维普资讯 http://www.cqvip.com

第10卷 第2期
1998年6月

湖 泊 科 学
JOURNAL OF LAKE SCIENCES

Vol. 10, No. 2
Jun., 1998

66-71 X703

香蒲、灯心草人工湿地的研究
——Ⅲ. 净化污水的机理* Q948.15

成水平 夏宜琤
(中国科学院水生生物研究所,武汉 430072)

提 要 通过香蒲 *Typha angustifolia* 和灯心草 *Juncus effusus* 人工湿地微生物分布状况的调查,水生植物生长状况的观察,研究了介质、水生植物和微生物三者净化污水的作者,探讨了人工湿地对污水中污染物质的去除机制.研究表明,人工湿地对污水的氮、磷和化学耗氧量的去除作用是介质、水生植物和微生物综合作用的结果,粘性土壤和花岗石介质更利于污水中磷的去除.

关键词 人工湿地 污水处理 介质 水生植物 微生物 香蒲, 灯心草
分类号 X703 Q948.15

湿地环境中所发生的物理、化学和生物学作用的综合效应是人工湿地净化污水的基本原理.本文从实际出发,研究种植香蒲 *Typha angustifolia* 和灯心草 *Juncus effusus* 的人工湿地中介质、水生植物和微生物净化污水的作用,探讨人工湿地对污水中氮、磷和化学耗氧量的去除机制.

1 材料与方法

材料与方法的详细介绍见前文[1].

2 结果

2.1 人工湿地中微生物的分布

在分析测试人工湿地污水净化效果的同时,采集表面下5cm处土样进行微生物数量的调查(表1).除Ⅰ型香蒲湿地外,其他湿地中微生物在总体上基本具有春夏季节繁殖快、数量大、秋冬季节繁殖慢、数量小的趋势.Ⅰ型香蒲湿地中,夏季香蒲地上部分所剩无几[1],其微生物(特别是细菌、放线菌和真菌)的数量并不是最大;而从冬季到春季,香蒲开始发芽,微生物的数量才上升.正常条件下,Ⅰ、Ⅱ型人工湿地微生物的周年变化趋势是一致的,但二者之间的绝对数量有一定的差异,这可能与其介质的组成、采样的样品有关,Ⅰ型采集的为适宜微生物生长的土样,而Ⅱ型样品中含有砂质.

2.2 人工湿地对人工污水中污染物质的去除率与微生物数量的关系

将Ⅰ、Ⅱ型人工湿地1995年8月—1996年3月间对人工污水中污染物的去除率[1]与湿地表层微生物数量(表1)进行回归分析,所得相关性参数见表2.

对照凯氏氮和氨氮的去除率与湿地中细菌总数、原生动物数量、藻类数量显著相关(多项

* 收稿日期:1996—11—18;收到修改稿日期:1997—03—23. 成水平,男,1969年生,硕士,助理研究员.

维普资讯 http://www.cqvip.com

式回归方程 $P<0.05$);香蒲和灯心草人工湿地中,污染物去除率与湿地中的细菌总数等的相关性不显著($P>0.05$).

表 1　人工湿地表层下微生物的分布状况(个/克,干土)

Tab. 1　The distributions of microorganisms in artificial wetland subsurface (ind. /g,dw)

项目	细菌总数 ($\times10^6$)	放线菌 ($\times10^4$)	真　菌 ($\times10^4$)	原生动物	藻　类	噬细菌
Ⅰ型对照						
1995 年 8 月	310	140	860	15777	4700	47000
1995 年 9 月	440	-	-	6710	5600	21000
1995 年 11 月	142	7.7	14	82	542	410
1996 年 1 月	40	10	92	269	53	398
1996 年 3 月	120	8.5	660	19957	112	1870
Ⅰ型香蒲湿地						
1995 年 8 月	22	97	94	1261	5800	58000
1995 年 9 月	6.9	-	-	14525	40000	200000
1995 年 11 月	32	10	51	99	1115	1400
1996 年 1 月	34	240	3.7	200	45	337
1996 年 3 月	190	5.5	1170	16054	114	5710
Ⅰ型香蒲湿地						
1995 年 8 月	35	34	97	2453	120000	240000
1995 年 9 月	69	-	-	18482	40000	200000
1995 年 11 月	5.4	9.7	30	128	811	1300
1996 年 1 月	1.1	7.1	3.3	64	74	316
1996 年 3 月	2.3	8.3	50	1450	103	1870
Ⅱ型灯心草湿地						
1995 年 8 月	25	35	140	3557	42000	100000
1995 年 9 月	82	-	-	1545	14000	260000
1995 年 11 月	10	4.7	66	443	466	1700
1996 年 1 月	4.7	1.8	68	45	6	323
1996 年 3 月	8.3	3.5	70	951	122	4980

