

人工湿地对城市污染河水的净化效果及机理*

赵建¹, 朱伟^{1,2}, 赵联芳^{1,2}

(1: 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

(2: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 针对采用人工湿地系统净化镇江市内污染较为严重的古运河河水中遇到的问题, 采用复合垂直流人工湿地小试装置, 研究人工湿地系统对污染河水的净化效果及净化机理。镇江古运河水质调查结果表明, 河水中悬浮态污染物质含量较高, 为劣 V 类水体; 当水力负荷为 750 mm/d 时, 人工湿地系统对 COD_{Mn} 去除率约为 50%–60%, TN 去除率约为 40%–50%, TP 去除率约为 30%–40%, 能够将劣 V 类水处理为 IV 类水甚至 III 类水, 表明其对污染河水处理的有效性。研究人工湿地内部污染物浓度的沿程变化规律, 可以发现河水中污染物质的去除主要发生在湿地下行池, 尤其是表层 30 cm 处, 而上行池未能发挥应有的作用, 分析表明与可能与污染河水中的碳氮比有一定的关系。通过本次实验发现湿地表层对污染物的去除表现为滤料及植物根系的过滤、吸附、截留以及微生物的降解、植物吸收等综合作用。

关键词: 人工湿地; 悬浮态污染物; 溶解态污染物; 沿程变化

Efficiency and mechanism of treating the polluted river water with constructed wetland

ZHAO Jian¹, ZHU Wei^{1,2}, ZHAO Lianfang^{1,2}

(1: College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problem which was faced at the time of treating the seriously polluted water in the Old Canal of Zhenjiang by the constructed wetland, the removal efficiency and the mechanism of treating the polluted river water by the integrated vertical-flow constructed wetland were studied. The investigation of the water quality of the Old Canal showed that the suspended pollutant concentrations was higher and the water quality was worse than Grade V; When the hydraulic loading of the integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) was about 750 mm/d, the removal rates of the COD_{Mn}, TN and TP were respectively from 50% to 60%, from 40% to 50%, and from 30% to 40% and the effluent quality can reach the Grade IV or even III. It showed that the IVCW was a valid method to the treatment of the polluted river water. The variation of the pollutant concentration along the flow showed that the pollutant was removed mainly by the down-flow chamber, especial the surface layer (0–30 cm), while the function of the up-flow chamber was little which may have relation to C/N. The removal function of the surface layer was mainly by the filtration of the medium and plant roots, the degradation of the microorganism, and the absorption of the plants.

Keyword: construct wetland; suspended pollutant; dissolved pollutant; variation along the flow

人工湿地处理系统是 20 世纪 70 年代发展起来的一种仿自然生物处理技术, 目前在污水处理领域的应用非常广泛。在生活污水、养殖场废水、垃圾渗滤液废水、采矿废水、工业废水处理及面源污染削减^[1–7]中表现出处理效果稳定、运行管理方便、造价低廉等优点。目前, 由于点源、面源污染造成河流、湖泊等水体受

* 江苏省自然科学基金(BK2006710)和国家“十五”重大科技专项“863”镇江城市水环境质量改善与生态修复综合示范项目(2003AA601100)联合资助。2006–01–23 收稿; 2006–04–03 收修改稿。赵建, 男, 1981 年生, 硕士研究生; E-mail: hhuzj@yahoo.com.cn.

到污染的现象非常普遍,采取人工湿地进行面源污水处理、或者构建人工湿地的旁侧系统对污染河道河水、污染湖泊湖水(以下统称河湖污水)进行净化方面的研究成为国内外研究的热点。

