

人工湿地污水处理的应用现状及前景展望

杨琼 陈章和 (华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

【摘要】 本文分析了人工湿地系统在污水处理中的作用, 叙述了人工湿地在发展中国家的应用现状及所取得的效果。人工湿地的特点适合我国国情, 特别适合广大农村、中小城市的污水处理, 在我国具有极其广阔的应用前景。对湿地用于污水处理方面的不足, 如缺乏污水对植物影响的研究 (特别是对乡土植物的研究)、缺乏对重要工艺的理解、人工湿地占地面积大等也进行了分析。

关键词 人工湿地 污水处理 现状

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1008-8873(2002)04-357-04

Application and prospect of constructed wetlands in developing countries / Yang Qiong, Chen Zhanghe (College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631)

Abstract This paper reviews application and effectiveness of constructed wetlands in developing countries. Constructed wetlands are suitable for wastewater purification in developing countries including China, especially in the rural areas and small cities. Constraints of wetlands for wastewater treatment application include poor understanding of the technology involved, lack of information on the impacts of wastewater to plants (especially to native plant species) and the large-scale land requirement for constructing wetlands than the traditional wastewater treatment plants.

Key words Constructed wetlands, Wastewater treatment, Application and prospect

人工湿地作为一种新兴的污水处理工艺, 兴起于70年代的西德、美国、澳大利亚、荷兰、丹麦、英国等发达国家, 因其建造及运转费用低、维护简单、适用面广、对负荷变化的适应能力强等特点, 广泛建立用于污水的二级和三级处理^[20], 过去10年人工湿地的发展极为迅速^[33]。对于缺少污水处理工艺的发展中国家而言, 人工湿地的研究还刚处于起步状态, 对某些重要工艺缺乏理解, 加上中西方文化的差异, 发达国家的构思不能很好地融入到发展中国家, 这些都阻碍了湿地的发展^[16]。人工湿地在过去几十年中显示了其优越性, 但我们也应看到人工湿地有其应用方面的局限性, 某些不足在以前的研究中有所报道^[12], 但对人工湿地的不足没有系统的评述, 本文主要介绍两方面的内容: 1. 人工湿地的应用现状及处理效果; 2. 人工湿地在污水处理方面的不足及前景展望。

1 人工湿地的应用现状

人工湿地在发达国家兴起, 其技术日趋完善, 现今北美有650座湿地用于污水处理, 欧洲有5000多座潜流型人工湿地运行^[21, 36]。湿地的应用范围很广, 如生活污水处理^[9]、矿区重金属污水^[32]、农业污水处理^[30]、城市暴雨处理^[18], 出水一般都优于常规二级处理效果。人工湿地可作高级处理, 如进一步净化常规污水处理厂的出水, 以补充淡水资源^[9], 以及用于大面积富营养化的湖泊水处理^[5, 6, 15]和用于自然资源的

保护^[37]。近年来, 有人建议利用湿地处理氮污染的地下蓄水层, 使已硝化的污水反硝化以达到农田灌溉的要求^[11]。人工湿地在发展中国家已初具规模, 但各国的发展水平不同, 有的刚起步, 有的已大规模地应用, 据所用植物类型不同, 可分为两大类型: 漂浮植物湿地和挺水植物湿地。

1.1 漂浮植物湿地

漂浮植物湿地适于热带和亚热带地区^[36], 主要植物为水葫芦 (*Eichhornia crassipes*), Vymazal 认为水葫芦生长繁殖快、生物量大、净化能力强, 特别适用于此类湿地。在摩洛哥的干旱地区, 种植水葫芦用于生活污水的净化^[24], 取得了较好的效果。在巴西, 水葫芦湿地用于小社区的污水处理也取得了成功^[31], 这一系统主要用于生活污水和禽畜排泄物的处理, 净化后的出水排入河流, 收割的植物用于生产沼气发电、园艺材料和动物饲料。我国利用水葫芦治理污水的历史较早, 也有许多利用其处理污水成功的事例, 新疆大学利用水葫芦净化麻黄素厂的污水, 在进水污染物浓度较高的情况下各种物质的去除率仍可达到80%左右^[1]。但对某些国家来说, 水葫芦是外来种, 生长迅速, 繁殖快, 能在很短的时间内占领水域耗尽氧气, 从而引起一系列的生态和经济方面的负效应, 如英国的

