

# 污水净化湿地模拟系统中细菌和藻类的生态分布研究\*

634-63P

X172  
X705

陈博谦 尹澄清

(中国科学院生态环境研究中心, 环境水化学国家重点实验室 北京 100085)

**摘要** 以湿地土壤-微生物模拟系统为基础,研究了细菌和藻类在不同处理单元中的生态分布和种类变化。随着系统中微生物的净化作用,污水中污染物浓度下降,污染负荷降低,细菌和藻类的种类和数量也发生相应的变化。系统中,藻类种类由耐污种类向喜清种类过渡,显示了藻类是良好的水质评价和监测的指示生物。细菌总量降低,第4单元中的细菌总量比第1单元要低2个数量级。Margalef多样性指数逐渐升高,第1单元为0.38,第2单元为0.60,第3单元为0.69,第4单元为0.87,系统中的反硝化率在第2单元处最高,在第4单元处最低,垂直分布以2cm深度处最高。

**关键词:** 湿地模拟系统,细菌,藻类, Margalef多样性指数,反硝化率。

4.5.5.5

## THE ECOLOGICAL DISTRIBUTIONS OF BACTERIA AND ALGAE IN THE STIMULATING WETLAND SYSTEM

Chen Boqian Yin Chengqing

(SKLEAC, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

**Abstract** With a stimulated wetland system, the ecological distributions and species changes of bacteria and algae in the different treatment blocks were studied. The species and numbers of bacteria and algae changed according to the concentration decline of pollutants. In the different treatment blocks, the bacteria species of the biofilms and algae changed from pollution-tolerant ones to more diverse species. It was found that that algae were good biological indicators of water quality. The Margalef diversity index increased gradually along the treatment system. It was 0.38 in the 1st block, 0.60 in the 2nd, 0.69 in the 3rd and 0.87 in the 4th. The denitrification rate in the 2nd block was the highest among the four blocks and it was the highest in the depth of 2cm along the soil profile, while the rate was the lowest in the 4th block.

**Key words:** stimulated wetland system, bacteria and algae, Margalef diversity index, denitrification rate.

\* 国家自然科学基金[59378342]和中国科学院生态环境研究中心主任基金资助项目。

收稿日期:1997-05-21,修改稿收到日期:1997-10-27。

在湿地的污水净化过程中,微生物起着重要的作用<sup>[1~5]</sup>。一方面,它们是湿地生态系统的重要组成部分,其数量和种类影响着生命元素的生物地球化学循环;另一方面,它们可以分解污水中的有机污染物,吸附其他污染物质,达到改善水质净化水体的目的。细菌和藻类在湿地系统中的分布是广泛的<sup>[6]</sup>,组成种类也是复杂多样的<sup>[7]</sup>。不同的菌种在污水处理中发挥着各自的作用。藻类在不同的水体中具有特定的组成种类。它们的数量和种类的变化,并因此而导致的结构和功能的变化,反映了环境中水质的变化。由此人们用它作为水质监测和评价的重要参数<sup>[8]</sup>。

污水中大多存在着较高的氮素营养。大量的含氮化合物流入自然水体中,特别是相对静止的湖水,是水体富营养化的原因之一。有鉴于此,人们采用了一些生物和理化的方法来降低污水中的氮负荷<sup>[9]</sup>。这些方法包括细菌的硝化和反硝化、藻类的吸收、吸附气态、离子交换等方法。其中细菌的硝化和反硝化方法是高效可靠的方法。

以往<sup>[10~12]</sup>的研究大多将湿地处理系统作为一个整体来分析去除污染物的规律,对系统中由于条件不同所造成的地带处理效率差异未见报道。因此,本文以已建的湿地土壤-微生物模拟系统为基础,调查了细菌在系统中的分布规律和种类变化,分析它们与地带污染物浓度之间的关系,研究其在污水处理和降低污染负荷方面的作用,并利用藻类的种类和数量的变化作为评价水质情况的参数。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 模拟系统的建立

模拟系统分为4个单元,每个单元长度为3m,总长12m,平均土壤深度10cm,日进污水量平均为500ml,水深2cm,停留时间为24h。

模拟生活污水参数:总氮274mg/L、总磷154mg/L、TOC 1018mg/L,污水主要由葡萄糖、硝酸钾、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、碳酸氢钙、牛肉膏等成分组成<sup>[13]</sup>。