由于污水处理厂需要大量的基建费用且运行、维护、管理费用较高,不太适合河湖污水的净化。因此,因地制宜在分散污水进入河湖之前经过人工湿地系统进行处理,或者在河湖旁侧有效利用空地构建人工湿地系统对河湖污水进行处理,由于运行、维护费用低廉,已经开始广泛地应用。目前国内外已有利用人工湿地治理河湖的研究报道,Martin J. P.^[8]的研究就是结合城市河流的生态修复在河漫滩上构建人工湿地发挥对污染河水的净化功能;Ruan X.^[9]等利用潜流人工湿地和复合垂直流人工湿地小试模型对劣V类的新沂河水进行了处理效果的比较试验,研究结果表明两种构型的人工湿地对新沂河污水都有较好的净化效果;Shuh-Ren Jing^[10]等针对应用人工湿地净化污染河水时季节变化对氨氮的去除效果进行了研究,发现温暖季节氨氮的去除效果要优于寒冷季节;陈源高,李文朝^[11]等利用复合湿地系统对窑泥沟污水中氮的去除效果进行了试验研究,研究结果表明,复合湿地系统的除氮效果十分明显。但是,人工湿地技术的使用经验大多源于对于生活污水的处理,而河湖污水的水质特点与生活污水具有明显不同,其污染物去除机理可能有所变化。生活污水中有机物浓度很高,COD_{Cr} > 500 mg/L,TN > 40 mg/L,TP > 8 mg/L^[12],河湖污水中的COD_{Cr}一般为10~50 mg/L,TN为2~20 mg/L,TP为0.5~5 mg/L,而且河湖污水一般具有悬浮物含量较高的明显特点。针对这种低碳氮比,多悬浮物的河湖污水研究人工湿地系统对其处理的机理,对于人工湿地在河湖污染控制方面的广泛应用具有重要意义。

本研究以人工湿地技术在镇江污染河水中的应用为背景,参考武汉水生所吴振斌^[13]等提出的复合垂直流人工湿地装置(integrated vertical-flow constructed wetland,简称为IVCW),在明确镇江古运河水体污染特征的前提下,开展人工湿地对污染河水处理效果以及净化机理的研究。选择复合垂直流人工湿地的主要是考虑了节约建设面积,利于脱氮、除磷而且处理效果稳定等优点。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

复合垂直流人工湿地系统(图1)是由两个1.0 m×1.0 m×1.0 m的模型池组合而成,中间用隔板隔开,底部相通,开口为1.0 m×0.2 m。填料采用碎石,直径为4~8 mm。滤料在填入模型池之前用自来水反复清洗,以去除原来表面的污染物质避免影响试验结果。下行池填料厚度为85 cm,上行池填料厚度为75 cm,两池之间设置10 cm的高度差使得水流可以从下行池自行流入上行池。沿水流方向,在池体沿程设置了6个取样口(图1)。下行池与上行池的湿地植物均选择芦苇,2005年2月底以16株/m²的密度进行了移栽,并