表 2　人工湿地对人工污水中污染物质的去除率与微生物数量的多元回归分析

Tab. 2　Multiple regression analysis of microorganism and trmoval rates of contaminations in artifical wetland ($Y=a+b\lg X_1+c\lg X_2+d\lg X_3$) ($n=5$)[1)]

Ⅰ型湿地	对照湿地				香蒲湿地			
	KN	NH_4^+-N	TP	COD_{Cr}	KN	NH_4^+-N	TP	COD_{Cr}
F	396.11	1279.9	0.343	8.305	0.147	0.170	23.062	44.644
P	0.0364	0.0203	0.8178	0.2451	0.9201	0.9065	0.1496	0.1080
Ⅱ型湿地	**香蒲湿地**				**灯心草湿地**			
	KN	NH_4^+-N	TP	COD_{Cr}	KN	NH_4^+-N	TP	COD_{Cr}
F	1.541	1.152	5.305	0.388	20.267	12.801	0.315	1.313
P	0.5060	0.5707	0.3022	0.7932	0.1593	0.1992	0.8271	0.5443

1) Y 为去除率(%),X_1 为细菌总数;X_2 为原生动物数量;X_3 为藻类数量.

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.3 人工湿地进、出水水质的理化特性

1995年9月30日，检测了人工湿地进出水溶解氧和pH值(表3).

表3 人工湿地进、出水的物理－化学性质(1995年9月30日，21.4℃)

Tab.3 The physico-chemical characteristics of influent and effluent in artificial wetland (1995－09－30，21.4℃)

指标	自来水	污水(进水)	Ⅰ型湿地出水			Ⅱ型湿地出水	
			对照	香蒲	灯心草	香蒲	灯心草
pH	7.60	7.29	6.49	6.32	6.44	6.43	6.39
DO(mg/L)	7.8	4.0	0.4	0.4	0.6	0.9	0.6

进水为弱碱性，溶解氧略低于自来水中的溶解氧；出水皆为偏酸性(pH6.32－6.49)，溶解氧极低(0.4－0.9mg/L). 花岗岩系酸性岩石，可能通过离子交换等途径释放酸性物质到水体中，但香蒲和灯心草湿地净化污水的效果好于对照[1]，出水pH值低于对照(表3)，可以推断人工湿地在污水处理过程中，耗氧严重且在分解有机物的过程中产生了有机酸类.

2.4 Ⅰ型人工湿地氮、磷含量

测试了Ⅰ型人工湿地净化城镇污水后介质中的凯氏氮和总磷含量，与建造人工湿地的原始土样的凯氏氮和总磷含量进行对比，结果如下.

表4 Ⅰ型人工湿地中凯氏氮和总磷的含量(mg/g，dw)

Tab.4 The concentration of KN、TP in artificial wetland (Ⅰ) (mg/g，dw)

指标	原始土样	对照	香蒲湿地	灯心草湿地
KN	0.230	0.393	0.284	0.323
TP	0.298	0.395	0.315	0.273

人工湿地经过两个多月的污水处理，对照中凯氏氮、总磷的含量分别增加了70%、33%；香蒲湿地中凯氏氮和总磷的含量分别增加23%和5%，灯心草湿地中凯氏氮增加40%，其增加幅度都分别小于对照的增加幅度；而灯心草湿地中总磷的含量不但没有增加反而减少了8%.

3 讨论

介质、水生植物和微生物是人工湿地的主要组成部分. 介质为微生物的生长提供稳定的空间，为水生植物提供载体和营养物质，并通过一些物理和化学途径净化污水；水生植物除直接吸收利用污水中的营养物质及吸附、富集一些有毒有害物质外，还有输送氧气至根区和维持水力传输的作用；微生物的代谢作用是污水中有机污染物质降解的主要机制[2]. 同时他们相互联系、互为因果形成一个系统. 水生植物的存在有利于微生物在人工湿地纵深的扩展[3]. 不同类群的微生物亦存在着相互的联系. 细菌是土壤微生物中数量最多的一个类群，在污水净化过程中起着巨大作用，使复杂的含氮化合物转化为可供植物和微生物利用的含氮无机化合物；真菌是好气性的微生物，是水生植物根系输氧作用的受益者，具有强大的酶系统，能引起纤维素、木质素、果胶等的分解，能分解蛋白质化合物释放氨；放线菌是含氮和不含氮化合物分解作用的

维普资讯 http://www.cqvip.com

积极参与者,还能形成抗生物质维持湿地生物群落的动态平衡;磷细菌能将有机物质状态的、不可直接利用的磷素降解为简单的、可供植物及微生物吸收的磷化物;人工湿地中的藻类起着光合放氧和吸收营养物质的作用;原生动物摄食一些微生物和碎屑,起调节微生物群落的动态平衡和清洁水体的作用.他们共同协作构成互利共生的系统,发挥整体作用净化污水.