### 1.2 细菌样品的采集和鉴定

在模拟系统每一单元,即系统的3m、6m、9m、12m处,采取土壤表层、2cm、5cm的菌落。采用平板稀释法<sup>[14]</sup>计算土壤表层细菌总数。参照文献<sup>[14]</sup>计算土壤表层、2cm、5cm深土壤好氧异养细菌的个数。

### 1.3 藻类种类和数量的测定

从不同的单元中采取一定量的水样,在光学显微镜下按文献<sup>[15]</sup>的方法,进行分类和计数,多次计数后,计算其平均数,考虑单元水体体积,以得出系统的藻类数量。

### 1.4 反硝化势的测定

称取硝酸钾(分析纯)3.6070g溶于500ml的容量瓶中,蒸馏水定容,得到1mg N/ml的硝酸钾标准溶液。使用分光光度法测定硝酸钾标液的标准曲线。称取20g土样,加入5ml硝酸钾标准溶液和25ml蒸馏水(去氨水)。密封后,放入10℃、18℃、32℃、40℃恒温箱中培养。每个土样重复3个样品。7d后,取出样品,用2mol氯化钾25ml提取硝酸钾。方法是:振荡1h后,取样,离心,过滤。提取上清液测定硝酸钾含量,其减少部分即为反硝化损失量,测定方法采用分光光度法<sup>①</sup>

所有的测定采用标准方法进行<sup>[16]</sup>。

## 2 实验结果和分析

**2.1 污水中化学物质的变化** 生活污水经过模拟系统处理后,污水中TOC浓度下降了71.5%,总氮下降了69.3%,总磷下降了64.4%(表1),pH值从7.4下降为5.6,DO和温度几乎没有变化。

**2.2 污水中细菌和藻类数量的变化** 模拟系统各单元污水中细菌和藻类的数量分布如下,在第1单元出口处理菌和藻类总量变化分别在 $76 \times 10^3 \sim 330 \times 10^3$ 个/ml和 $1.2 \times 10^3 \sim 4.2 \times 10^3$ 个/ml的范围内,在第2单元出口细菌和藻类总量变化在 $10 \times 10^3 \sim 25 \times 10^3$ 个/ml和 $0.9 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^3$ 个/ml的范围内,在第3单

① 晏维金,典型微景观结构——多水塘系统对非点源污染截留机理的研究,中国科学院生态环境研究中心博士论文,1996。

元出口处其变化在 $10 \times 10^3 \sim 35 \times 10^3$ 个/ml 和  $0.8 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^3$ 个/ml 的范围内,在最后一个单元出口处为 $1.1 \times 10^3 \sim 3.6 \times 10^3$ 个/ml 和  $0.2 \times 10^3 \sim 0.52 \times 10^3$ 个/ml 的范围内。对比4个单元中细菌和藻类总量的变化,随着单元数目的增加,它们的总量在各单元中呈下降趋势,为:第1单元>第2单元、第3单元>第3单元(表2)。

表1 模拟系统各处理单元出口处污染物浓度(mg/L)

Table 1 The pollutant concentrations at the different block outlets of the simulation system

污染物 Pollutant	污水原值 Raw water	第1单元 1st	第2单元 2nd	第3单元 3rd	第4单元 4th
TOC	1018	772	496	393	290
总氮(TN)	274	177	102	98	84
总磷(TP)	154	93.2	81.8	76.8	54.8

表2 湿地模拟系统的不同单元污水中细菌和藻类总量的变化( $\times 10^3$ 个/ml)

Table 2 The population distribution of bacteria and algae in the simulation treatment blocks

时间(d) Time	第1单元1st		第2单元2nd		第3单元3rd		第4单元4th	
	细菌 <sup>①</sup>	藻类 <sup>②</sup>	细菌	藻类	细菌	藻类	细菌	藻类
2	76	4.2	15	1.2	10	1.3	1.1	0.52
3	310	5.4	22	1.5	35	1.4	3.6	0.34
8	110	3.2	14	1.8	15	1.7	1.9	0.32
12	84	2.8	10	1.3	12	1.2	1.3	0.18
14	200	1.9	13	1.2	14	1.3	1.7	0.14
19	330	1.4	25	1.0	26	0.8	2.7	0.12
23	100	1.2	15	0.9	12	0.8	1.3	0.19

①Bacteria, ②Algae

清洁的水体中,水生生物具有种类多,数量少的特点。而在污染较严重的情况下,水生生物种类集中于那些耐污能力强的种类,并且数量较大。由于污染物浓度的下降而导致的营养水平的降低,造成了细菌和藻类总量的减少。

