

# 人工湿地植物根区微生物 与净化效果的季节变化\*

梁 威<sup>1,2</sup> 吴振斌<sup>1</sup> 詹发萃<sup>1</sup> 邓家齐<sup>1</sup>

(1:中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室,武汉 430072;

2:清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084;)

**提 要** 人工湿地污水处理系统具有净化效果显著、建设和运行费用低廉、管理简便等优点,近年来越来越受到人们的重视. 人工湿地生态系统受环境影响较大,研究人工湿地在不同季节的净化功能对于充分发挥其作用具有重要意义. 对不同季节的芦苇 (*Phragmites australis*)、茭白 (*Zizania caduciflora*) 和香蒲 (*Typha latifolia*) 等湿地系统植物根区、无植物对照基质微生物分布状况以及净化效果进行了研究,结果显示:(1) 种植不同植物的湿地系统根区微生物数量不同,其湿地净化效果也不同;(2) 季节变化显示湿地系统秋季的细菌总数量比夏季高;但对照系统夏季的真菌和放线菌数量明显高于秋季;(3) 湿地系统总磷(TP)的去除率夏季高于秋季;(4) 相关性分析发现湿地植物根区的细菌总数与 BOD<sub>5</sub> 的去除率之间存在显著相关性;而根区微生物数量与 TP、COD<sub>Cr</sub> 和凯氏氮(KN)的去除率之间不存在显著相关性,具体机理还需进一步研究.

**关键词** 季节变化 根区微生物 净化效果 人工湿地

**分类号** X172

人工湿地污水处理系统具有净化效果显著、建设和运行费用低廉、管理简便等优点,近年来越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>. 人工湿地处理污水时,有机物的降解和转化主要是由湿地微生物活动来完成的,人工湿地中微生物的活动是废水中有机物降解的基础机制<sup>[2-4]</sup>. 因此,研究人工湿地植物根区微生物的区系分布和数量,对深入探讨构建湿地系统的功能及其净化机理很有必要. 同时,由于人工湿地生态系统中的植物和湿地微生物受环境影响较大,不同季节由于外界环境条件的差异,其净化效果也会有较大差别. 研究人工湿地净化功能的季节变化对于充分发挥其作用,必将具有重要意义. 在本试验中,研究了夏、秋季芦苇等湿地系统的植物根区微生物数量,以及不同系统同期的污水净化效果的变化,得出了一些有意义的结论,这些结果可为进一步研究揭示微生物在人工湿地净化中的作用机理提供参考.

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

该湿地系统采用了复合垂直流程结构设计<sup>[5]</sup>,由 1m × 1m × 1m 两个池串联而成,在人

\* 国家杰出青年科学基金项目(39925007)以及中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102)联合资助. 2003-12-12 收稿;2004-02-26 收修改稿. 梁威,男,1971年生,博士后,Email: liangwei02@tsinghua.org.cn.

工湿地系统中分别种植了芦苇 (*Phragmites australis*)、茭白 (*Zizania caduciflora*) 和香蒲 (*Typha latifolia*) 等植物, 另外设立了无植物的对照系统. 至实验时湿地系统已经正常运行了两年时间, 取得了较为理想而稳定的处理效果. 系统进水来自东湖的茶港排污口, 水力负荷为 600mm/d, 滞留时间约 14 h.

在夏季的 6 月和秋季的 11 月每周分别取样进行研究, 其中植物根区材料主要是取植物的根部及附着基质 (表面下大约 5cm 处), 对照系统基质取自表层下大约 5cm 处基质层. 取样后, 按照文献方法进行处理<sup>[6]</sup>.

### 1.2 微生物数量测定

根区及基质微生物数量的测定参照文献<sup>[6]</sup>进行, 其中细菌、真菌和放线菌的培养分别采用土壤浸出液琼脂、查彼克氏培养基和改良高氏 1 号培养基.