下面分别从微生物、水生植物和介质在人工湿地净化污水试验中的作用及效应来讨论人工湿地对污水中氮、磷和化学耗氧量的去除机制.

3.1 氮的去除

污水中的氮通过几个方面的途径去除:一部分经微生物作用还原成分子态氮,一部分被植物吸收作用,一部分以离子状态与介质发生交换残留于介质或者以氨形式直接挥发.对照中凯氏氮和氨氮的去除率与人工湿地中细菌总数、原生动物数量、藻类数量显著相关(多项式回归方程 F 检验,$P<0.05$),微生物在净化污水中氮化合物时起重要作用.香蒲和灯心草湿地中,污染物的去除率与湿地中的细菌总数等相关关系不显著($P>0.05$),水生植物的存在影响了湿地微生物数量的空间分布[3],如Ⅰ型人工湿地香蒲在夏季死亡,则其微生物数量并不表现为全年的最大值(表1),但该方程并没有参入水生植物作用因子,从而造成了去除率与微生物数量之间不存在显著性相关关系的现象.事实上,在正常条件下,香蒲,灯心草湿地对污水中凯氏氮、氨氮和化学耗氧量的去除率显著地好于对照[1].如此,水生植物的存在加强了人工湿地对污水中污染物的去除能力,同时也表明水生植物和微生物相互联系、协同作用净化污水.

Ⅰ、Ⅱ型灯心草一直生长良好,对凯氏氮和氨氮的去除率在93%以上,且趋于稳定.Ⅰ型中香蒲地上部分经历了枯死、发芽、再枯死、再发芽的过程,其对人工污水中凯氏氮和氨氮的去除率低高起伏的顺序:Ⅱ型香蒲湿地1995年8月—11月间香蒲生长良好,对人工污水中凯氏氮和氨氮的去除率于在96%以上,在冬季香蒲地上部分枯死,两者的去除率(83.2%和64.5%)有所下降,而到1996年3月香蒲发芽,去除率(88.5%和79.1%)又有所上升[1].可见,人工湿地对人工污水中凯氏氮和氨氮的去除能力与水生植物的生长状况密切相关.

冬季微生物数量减少(表1),人工湿地对凯氏氮和氨氮的去除率也在40%以上[1],净化城镇污水后,对照及香蒲灯心草湿地中的凯氏氮含量高于原始土样(表4),体现了介质对污水中的氮有截留作用.部分氨离子可以通过与介质的阴离子交换而留在介质中[4].

3.2 磷的去除

尽管磷的去除率与微生物的数量之间不存在显著的相关性($P>0.05$)(表2),但前者已分析了原因及微生物净化污水的作用,水生植物和微生物的综合作用是污水中磷去除的机制之一.无机磷化合物的溶解性改变,有机磷化合物的分解矿化,无机磷的氧化和还原都需要磷细菌等微生物的生物化学反应及酶的催化来实施[5].在好氧和厌氧条件下,磷细菌能将有机磷化合物转化为简单的磷化合物,并在厌氧条件下提供短链的脂肪酸[6].本文中人工湿地进水偏碱性,而出水偏酸性(表3),尽管可能有花岗岩释放酸性物质的作用,但香蒲和灯心草湿地与对照的差异说明微生物对污染物质的降解作用产生了脂肪酸类.微生物在降解有机磷的同时,也吸收可利用态的磷维持生长和繁殖,从而截留进入湿地的一部分磷物质,达到去除水体中磷的目的.

湿地植物能直接吸收和利用可利用态磷.种植香蒲、灯心草的湿地中总磷的含量小于对照中的含量,特别是灯心草湿地中总磷的含量还小于原始土样(表4),表明香蒲、灯心草吸收与

维普资讯 http://www.cqvip.com

利用了湿地中一部分可利用态磷，起到了去除磷的作用.