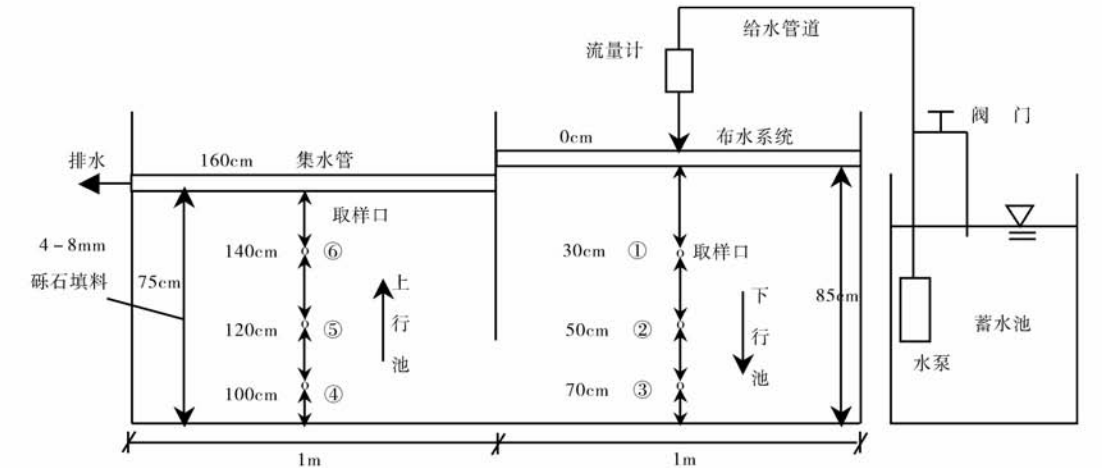


图1 垂直复合流湿地系统试验装置

Fig.1 Schematics of integrated vertical-flow constructed wetland microcosm

开始泵抽古运河河水对人工湿地的微生物、植物系统进行驯化培养,这期间平均每隔 2 d 取样测定污染物的去除率. 到 4 月初,芦苇植株密度达到 40 株/m²,长势进入旺盛阶段,同时人工湿地对污染物的去除率基本趋于稳定状态,这时开始了试验工作.

为了实现复合垂直流人工湿地连续流的运行方式,在人工湿地模型边构建了一个容积为 6 m³ 的蓄水池,河水一旦进入蓄水池,然后采用水泵送至给水管,在给水管边设置回流管路调控给水管路内的水压,在污水进入湿地布水系统之前通过流量计控制流入污水量. 上行池填料表面具有集水管路,将处理后的水收集排走.

根据理论计算公式 $HRT = nV / (HL \cdot S)$ 对人工湿地的水力负荷 (Hydraulic loading, 简称为 HL) 和水力停留时间 (Hydraulic retention time, 简称为 HRT) 进行了计算. 实测碎石填料的孔隙率为 $n = 0.468$, 湿地床填料总体积 $V = 1.6 \text{ m}^3$, 布水面积 $S = 1.0 \text{ m}^2$. 试验设置水力负荷 $HL = 750 \text{ mm/d} = 31.25 \text{ mm/h}$, 水力停留时间 $HRT = 24 \text{ h}$.

1.2 试验方法

1.2.1 人工湿地对污染河水的去除效果试验 将古运河河水直接泵送到容量为 6 m³ 的蓄水池,为了避免河水水质波动的影响,每次储备水量不小于 5 m³. 复合垂直流人工湿地的运行方式为连续流,控制水力负荷为 750 mm/d,从 3 月 8 日至 4 月 30 日,每隔 2 d 取水样测定进出水 COD_{Mn}、TN、TP 等水质指标,分析复合垂直流人工湿地对污染河水的处理效果.

1.2.2 人工湿地对污染河水的沿程去除规律试验 根据古运河河水的水质特点对人工湿地中沿程的净化过程进行分析. 自 3 月 8 日至 6 月 24 日,对古运河京口闸段进行水质监测,水质监测结果见表 1. 针对污染河水的水质特点将污水中的污染物质分为悬浮态污染物与溶解态污染物进行实测. 这里所指溶解态污染物质是能够均匀溶解在水中的污染物,包括分子态、离子态的污染物质. 悬浮态污染物质 (或称颗粒吸附态) 包括颗粒悬浮态污染物、胶体态污染物和吸附在它们上面的分子态、离子态污染物质. 在水质监测时以经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤为标准,通过滤膜的即考虑为溶解态污染物质,被滤膜截流的物质考虑为悬浮态污染物质. 污染物浓度等于溶解态污染物浓度与悬浮态污染物浓度之和^[14,15]. 本文中悬浮态氮记为 TSN,溶解态氮记为 TDN, $TN = TDN + TSN$; 悬浮态磷记为 TSP,溶解态磷记为 TDP, $TP = TSP + TDP$; 悬浮态有机物记为 SCOD_{Mn},溶解态有机物记为 DCOD_{Mn}, $COD_{Mn} = SCOD_{Mn} + DCOD_{Mn}$.