杨琼 (1977-), 女, 2000级硕士研究生, 主要从事生态学研究。电话: 85217922. E-mail: yangking78@sohu.com
2002-08-26 收稿, 2002-09-23 接受

Victoria 湖泊^[17]；我国许多地方也出现水葫芦造成生态危害的情况。因此，利用水葫芦等外来植物处理污水时，应注意防止其扩散。

1.2 挺水植物湿地

挺水植物种类繁多，由生长快、根系发达的植物组成，如芦苇属 (*Phragmites*)、香蒲属 (*Typha*)、蔗草属 (*Scirpus*) 等。摩洛哥利用芦苇床处理生活污水^[24]，水力负荷为 $86 \sim 144 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，有机质的去除率为 48%~62%，总悬浮物 (TSS) 为 58%~67%，寄生虫的去除为 71%~95%。埃及，生活污水中寄生虫的去除率达 100%^[35]。1991 年爱尔兰建立了芦苇潜流系统，面积为 150 m^2 ，有机负荷为 $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，COD、BOD、TSS、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和致病菌的去除率分别为 86%、90%、89%、34%、56% 和 99%，至 1998 年未出现堵塞现象^[10]。泰国的湿地系统主要是对氧化塘出水作进一步的净化^[27]，湿地种有香蒲的潜流型湿地，水质为含 $\text{Cu} \ 5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (国家规定排放污水中 Cu 含量最高不超过 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 并且难于降解 (COD : BOD = 17) 的工业废水，水力负荷为 $30 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，停留时间 (HRT) 3 d，BOD 的去除率很差，最高达 10%，但 TN、TP 和 Cu 的去除率较高，分别为 29%、30% 和 61%， Cu 的去除主要依赖土壤沉积，每千克干重的沉淀层土壤含 $\text{Cu} \ 7.6 \text{ g}$ ，植物吸收所占比例较小，每千克干重的香蒲中为 0.5 g。近几年，各国也开始研究本土植物的净化功能。乌拉圭，Okurutd 等^[29]在实验基础上证实了本土植物纸莎草 (*Cyperus papyrus*) 和芦苇处理城市污水的可行性，前者对各种物质的去除均优于后者。华南农业大学利用香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 和风车草 (*Cyperus alternifolius*) 处理猪场废水获得成功，BOD、COD、SS 的去除率均在 80% 以上^[4]。

由于污水处理工程耗资大，大多数发展中国家的污水处理系统不足，氧化塘 (Stabilization pond) 是传统污水处理的主要方式，氧化塘对 BOD、细菌的去除率较高，可达 90%~100%，但对 N、P 的效果差，只有 20%~50% (引起湖泊富营养化的主要因素)，人工湿地去除 N、P 的效果较好，弥补了这一不足^[9]。因此，现今发展中国家正致力将传统处理系统和人工湿地结合起来。化粪池 (septic tank) 和植物沙滤池 (soil filter) 组合成的“root zone”系统在巴西建立，这种结合使得 BOD、COD 的去除在原有基础上的 32% 和 33% 分别提高到 69% 和 71%^[28]。墨西哥于 1994 年发展了“两步系统” (two-stage system)，即在厌氧池后建有一个 600 m^2 的表面流湿地，湿地植物为芦苇和香

蒲，此系统用于屠宰场废水处理，HRT 为 1.7 d，BOD、COD、TSS、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和致病菌的去除率分别达到了 88.5%、87.4%、89%、73.6% 和 99%，出水可用于园艺灌溉，但随着时间的延长，P 逐渐积累于湿地系统使其饱和^[30]。尼泊尔正在研究湿地对小社区废水处理的潜力^[23]：水平流湿地 (HF, 140 m^2) 和垂直流湿地 (VF, 120 m^2) 结合以处理医院废水，水力负荷为 $10.7 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，经过一年的监测，COD、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、大肠杆菌和 TSS 的去除分别为 93%、97%、100%、74%、100% 和 98%。南非的表面流湿地能进一步提高潜流系统出水，使其达到一般标准^[12]。1999 年，肯尼亚在奈洛比建立了面积为 0.5 ha 的湿地，此湿地不仅用于 1 200 人的废水处理 (BOD、TSS、COD、致病菌、TN 和 TP 的去除率分别为 98%、67%~99%、94%~98%、99%~100%、87%~90% 和 88%)，同时也具有保护野生动物、提供休闲娱乐场所的作用^[26]。