据报道，藨草、芦苇的人工湿地对污水中总磷的去除效果都不太理想[7,8]. 而本文设计的人工湿地对总磷的去除能力相当地高，去除率除一次为82.8%，其余的在90%以上[1]. 经过净化城镇污水后，对照中土样总磷增幅达33%(表4)，介质截留了大量的磷物质. 由此可以推导出本研究的人工湿地介质较适合于磷的去除. 介质中的铁、钙、铝离子十分丰富，能与磷酸根离子结合形成不溶性盐固定下来[9]. 粘性土壤在长期淹水的状况下，亚铁离子易于游离出来，也有利于污水中磷的去除. 建立的人工湿地介质中花岗岩碎石和粘性土壤占80%以上，花岗岩碎石在人工湿地净化污水的酸性环境下(表3)，易释放大量的离子，通过交换、络合、沉淀和吸附等截留磷物质. 因此，以花岗石和粘性土壤为主要介质的人工湿地能高效去除污水中的磷物质.

3.3 化学耗氧量的去除

化学耗氧量是反映水体中还原物质污染程度的综合指标，水体中的还原物质包括有机物、亚硝酸盐、亚铁盐、硫化物等. 本文中的人工污水含亚硝酸盐、亚铁盐、硫化物等还原性物质较少，因此测定的化学耗氧量主要反映水体中的有机物含量.

微生物摄取能量和碳素用于细胞合成，将有机碳分解成二氧化碳、水、甲烷、有机酸类和醇类等[10]，在厌氧条件下磷细菌能将有机磷降解短链脂肪酸[6]. 表3中人工湿地出水偏酸性，证明了微生物在降解污水中有机物质的作用.

灯心草型人工湿地对COD_{Cr}的去除效果一直很好，维持在94%以上，香蒲型人工湿地夏季(1995年8月－11月)COD_{Cr}的去除率明显高于冬季(1996年1月)($P<0.05$)[1]，这与灯心草、香蒲的生长趋势基本一致.

4 小结

综上所述，作者认为人工湿地介质、水生植物和微生物在净化无毒有机污水的过程中均起重要作用，三者的综合作用是人工湿地去除污水中氮、磷和化学耗氧量的主要机制，其中粘性土壤和花岗石能较好地去除磷物质的介质组份. 介质、水生植物和微生物的有机组合，相互联系和互为因果的关系形成了人工湿地的统一体，强化了湿地净化污水的功能.

参 考 文 献

1 成水平，况琪军，夏宜琤. 香蒲、灯心草人工湿地的研究－Ⅰ. 净化污水的效果. 湖泊科学，1997，9(4)：351－358

2 Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants—the root-zone method. *Wat Sci Technol*，1987，19：107－118

3 成水平，夏宜琤. 香蒲灯心草人工湿地的研究－Ⅱ. 净化污水的空间. 湖泊科学，1998，10(1)：62－66

4 Kadlec R H & Tilton D L. The use of freshwater wetlands as atertiary wastwater treatment alternative. *Crit Rev Environ Control*，1979，9：185

5 许光辉，郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京：农业出版社，1986

6 Echenfelder W W. Lancaster. Basel：Technogic Publishing Co Inc. 1992

7 Fetter C W Jr. Sloey W E and Spangler F L. Potential replacement of septic tank drsin fields by artificial marsh wastewater treatment systems. *Ground Water*，1976，14(6)：396－401

8 李科德，胡正嘉. 人工模拟芦苇床系统处理污水的效能. 华中农业大学学报，1994，13(5)：511－517

维普资讯 http://www.cqvip.com

9 Arvin E & Petersen G. A general equilibrium model for the precipitation of phosphate with iron and aluminium. *Prog Wat Tech*, 1980, **12**: 283－298

10 Kobdyashi H & Rittmann B E. Microbial removal of hazardous organic compounds. *Environ Sci Technol*, 1982, **16**: 170a－183a

Studies on Artificial Wetland with Cattail (*Typha angustifolia*), Rush (*Juncus effusus*), Ⅲ: Mechanisms of Purifying Wastewater

Cheng Shuiping　　Xia Yicheng

(*Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan*. 430072)

Abstract

By investigating the distributions of microorganisms and growth of macrophytes, the role of medium, macrophyte and microorganism in wastewater by artificial wetland has been studied and the mechanisms of N, P and COD_{Cr} elimination have been discussed.

From studies on the artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*) and rush (*Juncus effusus*), it had a trend that reproductions of microorganisms in spring and summer were larger than those in autumn and winter. The removal rates of KN, NH_4^+-N were significantly related to the number of bacteria, protozoa and algae in control ($P<0.05$). The contaminates removal capacities of artificial wetlands were also related to the growths of macrophytes. Parts of nitrogen, phosphorous were fixed by exchanging, complexing, precipitating and adsorbing in media.

The results indicate that the collaboration of medium, macrophyte and microorganism is the mechanism of purifying wastewater in artificial wetland. Medium with granite and viscous soil is better for removing phosphorous.

Key Words　Artificial wetland, wastewater treatment, medium, macrophyte, microorganism