

溶解氧对人工湿地处理受污染城市河流水体效果的影响

肖海文, 邓荣森, 翟俊, 王涛, 李伟民

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:研究了溶解氧在人工湿地中的分布对受污染城市河流水体处理效果的影响规律及其意义, 为城市受污染景观水体处理或雨水处理人工湿地的工程设计提供有效的自然复氧估算方法和设置措施. 结果表明, 由于自然复氧不利引起的溶解氧不足 ($< 2 \text{ mg/L}$) 是导致人工湿地出水水质恶化的主要原因. 自然跌水是一种有效的人工湿地充氧方式, 其充氧效果可用氧亏比 r 根据水温、水质以及充氧形式等外部条件参数进行估算. 推流态的湿地床内, 溶解氧分布与生物量分布以及有机物的去除规律呈现明显的相关性, 而对 TP 沿程去除速率影响不大. 设置多级多段跌水有利于均衡湿地床填料内的溶解氧分布, 促进硝化反应, 保证出水水质.

关键词:溶解氧; 湿地; 自然复氧; 污染河流水体

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)12-2426-06

Effect of DO Distribution on Contaminated Urban Stream Water Treatment Performance in Constructed Wetland

XIAO Hai-wen, DENG Rong-sen, ZHAI Jun, WANG Tao, LI Wei-min

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: We evaluated the effect of dissolved oxygen (DO) on the performance of two pilot-scale constructed wetlands in treating contaminated water from an urban stream. The aim of this study was to investigate a more effective DO distribution in contaminated stream water treatment wetland that may aid future constructed wetland design effort. The results show poor natural aeration condition and inadequate DO in wetland directly result in the deterioration of effluent water quality. Natural waterfall is an effective aeration way and can improve DO concentration in wetland. The aeration capability of waterfall can be evaluated by oxygen deficit ratio (the ratio of difference between concentration of saturated DO and DO measured before and after waterfall). The distributions of DO obviously correlated with the quantity distribution of microorganism and removal rate of organic contaminants in wetland, however there was no obvious relationship between DO and TP removal rate. Results of the study also indicate setting multi-waterfall in plug-flow wetland can balance the distribution of DO and improve the nitrification.

Key words: dissolved oxygen; constructed wetland; natural aeration; contaminated stream water

城市内的湖泊、河渠等景观水体是城市生态系统的重要组成部分, 随着城市污染负荷的不断增大, 城市景观水体的整治与改善问题日益受到人们的关注^[1~4], 例如地块景观水体的水质情况往往和该地块房地产价值提升密切相关. 目前, 国内外城市景观水体的处理或径流污染控制技术越来越多倾向于采用与景观改善相结合的一系列生态处理技术, 例如砂石过滤、土壤渗滤、氧化塘、人工湿地等^[5~10]. 与强化反应条件的常规水处理技术相比, 这些生态处理技术更着重依赖于“自然净化系统^[11, 12] (阳光、砂石、土壤、微生物、动植物)”的生态循环作用, 这种观点削弱了人为的强化过程而注重生态的再循环, 是当今环保领域一种极为流行的观点. 就污水净化的机理来讲, 无论是常规的生物处理技术还是生态处

理技术, 溶解氧都是整个反应系统中的最重要的控制条件之一, 很大程度上决定了反应系统的卫生学条件、微生物种类以及出水水质, 然而与常规污水处理技术相比, 溶解氧的控制生态处理技术的实际工程应用中却常常被人们忽视.

常规污水处理技术通常借助高能耗来控制反应器内溶解氧浓度, 例如曝气生物滤池、好氧生物接触氧化^[13]. 而对于低能耗甚至无能耗的生态处理技术而言, 大型曝气机械的使用是不现实的. 因此, 如何因地制宜地控制生态处理系统中的溶解氧浓度, 保证出水水质, 是生态处理系统设计中的一个重要和

收稿日期: 2005-12-21; 修订日期: 2006-03-26

基金项目: 国际合作荷兰政府赠款项目

作者简介: 肖海文 (1976~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为城市非点源污染控制.

关键的问题. 目前, 针对污水生态处理系统中溶解氧对处理效果影响的研究较少, 而对生态处理系统中溶解氧分布控制方法的研究更是十分鲜见. 作者旨在通过 2 次试验对比, 研究景观水体处理湿地床中溶解氧的分布规律及其对处理效果的影响, 探讨生态处理系统中有效的自然复氧方法, 为深入研究湿地的净化机理提供基础, 并为湿地床处理受污染景观水体的工程设计提供理论依据.

1 试验原水水质与试验方法

试验共分为试验 I 和试验 II, 试验 II 为试验 I

的改进. 试验在成都城北污水处理厂内进行, 处理水为污水厂以北南门河河水, 该河接纳了多种城市点源污染(主要是合流制排水管溢流污水)及非点源污染的污染物, 为一典型的受污染城市过境河流. 试验期间(3~9 月)原水水质情况见表 1. 分析测试方法参见文献[14].