### 1.3 理化参数指标的测定

湿地系统处理污水前后的 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Cr</sub>, KN 和 TP 等理化参数按照文献 [7] 进行测定. 其中 BOD<sub>5</sub> 的测定采用经典的稀释接种法; COD<sub>Cr</sub> 的测定采用重铬酸钾法; 氮的测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; 总磷的测定采用过硫酸钾消解法.

## 2 结果和讨论

### 2.1 不同季节人工湿地系统微生物的数量分布

实验期间的芦苇等系统植物根区以及无植物对照系统基质的微生物数量统计结果表明 (表 1). 在夏季 (6 月), 茭白和宽叶香蒲系统植物根区的细菌总数是芦苇的 2 倍和对照的 4 倍; 芦苇和茭白植物根区以及对照系统的真菌数量相差不大, 但芦苇和茭白根区的真菌数量明显高于香蒲系统. 除了香蒲系统放线菌数量较少外, 芦苇、茭白和对照系统的放线菌数量相差不大.

表 1 实验系统植物根区的微生物数量

Tab. 1 Total numbers of microorganisms in the experimental Small Scale Plots (SSPs)

系 统	细 菌 ( $\times 10^8$ ind./g)		真 菌 ( $\times 10^4$ ind./g)		放线菌 ( $\times 10^5$ ind./g)	
	6 月	11 月	6 月	11 月	6 月	11 月
对照系统	1.5	3.9	79.0	3.6	92.0	3.0
芦苇系统	2.4	28.2	71.0	98.2	74.0	121.0
茭白系统	6.1	51.8	96.0	139.7	121.0	87.0
香蒲系统	5.7	32.5	10.0	66.9	42.0	17.0

在秋季 (11 月), 所有实验系统植物根区的细菌数量都多于对照, 但是在芦苇、茭白和香蒲三个系统之间则相差不大. 芦苇等三个系统根区的真菌数量也相差不大; 但实验系统中的放线菌数量却相差很大, 其中芦苇系统数量最高, 而香蒲系统则最少. 总之, 芦苇、茭白、香蒲以及对照系统秋季的细菌总数明显高于夏季; 但对照系统夏季的真菌和放线菌数量明显高于秋季. 至于真菌和放线菌, 芦苇等实验系统夏秋季的差距不大.

### 2.2 人工湿地对污水中 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 的去除

由于一些自然和人为原因影响, 实验系统秋季 (11 月) 取样未能取得有效的 BOD<sub>5</sub> 和

表 2 人工湿地小试系统在夏季对污水中 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 的去除Tab. 2 Removal rates of BOD<sub>5</sub> and COD<sub>Cr</sub> in the SSPs in summer

系 统	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	去除率 (%)	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	去除率 (%)
系统进水	17.22		69.35	
对照系统	1.39	91.9	19.35	72.1
芦苇系统	1.36	92.1	51.61	25.6
茭白系统	1.07	93.8	29.03	58.1
香蒲系统	1.17	93.2	22.58	67.4

COD<sub>Cr</sub> 的值。由表 2 可见,在夏季实验的四套系统 BOD<sub>5</sub> 的去除率都很高,都达到 90% 以上;而且在对照和三套种有植物的系统之间也不存在明显的统计学差异。相关分析发现:植物根区细菌总数与 BOD<sub>5</sub> 去除率之间存在极显著的相关性 ( $r=0.9758, p < 0.01$ ) (图 1),但真菌 ( $r = -0.0718, p > 0.05$ ) 和放线菌 ( $r = 0.2255, p > 0.05$ ) 数量与 BOD<sub>5</sub> 去除率之间相关性不明显。这些研究结果与李科德等在芦苇床系统中的研究结论类似<sup>[8]</sup>。