2.3 好氧异养菌的变化 各处理单元中,好氧异养菌的数量在土壤表层最高,土壤2cm深处以下的好氧异养菌的数量要比表层低1个数量级,而在土壤5cm深度以下好氧异养菌没有检出。实验中测定在土壤表层溶解氧的浓度为 $2.1 \sim 2.8$ mg/L,土壤2cm深处以下溶解氧的浓度为 $0.1 \sim 0.2$ mg/L,5cm深度以下处的溶解氧浓度为零。溶解氧的浓度直接影响着好氧异养菌的生长,溶解氧浓度的变化导致好氧异养菌在不同深度的数量变化(表3)。

表3 好氧异养菌在各单元的平均数量( $\times 10^3$ 个/ml)

Table 3 The population of aerobic heterotrophic bacteria in the simulation blocks

时间(d) Time	第1单元 1st		第2单元 2nd		第3单元 3rd		第4单元 4th	
	表层 Surface	2cm	表层 Surface	2cm	表层 Surface	2cm	表层 Surface	2cm
2	52	7	10.4	0.4	8.2	0.5	0.19	0.06
3	272	6	18.6	0.5	23.3	0.6	3.14	0.05
8	98	5	10.2	0.6	12.9	0.7	1.15	0.09
12	64	5	13.5	0.5	13.9	0.7	1.16	0.08
14	216	4	12.4	0.7	13.1	0.8	1.21	0.06
19	327	5	23.2	0.7	24.2	0.6	2.12	0.05
23	101	6	13.3	0.8	10.4	0.7	1.19	0.06

#### 2.4 生物多样性指数的变化

Margalef 多样性指数  $d$  值是进行水质生物监测和评价的重要参数,它能够较为客观地反映出水体的污染状态和水质变化情况,即:污染越严重, $d$  值越低;反之,水质情况越好, $d$  值越高。实践中,人们习惯单独以藻类种类的变化而得到的不同  $d$  值作为水质的评价参数。本实验模拟的是过量有机物造成的污染,细菌可以降解这些有机污染物,有机污染物结构和浓度的变化将引起细菌种类和数量的变化,因此在以生物多样性指数作为水质评价参数时,考虑细菌的变化是必要的。因此将 Margalef 多样性指数定义为细菌和藻类各自的生物多样性指数之和,即  $D=d_1+d_2$ ,其中  $d_1$  为细菌 Margalef 指数, $d_2$  为藻类 Margalef 指数。表4列出了各处理单元的多样性指数变化情况。

表4 各处理单元多样性指数变化

Table 4 The Margalef diversity index of bacteria and algae changes in different blocks

处理单元 Blocks	好氧异养菌 Bacteria		藻类 Algae		多样性指数 Diversity index $d(S-1)/\ln N$		
	种类 Specie	数量 No.	种类 Specie	数量 No.	$d_1$	$d_2$	$D=d_1+d_2$
I	6	$3.27 \times 10^3$	8	$4.2 \times 10^2$	0.38	0.83	1.21
II	7	$2.32 \times 10^4$	11	$1.8 \times 10^3$	0.60	1.33	1.93
III	8	$2.42 \times 10^4$	13	$1.7 \times 10^4$	0.69	1.61	2.60
IV	8	$3.14 \times 10^3$	14	$0.5 \times 10^2$	0.87	2.09	2.96

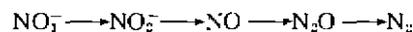
多样性指数在各处理单元表现为:第1单元<第2单元<第3单元<第4单元,说明了水质得到了改善,这与系统的污染物浓度在各单元中的变化情况相符。污染物浓度下降,微生物数量减少,而系统的多样性指数呈上升趋势。虽然污水中的营养物质下降导致了微生物数量的减少,但是污染程度的下降更适于更多种类微生物的生存,温和的水环境为多种物种的生活创造了有利条件。