表 1 镇江古运河污染河水水质 (2005 年 3 月 8 日 - 6 月 24 日)

Tab. 1 Monitoring results of the Old Canal water quality, Zhenjiang City

指标	COD _{Mn} (mg/L)			N (mg/L)			P (mg/L)		
	COD _{Mn}	DCOD _{Mn}	SCOD _{Mn}	TN	TDN	TSN	TP	TDP	TSP
范围	6.89 -	4.67 -	1.34 -	1.54 -	0.94 -	0.49 -	0.79 -	0.45 -	0.23 -
	13.69	11.18	3.97	5.00	3.04	2.02	3.62	1.99	1.67
均值	10.77	7.80	2.94	2.72	1.72	1.08	1.68	0.94	0.79

根据人工湿地对污染河水去除效果的试验数据,从 4 月初、人工湿地对污染物的去除率开始稳定后,开始做污染物的沿程去除规律试验. 从 4 月 2 日 - 4 月 26 日,每周沿程取样两次,实测了各取样点的 COD_{Mn}、DCOD_{Mn}、TN、TDN、TP、TDP 指标. 在这一阶段中,古运河河水分几个阶段抽提到蓄水池中,然后输送到人工湿地模型进行试验. 期间蓄水池的水质变化见表 2.

1.2.3 人工湿地对溶解态污染物的沿程去除规律试验 根据污染河水中悬浮态污染物较多的特点,从 5 月 1 日起,开始进行全溶解态污水的运行试验. 目的是研究人工湿地对溶解态污染物的去除规律并于含有悬浮态污水的去除规律进行比较. 试验仍然以古运河水的 COD_{Mn}、N、P 浓度为参照,使用化学试剂在蓄水池中配制全部为溶解态的污水. 这里氮采用 NH₄HCO₃,碳源采用葡萄糖,磷采用 KH₂PO₄,配水水质与实际河道污水的水质比较见表 3. 通过使用全溶解态污水运行人工湿地,经过一周待出水水质稳定后,开始沿程取样测试水质指标,研究人工湿地对溶解态物质的沿程去除规律.

1.2.4 水质指标的测试方法 COD_{Mn}、TN、TP 等的测定均采用国家标准方法^[16]。

表2 蓄水池污水水质变化(2005 年4月2日-4月26日)
Tab.2 The water quality of the polluted river water in the tank

日期	COD _{Mn} (mg/L)	DCOD _{Mn} (mg/L)	SCOD _{Mn} (mg/L)	TN (mg/L)	TDN (mg/L)	TSN (mg/L)	TP (mg/L)	TDP (mg/L)	TSP (mg/L)
4月2日	12.37	9.31	3.06	2.64	1.89	0.75	0.79	0.56	0.23
4月8日	13.45	10.64	2.81	3.26	2.06	1.20	1.46	0.95	0.51
4月17日	10.18	6.89	3.29	1.67	1.10	0.57	1.49	0.67	0.82
4月22日	10.54	7.26	3.28	1.54	0.97	0.57	2.04	1.06	0.98
4月26日	12.52	11.18	1.34	5.00	3.86	1.14	3.62	2.56	1.06

表3 古运河水(2005 年4月26日)及人工配水中污染物浓度
Tab.3 Concentration of the pollutants in the Old Canal water(26 April,2005) and synthetic wastewater

进水	COD _{Mn} (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
古运河水	12.52	5.00	3.62
配水	12.00	5.00	3.50

3 试验结果与分析

3.1 人工湿地对污染河水的处理效果

人工湿地系统对污染河水的去除效果见图2。可以看出,湿地系统对污染河水具有稳定的去除效果,对 COD_{Mn}、TN、TP 的平均去除率分别可以达到 53. 7%, 45%, 40. 8% 左右。从古运河的水质监测结果表1可见,古运河河水的污染较为严重,尤其是氮磷污染,属于重度富营养化水体,水质属于劣V类,而且水质波动比较大。经过人工湿地处理后的出水水质一般可达到Ⅳ类水甚至Ⅲ类水水质要求,表明复合垂直流人工湿地对污染河水具有较好的去除效果。