漂浮植物生长速率快需要经常收割，从而增大了应用难度，挺水植物一年只需收割一次，同时还具有较大的生态效益，为鸟类等野生动物提供栖息场所，加上挺水植物根系发达，与土壤微生物形成生物膜又促进了污水的净化^[3, 13]，因此，挺水植物湿地在发展中国家的应用范围比漂浮植物湿地广。

2 人工湿地在污水处理方面的不足

人工湿地虽然有许多优点，但也存在很多不足，在应用人工湿地时一定要慎重考虑。

2.1 占地面积

目前，处理单位体积废水需要的土地面积没有统一的标准，据营养负荷估算出的土地需要值为 $10 \sim 20 \text{ pe} \cdot \text{ha}^{-1}$ ，结果偏高，而据水力负荷估算的土地需要值往往又偏低^[13]，不论如何，人工湿地的占地面积比传统处理工程大得多。目前关于单位面积人工湿地污水负荷量的报道数据相差巨大，三级处理的面积需要值从 $0.2 \sim 0.7 \text{ m}^2 \cdot \text{pe}^{-1}$ 不等^[13, 25]，因此，提高人工湿地的污水处理效率是今后的一大难题。另外，季节变化 (如温度、降雨量等) 限制了湿地的发展，在设计流量时应考虑这些因素。

2.2 种的研究

长期以来，发展中国家忽视了乡土品种的生态特性，在未考虑本地生态环境条件下盲目引进外来品种。印度通过多年对湿地物种的研究，已清楚的了解了本土植物和外来植物对水力、营养及其它因素所产生的不同反应，如长期的淹水使得大芦 (*P. kaeka*) 和花苞香蒲 (*T. augustata*) 生长不好，但象蒲香蒲 (*T.*

elephantine) 只在长期淹水条件下才会生长良好。植物种的不同特性影响到人工湿地的净化效率, 值得深入研究。湿地的生物多样性是湿地功能能否稳定发挥的重要因素, 人工湿地种群由于受到人为干涉, 缺乏自然调节机制, 生物多样性与自然湿地有很大的区别。但长期以来, 人工湿地生物多样性数据缺乏, 导致无法比较二者的不同。虽然, 发展中国家在湿地植物种研究方面有一定的进展^[3, 4], 但总的说来, 本地植物种在人工湿地污水处理系统中的应用研究还不够。

2.3 植物吸收

大多数植物中都存在“奢侈消费”(luxury consumption)现象, 污染物质能通过营养吸收而去除, 不同植物的吸收能力不同(表 1)。在田间条件下, 部分营养物质会随着植物的死亡而很快返回到湿地系统中, P 释放最常见^[7, 14]。通过营养吸收去除污染物的作用随着污水负荷的增大急剧下降, Peterson 和 Tenl 经过实验研究发现^[28]: 湿地系统中 N 的去除率为总 N ($5.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 的 38%, 而植物吸收的 N 只占 1%; 当 N 负荷增大至 $15.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 植物吸收 N 可达到 4%, 而整个 N 去除率为 68%, 这说明植物吸收不是湿地营养去除的主要原因, 但也有报道植物吸收占总 N 的 50%^[22], 因此植物的营养吸收功能有待进一步的研究。

表 1 不同植物的营养吸收能力(引自 Brix, 1994)
Table 1 Nutrient uptake capacities of several macrophytes
(from Brix, 1994) ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)

植物种类 Macrophytes	N 吸收量 Uptake capabilities of N	P 吸收量 Uptake capabilities of P
纸莎草 <i>Cyperus papyrus</i>	1 100	50
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	2 500	120
宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i>	1 000	180
凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	2 400	350
大藻 <i>Pistia stratiodes</i>	900	40
菹草 <i>Potamogeton pectinatus</i>	500	40
金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	100	10

另外, 植物从水体中(部分是从沉淀中)吸收的营养并不能随着植物地上部分的收割而去除, 植物的生长可以依赖地下有机质的循环而不需吸收额外的营养, 因此, 短间隔的收割虽有助于营养从水体中去除, 却消耗了地下有机体的光合作用产物, 导致植物地上部分生长不良而影响净化效果, 加上地下有机体分解缓