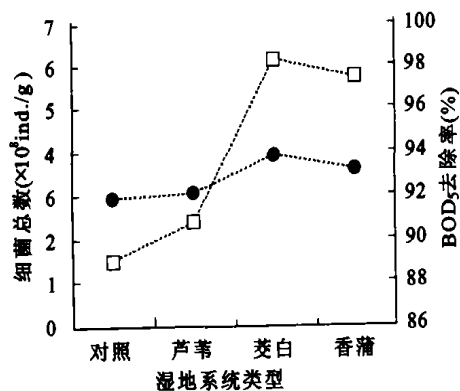
图 1 实验湿地小试系统夏季根区细菌总数与 BOD<sub>5</sub> 去除率的相关性

Fig. 1 Correlation between total number of bacteria in the macrophytes root-zones in summer and removal rates of BOD<sub>5</sub> in the experimental SSPs

在夏季,对照和香蒲湿地系统的 COD<sub>Cr</sub> 的去除率较高,分别达到 72.1% 和 67.4%;而芦苇系统的去除率则相对较低,只有 25.6%。通过对根区微生物数量与系统 COD<sub>Cr</sub> 去除率的相关性分析,结果发现湿地植物根区微生物数量(细菌、真菌和放线菌)和 COD<sub>Cr</sub> 去除率之间不存在显著性相关关系 ( $p > 0.05$ )。这一结论与李科德等的研究结果不同<sup>[8]</sup>,其具体原因还需进一步研究。

### 2.3 人工湿地对污水中 KN 和 TP 的去除

由表 3 可见,在夏季,芦苇、茭白以及对照系统的 KN 去除率较差,香蒲系统的去除率相对较好;而在秋季,芦苇、茭白和对照系统的 KN 去除率有所提高,而香蒲系统则略有下降。通过相关性分析发现,湿地根区真菌总数与 KN 的去除率之间存在着显著的负相关 ( $r = -0.5849, p < 0.05$ ),而根区细菌和放线菌总数与 KN 的去除率不存在显著相关关系。这可能是由于真菌具有强大的酶系统,能促进纤维素、木质素、果胶等的分解,并能将蛋白质最终分解释放出氨的缘故<sup>[9]</sup>。

表 3 人工湿地小试系统中 KN 和 TP 的去除

Tab. 3 Removal rates of KN and TP in the SSPs

系 统	KN 去除率 (%)		TP 去除率 (%)	
	6 月	11 月	6 月	11 月
对照系统	16.4	46.4	0	0
芦苇系统	10.6	30.6	58.3	0
茭白系统	21.5	34.4	36.0	0
香蒲系统	74.9	23.5	66.2	26.5

同时,在夏季,芦苇和香蒲系统对总磷(TP)的去除率较高,但茭白系统的TP去除率较低,而对照则几乎没有去除效果。但秋季则有所不同,除香蒲系统外,芦苇、茭白以及对照系统基本上对TP没有什么去除效果。这可能是因为小试系统秋季进水中磷含量过低以及秋季植物落叶等降解导致植物体内磷释放所致<sup>[10-12]</sup>。

通过对根区细菌、真菌和放线菌数量与TP去除率的相关性分析发现,在植物根区细菌( $r = -0.4094$ ,  $p > 0.05$ )、真菌( $r = -0.3580$ ,  $p > 0.05$ )以及放线菌( $r = -0.1285$ ,  $p > 0.05$ )总数量与TP去除率之间均不存在显著相关关系。这说明人工湿地净化去除TP的过程中微生物的作用可能不是主要因素,此结论与Reddy等人的研究结果相似<sup>[8,9,13,14]</sup>。

### 3 讨论

由于人工湿地这一生态工程建在野外,受自然环境条件的影响很大,因此季节变化对湿地净化功能的发挥有一定的影响。影响主要可以分为两个方面:

#### 3.1 温度变化对人工湿地净化效果的影响

由于湿地的净化作用主要是湿地微生物来完成的,而温度对微生物的生长繁殖以及活性都有显著影响<sup>[15-17]</sup>。不同季节植物的生长状况和代谢活动不相同,因而湿地植物吸收和利用有机物质等的的能力也存在着显著差异。杨昌凤等人在模拟人工湿地处理污水的实验研究中发现,在气温在22-32℃范围内,池杉(*Taxodium ascendens*)系统对KN的去除率随着温度的升高而增大<sup>[18]</sup>。不过,也有人发现短期的温度变化对氮磷的去除率影响不大;但如果长期的温度变化将会导致营养物质的去除率发生改变<sup>[10]</sup>。据分析可能是因为短期温度变化中湿地中微生物的种群并未发生改变,但是如果温度变化的时间相对长一些,例如几个星期时间,则人工湿地中的微生物群落将会由于适应新的环境而导致数目和种类的改变,从而也影响了人工湿地对污水中营养物质的去除效果<sup>[10]</sup>。

笔者实验中也发现秋季和夏季的根区微生物数量有显著变化,秋季其根区细菌数量较夏季有明显增加,研究同时发现除香蒲湿地系统外,其它湿地系统秋季对KN的去除率较夏季有明显增加。

#### 3.2 湿地植物生长状况对人工湿地磷净化效果的影响

人工湿地对污水中磷的去除主要是由基质的吸附、植物吸收及微生物富集等途径来完成的<sup>[13,19]</sup>。如同无机氮一样,污水中的无机磷在植物吸收及同化作用下,可变成植物的有机成分(如ATP, DNA, RNA等)<sup>[20,21]</sup>。虽然研究发现磷的去除过程中湿地植物通过吸收去除的磷只占很小的比例,但由于湿地植物的生物量很大,所以湿地植物在人工湿地净化磷中也起着十分重要的作用。吴振斌等<sup>[22]</sup>通过对芦苇、茭白、蔗草(*Scirpus triquetus*)以及对照人工湿地系统对污水磷的净化效果研究中发现:有无植物系统在磷的去除方面影响很大,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。不仅如此,湿地植物不同生长状况、在不同的季节条件下,其系统磷的净化效果也不相同。在春季和夏季,由于湿地植物生长迅速,生物量大量增加,需要从系统中吸收利用一部分氮磷等营养物质,所以系统对磷的平均去除率达到60%以上;而在秋冬季由于植物慢慢枯萎,导致植物生长速度放慢,甚至由于枯枝落叶的腐烂降解而释放出体内的磷等有机物质,所以导致湿地的净化效果,特别是磷的净化效果,降低甚至是完全失去净化能力,秋

冬季系统对磷的平均去除率只有 40%。

本实验中也发现了相似的规律,夏季芦苇、茭白和香蒲湿地系统对总磷的去除率分别为 58.3%, 36% 和 66.2%, 无植物的对照系统对总磷基本没有去除效果。芦苇等系统秋季(11 月)磷的净化效果较夏季显著降低,对照、芦苇和茭白的对磷基本没有净化效果,而香蒲系统的总磷去除率也只有 26.5%。由此可见,有无植物以及植物的生长状况对湿地系统对污水中总磷的去除有很大关系。因此,为了提高系统的总磷去除率,应对湿地植物定期进行收割,以防植物残体腐烂以及营养物质重新释放进入人工湿地废水处理系统;如果湿地用于净化重金属以及有些难降解的有机和无机污染物,对湿地植物也应该及时处理,以防对环境造成二次污染。