由图2还可以看出,随着运行时间增加,湿地系统对 COD_{Mn}、TN 的去除率逐步提高,并趋于稳定,而对 TP 的去除率则呈现缓慢下降的趋势。湿地系统对 COD_{Mn} 的去除主要通过填料表面的生物膜及植物根系附着的大量的微生物的降解作用,随着系统运行进入稳定阶段,填料表面的生物膜逐渐形成。同时,4、5 月份也是芦苇生长比较旺盛的时期。由于有机物的去除与微生物数量有正相关关系^[17],微生物膜和微生物活性的增加应该是有机物去除的保证。一般来讲氮的去除主要靠人工湿地中微生物的硝化/反硝化过程^[18],当然植物吸收也起到一定的作用可以占氮总量的 3% - 5%^[19]。人工湿地除氮效率的逐步提高可以反映湿地系统内部的硝化细菌与反硝化细菌生长的能力在增加。对于磷而言,研究表明人工湿地对磷的去除途径包括化学和物理吸附、物理过滤、沉积物形成、微生物同化和植物吸收等^[18]。而微生物对磷的同化作用并不是去除磷的主要途径。由于植物的吸收

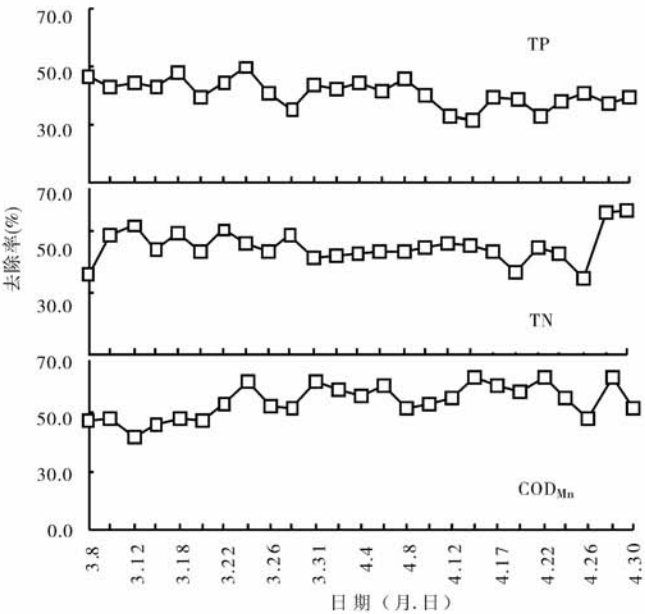


图2 人工湿地净化效果

Fig.2 Removal efficiency of Constructed Wetland

系统运行进入稳定阶段,填料表面的生物膜逐渐形成。同时,4、5 月份也是芦苇生长比较旺盛的时期。由于有机物的去除与微生物数量有正相关关系^[17],微生物膜和微生物活性的增加应该是有机物去除的保证。一般来讲氮的去除主要靠人工湿地中微生物的硝化/反硝化过程^[18],当然植物吸收也起到一定的作用可以占氮总量的 3% - 5%^[19]。人工湿地除氮效率的逐步提高可以反映湿地系统内部的硝化细菌与反硝化细菌生长的能力在增加。对于磷而言,研究表明人工湿地对磷的去除途径包括化学和物理吸附、物理过滤、沉积物形成、微生物同化和植物吸收等^[18]。而微生物对磷的同化作用并不是去除磷的主要途径。由于植物的吸收

作用是有限的,一般只占总量的2%左右^[19],因此,可能主要依靠填料的吸附作用,填料的吸附逐渐接近于饱和时,对磷的去除效果就会逐渐降低.

3.2 人工湿地对污染河水的净化机理

通过测定河道污水中污染物质在湿地系统内部的沿程去除规律,可以分析人工湿地对污染物质的去除过程及对不同形态污染物质的去除规律.4月2日-4月26日的沿程试验表明污染物沿程去除规律具有相似性,以4月2日、4月8日、4月26日的试验数据为例(图3-5).