慢, 积累较多有机质于土壤中, 促使湿地“营养饱和”(这一现象很少见发展中国家报道)而不再具有净化功能, 许多研究自然湿地者都报道随着时间的延长和营养负荷的增加, N、P 的去除率下降。湿地处理能使废水中细菌数量下降, 但自从 Seidel 在 1964 年报道蔗草能减少致病菌的数量后, 一直没有证据证实植物能杀死致病菌, 相反地, 大型植物的存在更有利于致病菌的生存^[12]。

2.4 其它不足

发展中国家在建立人工湿地时未充分考虑废水水质和水力复杂性, 也缺乏对重要工艺动力学和净化机理的理解^[32]。实验室中, 人工湿地用于各种类型废水(工业和生活废水)的净化, 在实际应用中多用于生活污水的净化。发达国家的经验表明, 人工湿地更适宜出水水质要求较高的三级处理, 在用于二级处理时, 应在湿地前建造氧化塘或沉淀池等预处理系统。多数发展中国家的污水处理系统不健全, 只有部分大城市有能力实施二级处理, 三级处理只能是“纸上谈兵”。而且城市污水未分类排放, 污水中混杂无机和有机有毒物质, 这些有毒物质不仅影响微生物处理过程, 也影响湿地生物种群的发展。因此, 人工湿地达不到理想的净化效果。除了缺少理论依据外, 发展中国家也没有什么实践经验, 大部分结论都是直接引用发达国家的的数据或者从小试系统(50 m×50 m)的运行效果中得出的, 但小试系统得出的结论并不能说明在大型应用时也有同样的效果。目前, 最缺乏的就是长期运行系统的监测数据^[2], 从各项统计数据来看, 中国对湿地的监测数据大多在 1~2 年内。

3 人工湿地在我国的应用前景

人工湿地在我国的起步较晚, 主要集中于“七五”和“八五”期间。人工湿地有不足, 但其与传统污水处理厂相比, 其投资低、运行费用低、维护技术要求低、使用寿命也较长, 国外预计为 20 年^[25]。而且, 我国还处于社会主义初级阶段, 经济不发达, 难以普及耗费昂贵的传统二级活性污泥法, 加上中小城市和乡村缺乏具有一定操作管理和技术水平的人员, 人工湿地在某种情况下可能是唯一适用技术, 在中国有着极其广阔的应用前景, 特别是用于广大中小城镇、乡村和中小企业的污水处理。但我们对人工湿地的应用一定要持谨慎态度, 尤其要做到以下几点: 1. 因地制宜, 节约资金。发展以社区(如学校、医院、饭店等)为单位的人工湿地, 同时选择有一定坡度且较荒芜的地方以节约建造成本, 尽量使所占用的土地仍可发挥

其自然属性的作用, 这样, 既净化了废水又增加了绿地面积; 2. 与发达国家合作, 交流思想, 优化设计参数, 进一步研究湿地去污的机理。在实验基础上, 导出一些对人工湿地净化污水的有关参数间的数学关系式及基本规律, 以便对今后的实践有指导意义; 3. 选择适合的植物(尽量选择乡土植物), 增加湿地植物的多样性。合适的植物及科学组合对湿地功能的发挥非常关键, 在选择时不仅要考虑植物的耐污性及净化能力, 也要考虑生长速度以节省收割费用; 4. 在湿地应用过程中防止疾病的传播, 保护大众的身心健康, 同时要避免二次污染的发生, 防止污水下渗污染地下水, 慎重处理湿地污泥和收割的植物残渣。

