统中还出现了磷释放现象, 无机磷比总磷的释放现象更为严重。从这些结果可以推断, 人工湿地对磷的去除主要是通过对不溶性磷的吸附和

沉积作用,植物、藻类等对无机可溶性磷酸盐的吸收作用并不明显。但通过小试系统中植物系统和无植物系统的比较,仍然可以看出植物的存在对人工湿地磷净化功能的实现有极大的作用。

该人工湿地实验系统的主要目的是发展处理城镇污水及地面水的低耗、高能的污水处理系统。经过一年多的运行,该系统显示出对来自城镇生活污水中去除总磷的良好效果,春夏季平均去除率在60%以上,即使在冬季也达到40%左右的去除率,出水总磷浓度达到或接近国家地面水Ⅱ级标准,处理效果接近二级生化处理厂,而且出水水质稳定,冬季仍能正常运行。在此人工湿地中,800mm/d的水力负荷还未超过系统的耐受水平,系统尚有较大的净化潜力。在以后的实验中,可适当加大水力负荷,以提高湿地净化污水的效率。因此,人工湿地作为占地少、易管理、效果好的污水处理系统,有一定的应用价值。

参考文献:

[1] Kickkuth R. Degradation and incorporation of nutrient from rural wastewaters by plant rhizosphere under limic conditions[A]. In: Utilization of Manure by Land Spreading, Commission of the Europe Communities[M], London, 1977, 243 —335

[2] Reed S C, Brown D S, Constructed wetland design-the first generation[J], *Wat. Res.* 1992, 64(6): 776—781

[3] Andrew P Kruzic. Natural treatment systems[J]. *Wat. Env. Res.* 1994, **66**(4): 357—361

[4] 诸惠昌,胡纪萃。新型废水处理工艺——人工湿地的设计方法[J]。环境科学, 1993, 14(2): 39—43

[5] 朱 彤,许振成,胡康萍,等。人工湿地污水处理系统应用研究[J]。环境科学研究, 1991, 4(5), 17—22

[6] 国家环境保护局编,水和废水监测分析方法(第3版)[M]。北京;中国环境科学出版社, 1989

[7] Gersberg R M. Elkins B V, Lynon S R et al. Role of Aquatic Plants in Wastewater Treatment by Artificial Wetlands [J], *Wat. Res.* 1986, 20(3): 363—368

[8] Brix H, Functions of Macrophytes In Constructed Wetlands[J], *Wat. Sci. Tech.*, 1994, 29(4): 71—78

[9] Tanner C C, Clayton J S, Upsdell M P. Effect of Loading Rate and Planting in Constructed Wetlands——Ⅱ. Removal of Nitrogen and Phosphorus[J], *Wat. Res.* 1993, 29(1): 27—34

[10] Lantzke I R, Heritage A D, Pistillo G, et al. Phosphorus Removal Rates in Bucket Size Planted Wetlands With A Vertical Hydraulic Flow[J], *Wat. Res.* 1998, 32(4): 1280—1286

[11] Armstrong J, Armstrong W. *Phragmites austrails*——a preliminary study of soil-oxidizing sites and internal gas transport pathways[J], *New Phytol*, 1988, 108: 372—382

[12] Breen P F, A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. *Wat. Res.* 1990, 24(6): 689—697

PRIMARY STUDIES ON THE PURIFICATION EFFICIENCY OF PHOSPHORUS BY MEANS OF CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM

WU Zhen-bin, CHEN Hui-rong, HE Feng, CHENG Shui-ping, FU Gui-ping,
JIN Jian-ming, QIU Dong-ru and REN Ming-xun
(State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract: Twelve sets of macrophyte-planted upflow-downflow constructed wetland systems were set up to treat municipal wastewater. Four of these plots were selected to study their purification efficiency of phosphorus under different hydraulic loading rates. The plots turned to be more stable and showed better purify efficiency of total phosphorus (TP) and inorganic orthophosphate (IP) through the operation. The average removal rates of total phosphorus are more than 40% in winter and 60% in summer. The outflow meets the grade Ⅲ national criteria of surface water (GB 3838-88). The planted plots have better and more stable purify efficiency than the control plot. From average removal efficiency. plot 2 with *Zizania latifolia* and *Acorus tartarinowii* was the best one with an average removal rate of TP 65%. But under higher hydraulic loading, plot 4 with *Scirpus triqueter* and *Carex sp*. was better than plot 2. The increasing of hydraulic load did not markedly influenced the efficiency of the plots.

Key words: Constructed wetland; Total phosphorus; Inorganic orthophosphate; Purification efficiency