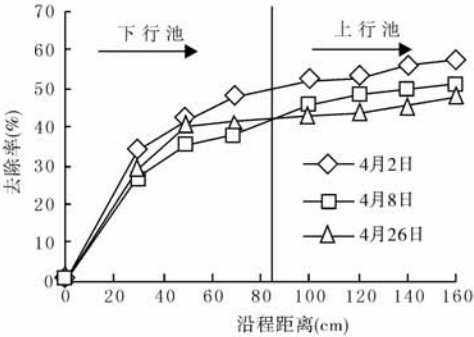


图3 复合垂直流人工湿地沿程对 COD_{Mn} 的去除效果
Fig. 3 Removal efficiency of COD_{Mn} along the distance in the IVCW

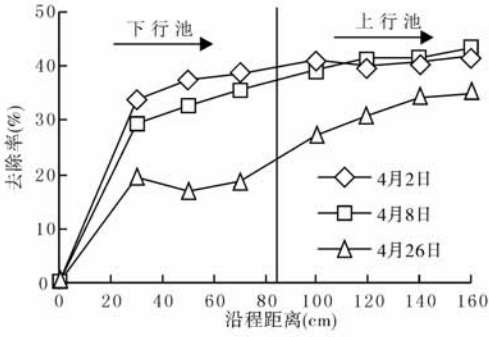


图4 复合垂直流人工湿地沿程对 TN 去除效果
Fig. 4 Removal efficiency of TN along the distance in the IVCW

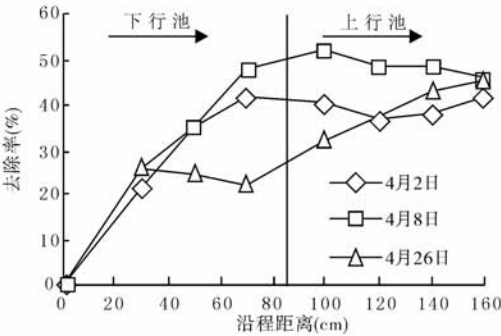


图5 复合垂直流人工湿地沿程对 TP 去除效果
Fig. 5 Removal efficiency of TP along the distance in the IVCW

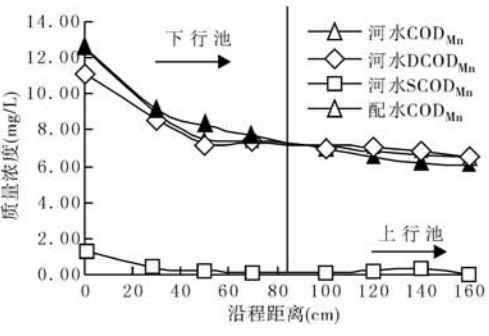


图6 河水与人工配水 COD_{Mn} 的沿程变化
Fig. 6 Variations of COD_{Mn} concentration in river wastewater and synthetic wastewater with the distance

由图3-5可以看出,整个湿地系统对 COD_{Mn} 去除率为48.2% - 57.8%, TN 去除率为36.8% - 64.4%, TP 去除率为41.8% - 59.1%. 在人工湿地的下行池(0 cm-85 cm) COD_{Mn}、TN、TP 的去除率分别达到42.8%、27.0%、32.0%,并且表层(0 cm-30 cm)在30 cm 的距离范围内去除率占下行池总去除率的67%、72%、81%. 而占整个湿地系统容积近1/2的整个上行池(85 cm-160 cm),对三种污染物的去除率平均还不足10%,这表明,在本试验中,复合垂直流人工湿地对污染河水中污染物的去除主要发生在下行池,尤其是人工湿地表层,而上行池对污染物没有能够发挥应有的去除作用. 在整个试验过程,对于磷来说去除率基本表现出一个缓慢降低的趋势(图2). 过程中也表现出一些起伏,比如4月8日湿地对磷的沿程去除效率要高于4月2日. 主要原因可以考虑与进水水质的波动,以及气温变化引起的微生物作用波动有关. 从表2可以看出,4月8日 TP、TSP 的浓度都比4月2日高,相对应的去除率也高一些,可以考虑4月8日的数据反映出

人工湿地对悬浮态磷的物理过滤发挥了较大的作用.

为了区分出人工湿地对悬浮态物质的物理过滤作用,将实际污染河水的试验数据与全部为溶解态污染物的人工配水的沿程去除规律进行了比较. 污染河水试验数据采用较具代表性的4月26日的数据,全溶解态配水试验采用5月12日的数据,比较结果见图6-图8.