参考文献

- 1 艾尔肯 热合曼, 阿布都克力木 热合曼, 吾甫尔 米吉提, 等. 2000. 利用水浮莲净化麻黄素厂污水的中试研究[J]. 中国环境科学, **20**(5): 409-413
- 2 白晓慧, 王宝贞, 余 敏, 等. 1999. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, **32**(6): 88-92
- 3 成水平, 夏宜铮. 1998. 香蒲、灯心草人工湿地的研究——净化污水的机理[J]. 湖泊科学, **10**(2): 65-70
- 4 廖新佛, 骆世明. 2002. 香根草和凤车草对猪场废水的处理[J]. 应用生态学报, **13**(1): 113-117
- 5 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 1998. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用[J]. 中国环境科学, **18**(5): 410-414
- 6 王庆安, 任 勇, 钱 骏, 等. 2000. 人工湿地塘床系统净化地表水的试验研究[J]. 四川环境, **19**(1): 9-15
- 7 吴振斌, 陈辉蓉, 贺 锋, 等. 2001. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, **25**(1): 28-34
- 8 诸惠昌, D K Stevens. 1996. 用人工湿地处理乳制品厂废水的研究[J]. 环境科学, **17**(5): 30-32
- 9 Amelia K. Kivaisi. 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. *Ecol. Eng.*, **16**: 545-560
- 10 Badkoubi A, Ganjidoust H, Ghaderi A, Rajabu A. 1998. Performance of subsurface wetland in Iran[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 345-350
- 11 Baker L A. 1998. Design considerations and applications for wetland treatment of high nitrate waters[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 389-395
- 12 Batchelor A, Loots P. 1997. A critical evaluation of a pilot scale subsurface flow wetland: 10 years after commissioning[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **35**: 337-343
- 13 Brij Gopal B. 1999. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment :potentials and problems[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **40**: 27-35
- 14 Brix H. 1994. Functions of Macrophytes In Constructed Wetlands [J]. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(4): 71-78
- 15 D'Angelo E M, Reddy K R. 1994. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: role of inorganic electron acceptors in nutrient release[J]. *J. Environ. Qual.*, **23**: 937-943
- 16 Denny P. 1997. Implementation of constructed wetlands in developing countries[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **35**: 27-34
- 17 Greenway M. 1997. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **35**: 135-142
- 18 Gopal, B. 1999. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment potential problems[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **40**: 27-35.
- 19 Havens K J, Priest W I and Berquist H. 1997 Investigation and long term monitoring of *Phragmites australis* within Virginia's constructed wetland site[J]. *Environ. Manage.*, **21**: 599-605
- 20 Kadlec R and Knight R L. 1995. Treatment wetlands. Lewis Publishers[M]. USA: Boca Raton, FL. 28-40
- 21 Kadlec H R Knight R L. 1996. Treatment wetlands Lewis[M]. Boca Raton, New York, London, Tokyo: 893
- 22 Koottatep T, Polprasert C. 1997. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **36**: 1-8
- 23 Laber J, Haberl R, Shrestha R. 1999. Two stage constructed wetlands for treating hospital wastewater in Nepal[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **40**: 317-324
- 24 Mandi L, Bouhourm K, Ouazzani N. 1998. Application of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in cold climate[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 379-387
- 25 M B Green, P J O'Connell, P Griffin. 1998. Uprating and rescuing small wastewater treatment facilities by adding tertiary treatment reed beds[J]. *Water Environ. Res.*, **70**: 1307-1313
- 26 Nyakang'o L B, Van Bruggen M A.. 1999. Combination of a well functioning constructed wetlands with a pleasing landscape design in Nairobi Kenya[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **40**: 249-256
- 27 Panswad T, Chavalparit O. 1997. Water quality and occurrence of protozoa and metazoa in two constructed wetlands treating different wastewater in Thailand[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **36**: 183-188
- 28 Peterson S B and Teal J M. 1996. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems[J]. *Ecol Eng.*, **6**: 137-148.
- 29 P Griffin and C Pamplin, 1998. The advantages of a constructed reed bed based strategy for small sewage treatment works[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 143-150
- 30 Rivera R, Warren A, Curds C R., Robles E, Gutierrez A., Gallegos E., Caldeffin A. 1997. The application of the root zone method for the treatment and reuse of highstrength abattoir waste in Mexico[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **35**: 271-278
- 31 Russel, R C. 1999. Constructed wetlands and mosquitoes: Health hazards and management options-An Austrslian perspective[J]. *Ecol Eng.*, **12**: 107-124.
- 32 Sanders Frank. 1999. Wetlands treat mine runoff[J]. *Civil engineering*, **69**(1): 52-55.
- 33 Scott W. 2001. Advanced designs for constructed wetlands[J]. *BioCycle*, **42**(6): 40-43.
- 34 Sinicrope T L, Largis R, Gersberg R M, Busanardo M J, Zedler L B. 1992. Metal removal by wetland mesocosms subjected to different hydroperiods[J]. *Ecol. Eng.*, **1**: 309-322.
- 35 Stotts R, Jenkins T M, Bahgat M, and Shalaby I. 1998. Capacity of constructed wetlands to remove parasite eggs from wastewater in Egypt[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 117-123.
- 36 Vonxperling, M. 1996. Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **33**: 59-72
- 37 Worrall P, Peberdy K J, Millet M C. 1997. Constructed wetlands and nature conservation[J]. *Wat. Sci. Tech.*, **35**: 205-213