从微生物种类的变化来看,在第1单元中,其优势菌种主要为耐污能力较强的埃希氏菌属和以碳水化合物为主要营养来源的假单胞菌属。值得注意的是假单胞菌属不仅是第1单元的优势菌种,而且在其后的第2、第3、第4单元中,仍然是优势种类。这表明假单胞菌属是整个系统中的优势菌类,它在去除碳源污染物方面起着重要的作用,随着污染物浓度的降低,在第3和第4单元中耐污能力较差寡营养型的种类也较多(如气单胞菌等)。由于第1单元的污染较为严重,因此绝大多数敏感藻类消失,代之以耐污型种类,如蓝藻门的微囊藻。随着系统净化作用的加强,水质改善,其后的单元表现为藻类种类增加,并出现了喜清藻类,如硅藻门的多种藻类-舟形藻、羽纹藻等(表5)。

细菌种类的变化说明了在污水处理过程中,微生物种类并非固定不变的,它是随着环境因素变化,尤其是污水中污染物浓度的改变直接影响了种群分布。

## 2.5 土壤反硝化率

反硝化菌是典型的厌氧菌类。它们在无氧状态下,将  $\text{NO}_3^-$  还原为  $\text{N}_2$ 。此过程共有4个步骤<sup>[9]</sup>:



以上各步骤中都有相应的反硝化细菌来完成。反硝化率的大小反映了该系统去除氮负荷的能力。

在系统各处理单元中,反硝化率在第4单元处最低,第2单元处最高。随着温度的增加,各处理单元的反硝化率都上升,在30℃时反硝化率最高,表明在较高温度下有利于反硝化的进行。各处理单元中的反硝化率在2cm处最高(表6)。对各单元中的3个深度的土壤含硝态氮量( $\text{NO}_3^-$ )进行测定,结果为:第1单元中,分别为12.4mg/g、11.8mg/g、8.2mg/g;第2单元中,分别为11.8mg/g、10.5mg/g、7.6mg/g;第3单元中,分别为10.8mg/g、10.3mg/g、8.1mg/g;第4单元中,分别为10.9mg/g、9.6mg/g、7.9mg/g。以上结果表明土壤表层和2cm处的土壤  $\text{NO}_3^-$  含量相差不大,而相比较而言,5cm处的含量较低。因为各单元2cm和5cm处为无氧或缺氧环境,土壤表层为好氧环境,虽然土壤表层的  $\text{NO}_3^-$  含量较高,但它的好氧环境不适合厌氧菌的生长,因此表层的反硝化率较低。5cm处的  $\text{NO}_3^-$  含量低于2cm处,虽然它的溶解氧含量要低于2cm处,但是由于两处都适于厌氧菌的生长,因此它们的反硝化率的差别主要是由  $\text{NO}_3^-$  含量,而不是溶解氧含量造成的。

即  $\text{NO}_3^-$  成了决定反硝化率差异的原因。对于土壤表层与其以下深度的反硝化率的差别是由好氧和厌氧环境的差异造成的,而土壤表层以下2cm和5cm处的差异是由于  $\text{NO}_3^-$  的含量不同而造成的。

表5 系统各单元好氧异氧菌和藻类种类变化表

Table 5 The genus of aerobic heterotrophic bacteria and algae in different blocks of the simulation system

	第1单元1st		第2单元2nd		第3单元3rd		第4单元4th	
	表层 <sup>①</sup>	2cm						
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	卅	+	卅	+	卅	+	卅	
埃希氏菌属 <i>Escherichia</i>	卅	+	+	+				
黄杆菌属 <i>Flavobacterium</i>	+		+				+	
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	卅		卅					
土壤杆菌属 <i>Agrobacterium</i>					卅		卅	
微球菌属 <i>Micrococcus</i>	+				+		卅	
气单胞菌属 <i>Aeromonas</i>	+		卅		卅		卅	
气杆菌属 <i>Aerobacterium</i>					+		+	
微杆菌属 <i>Microbacillus</i>					卅		+	
链球菌属 <i>Streptococcus</i>			+		+		+	
无色杆菌属 <i>Achromobacter</i>			卅		卅		+	
微囊藻 <i>Microcystis</i>	卅		卅		+		+	
立方藻 <i>Eucapsis</i>	+							
片藻 <i>Merismopedia</i>	卅		+		+			
项圈藻 <i>Anabaena</i>	+		+		+		+	
黄丝藻 <i>Tribonema</i>					+		卅	
平板藻 <i>Tabellaria</i>			+				卅	
直链藻 <i>Melosira</i>			+		卅		卅	
等片藻 <i>Diatoma</i>					+		+	
月形藻 <i>Amphora</i>					+		+	
舟形藻 <i>Navicula</i>					卅		卅	
羽纹藻 <i>Pinnularia</i>			+		卅		卅	
裸甲藻 <i>Gymnodinium</i>	+		卅				+	
隐藻 <i>Cryptomonas</i>	卅				+		+	
裸藻 <i>Euglena</i>					+		+	
衣藻 <i>Chlamydomonas</i>	卅		卅		+		+	
多球藻 <i>Pleodirina</i>			+					
鞘藻 <i>Oedogonium</i>	+		卅		+		+	
新月藻 <i>Closterium</i>			+					