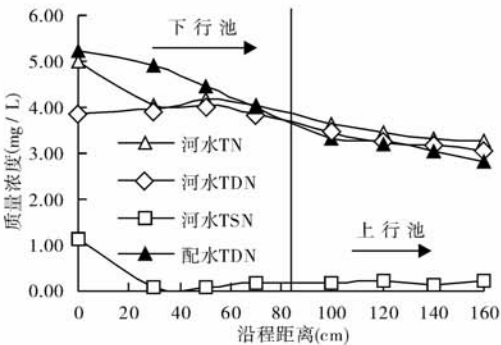


图7 河水与人工配水 TN 沿程变化

Fig. 7 Variations of TN concentration in river wastewater and synthetic wastewater with the distance

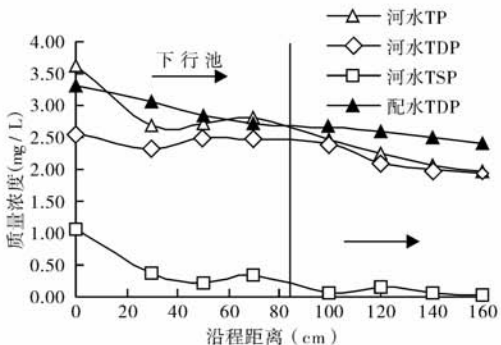


图8 河水与人工配水 TP 沿程变化

Fig. 8 Variations of TP concentration in river wastewater and synthetic wastewater with the distance

从中可以看出,无论是 COD_{Mn} , TN 还是 TP,在污染河水中的明显地表现为下行池的浓度降低较大,尤其是表层 30 cm 的降低比较明显,而上行池的浓度降低比较平缓,也可以说是变化不大. 而在全溶解态的配置污水中,下行池和上行池表现为较为均匀的降低. 两者相比,污染河水在表层的去除作用特别明显. 为了分析原因,单独参照污染河水中悬浮态的 $SCOD_{Mn}$, TSN 和 TSP,可以发现悬浮态的污染物基本上在下行池的前 30 cm 基本去除,而溶解态的 $DCOD_{Mn}$, TDN 和 TDP 则在下行池降低较小. 从总的去除率进行分析,由于污染河水中的 $SCOD_{Mn}$ 、TSN、TSP 分别达到了 28.3%、35.9%、43.7%,所以下行池前 30 cm 的去除效果对总去除的贡献比较大.

从污染河水和全溶解态配水试验的比较可以看出,对于含有较多悬浮态污染物的污染河水而言,人工湿地首先发挥了截留的作用,这可能是由滤料的过滤、吸附等物理作用为主,位置主要集中于人工湿地下行池的表层. 对于全溶解态的配置污水而言,虽然下行池的去除效果比上行池较大,但上行池也表现出一定的去除效果,由此而进一步对人工湿地对含有较多悬浮态污染物的污染河水的净化机理进行分析. 可以考虑为污染河水进入人工湿地系统之后,首先在下行池表层受到物理的过滤和吸附作用,主要的悬浮态物质被截留在下行池 30 cm 的范围内. 而这一区域正是人工湿地中植物根系发达,微生物数量多、微生物活性强的部位. 在这里截留下来的悬浮态的有机物、氮、磷在微生物的作用下,逐渐得到转化. 这时污染物转化方式的一种表现为转化为气体逸出系统 (CO_2 , N_2),一种是吸附于滤料表面,另一种是将悬浮态物质转化为溶解态物质 (有机物转化为无机物). 而污染河水进入 30 cm 以下位置或进一步进入上行池时,除污染河水中的原来含有的溶解态污染物以外,增加了前 30 cm 中由悬浮态转化为溶解态的污染物质. 这样就表现出上行池对溶解态污染物的去除率较配制污水较低的现象.

另一个现象是,无论是污染河水还是全溶解态配置污水,都表现为下行池的去除效果好,上行池的去除效果较差. 其中一个原因可以考虑为:由于镇江古运河这样的污染河水碳氮比要比生活污水的低的多,到污水进入上行池时,由于碳源不足使得反硝化过程受到抑制.