致 谢 参与工作的还有成水平,付贵萍,刘得元副研究员,贺峰,熊丽,周巧红,任远明等,在此深表感谢。

### 参 考 文 献

- 1 刘超翔,胡洪营等. 人工复合生态床处理低浓度农村污水. 中国给水排水, 2002, 18(7): 1-4
- 2 Ottová V, Balcarová J & Vymazal J. Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1997, 35: 117-123
- 3 Kadlec R H. Chemical, Physical and Biological Cycles in Treatment Wetlands. *Water Science and Technology*, 1999, 40: 37-44
- 4 Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of the wetland plants - the root-zone method. *Water Science and Technology*, 1987, 19: 107-118
- 5 梁 威,吴振斌等. 构建湿地基质微生物类群与污水净化效果及其相关分析. 中国环境科学, 2002, 22(3): 282-285
- 6 中国科学院南京土壤研究所微生物室 编著. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985
- 7 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- 8 李科德,胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理. 中国环境科学, 1995, 15(2): 140-144
- 9 成水平,夏宜珍. 香蒲、灯心草人工湿地的研究——3. 净化污水的机理. 湖泊科学, 1998, 10(2): 66-71
- 10 Damir Brdjanovic, Susanne Logemann, et al. Influence of temperature on biological phosphorus removal: process and molecular ecological studies. *Water Research*, 1998, 32(4): 1035-1048
- 11 Samuel A, McClintock, Clifford W Randall, et al. Effects of temperature and mean cell residence time on biological nutrient removal processes. *Water Environment Research*, 1993, 65(2): 110-118
- 12 Mino T, M Van Loosdrecht C M, et al. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Water Research*, 1998, 32(11): 3193-3207
- 13 Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes. *J Environ Quality*, 1983, 12: 137-141
- 14 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展. 湖泊科学, 1996, 8(2): 268-273
- 15 Crites R W. Design criteria and practice for constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1994, 29: 1-6
- 16 Gearheart R A. Use of constructed wetlands to treat domestic wastewater, city of Arcata, California. *Water Science*, 1992, 26(7-8): 1625-1637
- 17 Knight R L, McKim T W, et al. Performance of a natural wetland treatment system for wastewater management. *J WPCF*, 1987, 59: 746-754
- 18 杨昌凤,谢其明. 模拟人工湿地处理污水的试验研究. 应用生态学报, 1991, 2(4): 350-354
- 19 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86
- 20 Reddy K R. Diel Variations in Physic-chemical parameters of water in selected aquatic systems. *Hydrobiologia*, 1981, 85:

201 - 207

- 21 梁威,吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展. 环境科学动态, 2000, 3: 32 - 37
- 22 吴振斌,陈辉蓉等. 人工湿地磷的去除研究. 水生生物学报, 2001, 25(1): 28 - 35

## Seasonal Variation of Macrophytes Root-zone Microorganisms and Purification Effect in the Constructed Wetland System

LIANG Wei<sup>1,2</sup>, WU Zhenbin<sup>1</sup>, ZHAN Facui<sup>1</sup> & DENG Jiaqi<sup>1</sup>

( 1: State Key Lab of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, CAS, Wuhan 430072, P. R. China;  
2. Environment Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China )

### Abstract

Constructed wetland systems are increasingly used to treat domestic sewage, industrial wastewater and agricultural runoff in recent years. The wetland treatment process has been gaining international interests and applications due to its low maintenance and operational cost, and high removal capacity. Because environment has significant effects on the purification ability of constructed wetland systems, it is very necessary to study purification effects of constructed wetland systems in different seasons. In the paper, seasonal variation of the distributions of microorganism in the root-zones of wetland plants (*Phragmites australis*, *Zizania caduciflora*, *Typha latifolia* etc.); the substrate layers of control SSPs, together with the effects of wastewater treatment were studied. The results are as follows: (I) the numbers of microorganisms in the different plant root-zones were different; the purification effects were also different. (II) The numbers of bacteria in the fall were higher than those in the summer for the three plant zones and the control, and the number of fungi and actinomycetes in summer was much higher than that in the fall for control. (III) TP removal showed a higher efficiency in summer than that in fall. (IV) Significant positive correlation between total number of bacteria in the wetland plant root-zones and removal rate of BOD<sub>5</sub> was found; while no significant correlation between root-zone microorganisms and removal rates of TP, COD<sub>Cr</sub> and KN were detected. The mechanism resulting in the above results remains to be further researched.

**Keywords:** Seasonal variation; root-zone microorganism; purification effect; constructed wetland