①Surface

表6 一周土壤反硝化率(%)

Table 6 One week denitrification rate(%) in wetland soil

温度 Temperature (°C)	第1单元1st			第2单元2nd			第3单元3rd			第4单元4th		
	表层 <sup>①</sup>	2cm	5cm									
10	7	23	11	21	31	16	5	27	9	4	21	10
20	18	42	25	29	55	24	11	41	18	14	36	16
30	32	68	34	22	64	31	31	34	23	21	45	19

①Surface

### 3 结论

3.1 模拟湿地系统中,细菌和藻类的数量和种类变化,是水质的反映并显示了湿地系统对污染物的净化。

### 3.2 好氧菌在模拟系统中的分布和种类变化规律

(1)在第1单元中以耐污能力强的种类如埃希氏菌和丝状菌为主,在其后单元中随着污染物浓度的下降,水环境因素趋于温和,一些耐污能力较差的种类如气单胞菌、土壤杆菌占优势。整个系统中以假单胞菌等降解碳氢化合物的菌类为优势物种。

(2)随着污染程度的降低,单元内生物种类增加,生物多样性指数增大。同时,细菌总量在各单元中呈下降趋势,第3单元要比第1单元低2个数量级。

3.3 系统中藻类的变化是:数量减少,种类增加,由少数耐污种向多种敏感性物种过渡,多样性指数增加。

3.4 土壤反硝化率随温度的增加而增加,各处理单元中在深度为2cm处最高,其中第2单元处最高。

### 参 考 文 献

- 1 Pavel E W, Reneau R B, et al. Denitrification potential of nontidal riparian wetland soils in the Virginia coastal plain. *Water Research*, 1996, 30(11): 2798~2804
- 2 Stanley D W. Pollutant removal by a stormwater dry detention pond. *Water Environmental Research*, 1996, 68(6): 1076~1083
- 3 Mahne I, Prinic A, et al. Nitrification/denitrification in nitrogen high-strength liquid wastes. *Water Research*, 1996, 30(9): 2107~2111
- 4 Portier R J and Palmer S J. Wetlands microbiology, from function, processes. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Michigan, 1989. 89~106
- 5 Yin C and Lan Z. The nutrient retention by ecotone wetlands and their modification for Baiyangdian Lake restoration. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 159~169
- 6 Chen J M, Hart O J, et al. Biological fixed-film systems. *Water Environmental Research*, 1995, 67(4): 450~458
- 7 Batal W, Laudon L S, et al. Bactriological tests from the constructed wetland of the Big Five Tunnel, Idaho Springs, Colorado. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publishers, Michigan, 1989. 550~557
- 8 沈蕴芬,等.从浮游动物评价水体自然净化效能. *海洋与湖沼*, 1979, 10(2): 161~171
- 9 Kornaros M, Zafiri C and Lyberatos G. Kinetics of denitrification by *Pseudomonas denitrifications* under growth conditions under growth conditions limited by carbon and/or nitrite. *Water Environmental Research*, 1996, 68(5): 934~942
- 10 Heeb J and Brigitta Z. Sand and plant filter system. *Ecological Engineering for Wastewater Treatment, Proceedings of the International Conference*. Stensund Folk College, Sweden, 1991. 109~207
- 11 Richter K U and Krüner G. Elimination of nitrogen in two flooded and statically packed bed biofilters with aerobic and anaerobic microsites. *Water Research*, 1994, 28(3): 709~716
- 12 Hellstrom T. An empirical study of nitrogen dynamics in lakes. *Water Environmental Research*, 1996, 68(1): 55~65
- 13 沈东升,等.厌氧颗粒污泥对五氯苯酚的吸附、解吸和生物降解研究. *环境科学*, 1996, 17(1): 20~23
- 14 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
- 15 胡鸿均,等. *中国淡水藻类*. 上海:上海科学技术出版社, 1987
- 16 水和废水的监测分析方法编委会. *水和废水的监测分析方法*, 第三版. 北京:中国环境科学出版社, 1989