4 结论

(1) 对于含有较多悬浮物、碳氮比较小的镇江古运河污染河水,人工湿地发挥了较为稳定的去除效果. 当水力负荷为 750 mm/d 时,人工湿地对 COD_{Mn} 去除率约 50% - 60%, TN 去除率约为 40% - 50%, TP 去除

率约为 30% - 40%, 能够将劣 V 类水处理为 IV 类水甚至 III 类水. 因此利用人工湿地系统处理污染河水具有技术上的可行性.

(2) 对于污染河水而言, 复合垂直流人工湿地对污染物的去除主要发生在下行池, 尤其是湿地表层 30 cm 范围. 可以认为在人工湿地表层滤料和植物根系对悬浮态污染物的过滤、吸附等物理截留是主要作用, 在表层微生物作用则主要表现为将悬浮态转化为溶解态的作用.

(3) 与生活污水不同, 复合垂直流人工湿地对污染河水进行处理时, 上行池的作用不够明显, 这可以考虑为两点原因. 一是表层悬浮态物质的转化增加了上行池溶解态污染物的浓度, 抵消了上行池的一部分去除效果. 另一方面, 由于污染河水碳氮比较小, 上行池的微生物系统未能发挥较好的作用.

5 参考文献

- [1] 刘春常, 夏汉平等. 人工湿地处理生活污水研究. 生态环境, 2005, 14(4): 536 - 539.
- [2] Dunne E J, Culleton N, O'Donovan G *et al.* An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water. *Ecological Engineering*, 2005: 221 - 234.
- [3] 石 岩, 万新南. 人工湿地系统在垃圾渗滤液处理中的应用. 水土保持研究, 2005, 12(1): 138 - 140.
- [4] Aisling D O'Sullivan, Bredagh M Moran, Marinus L Otte. Accumulation and fate of contaminants (Zn, Pb, Fe and S) in substrates of wetlands constructed for treating mine wastewater. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004: 345 - 364.
- [5] 籍东国, 孙铁珩等. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224 - 228.
- [6] 段志勇, 施汉昌等. 人工湿地控制滇池面源水污染适用性研究. 环境工程, 2002, 20(6): 64 - 66.
- [7] 卢少勇, 张彭义, 余 刚等. 农田排灌水的稳定塘 - 植物床复合系统处理. 中国环境科学, 2004, 24(5): 605 - 609.
- [8] Martin J P. Restoration of an urban river in Barcelona, Spain. *Environment Engineering and Policy*, 2001: 113 - 119.
- [9] Ruan X, Xue Y, Wu J *et al.* Treatment of polluted river water using pilot-scale constructed wetlands. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2006: 90 - 97.
- [10] Jing Shuh-Ren, Lin Ying-Feng. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan. *Environmental Pollution*, 2004: 291 - 301.
- [11] 陈源高, 李文朝, 李荫玺等. 云南抚仙湖窑泥沟复合湿地的除氮效果. 湖泊科学, 2004, 16(4): 331 - 336.
- [12] 何亚丽, 朱伟萍. 利用人工湿地处理小区污水的技术研究. 许昌学院学报, 2003, 22(2): 49 - 50.
- [13] 吴振斌, 成水平等. 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探. 应用生态学报, 2002, 13(6): 715 - 718.
- [14] Tundisi J G, Abe D S. Assessment of Nitrogen Removal Potential in the Wetlands of Parelheiros River. *International Institute of Ecology*, 2005.
- [15] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制(第一版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 国家环保局编. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 吴振斌, 梁 威等. 复合垂直流构建湿地净化污水机制研究(I 微生物类群和基质酶). 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 179 - 182.
- [18] Dong Cheol Seo, Ju Sik Cho, Hong Jae Lee *et al.* Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. *Water Research*, 2005: 2445 - 2457.
- [19] 袁东海, 高士祥等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究. 水土保持学报, 2004, 18(4): 77 - 80.