2 试验 I

2.1 试验装置与方法

试验 I 装置示意图见图 1. 试验 I 从 3 月初系统正常稳定运行开始, 到 6 月中旬结束, 试验期间平均

表 1 试验期间原水水质表
Table 1 Water quality of inflow for experiments

指标	SS/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	嗅闻
数值范围	21~151	30.3~104.6	2.8~11.2	7.5~68.9	0.19~0.74	53~118
均值	69.6	50.2	5.3	13.84	0.39	79.8
指标	浊度/NTU	色度(铂钴色度)	DO/mg·L ⁻¹	水温/℃	pH	
数值范围	10~72	13~36	1.6~3.7	16.0~28.0	6.4~7.3	
均值	28	25	1.8	21.0	6.7	

气温为 18.6℃, 平均进水流量 Q 为 15.1 m³/d, 表观水力停留时间 HRT 为 7.2h. 原水从河中抽取后

上下折流通过湿地床, 各段填料情况见表 2.

2.2 试验 I 结果

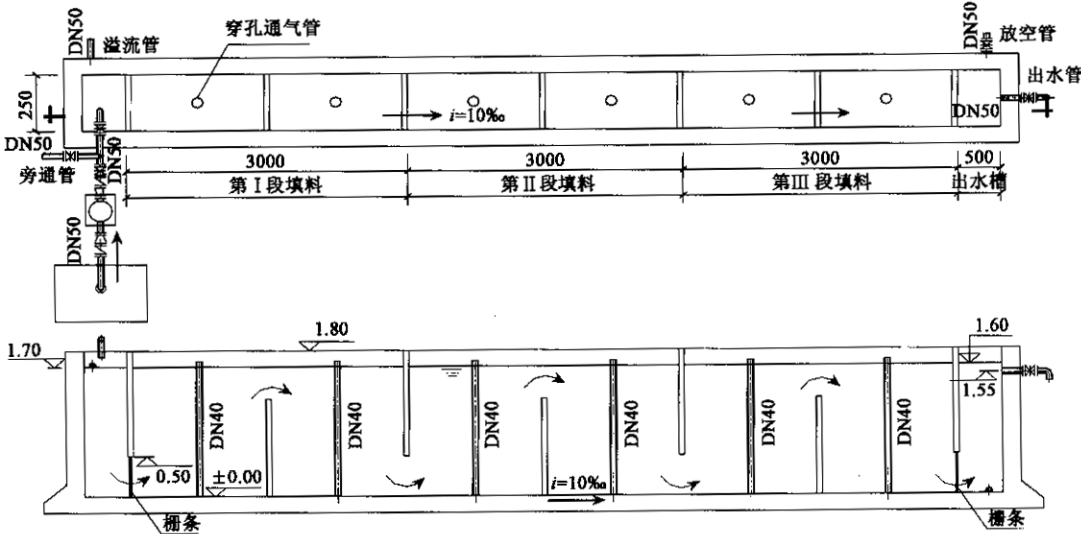


图 1 试验 I 湿地床装置示意
Fig.1 Schematic diagram of constructed wetland trench of experiment I

表 2 试验 I 湿地床各段填料情况

位置	填料 材质	装填长 度/m	粒径 /mm	平均孔 隙率/%	平均比表面 积/m ² ·m ⁻³
第 I 段	卵石	3.0	30~40	41.2	3.16×10 ⁵
第 II 段	卵石	3.0	20~30	49.1	4.92×10 ⁵
第 III 段	碎石	3.0	10~20	56.3	8.76×10 ⁵

结果汇总见表 3. 从表 3 中可见湿地 I 除对 SS 有较高的去除率外, 对其它的污染指标去除并不理想, 而且出水 NH₃-N 值和嗅闻值甚至有所增加, 出水已呈现出明显的令人反感的气味, 反应系统卫生条件恶化. 试验结果并不能满足此次试验对污染物的去除要求(达到 GB3838-2002 V 类水质标准). 通过对湿地床内生物膜特征的观察和溶解氧分布的测

定,证实了该湿地床内实际已经发生了厌氧或缺氧反应,这是导致湿地床的处理效果不理想的最重要的原因.

表 3 试验 I 进出水水质结果汇总
Table 3 Water quality parameters of influent and effluent in experiment I

污染指标	进水范围	进水 均值	出水范围	出水 均值	去除 率/%
SS/mg·L ⁻¹	29~98	57.2	6~36	18.2	68.18
COD/mg·L ⁻¹	33.32~96.3	53.19	19.21~68.39	35.97	26.43
NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	2.8~7.6	4.8	3.4~9.2	5.9	—
TP/mg·L ⁻¹	0.22~0.69	0.34	0.14~0.48	0.29	13.2
pH	6.5~7.2	6.6	6.2~7.0	6.5	—
浊度/NTU	6~64	26	7~36	16	38.71
色度(铂钴色度)	12~32	22	8~34	20	9.1
嗅阈	55~95	76	65~118	88.0	—

2.3 溶解氧分布对试验 I 出水水质的影响分析

试验 I 装置中溶解氧浓度沿沟长的平均分布如图 2 所示,其中除首尾 2 点为进、出水槽内 DO 值外,中间 3 点取样点均位于填料下 1m 处.

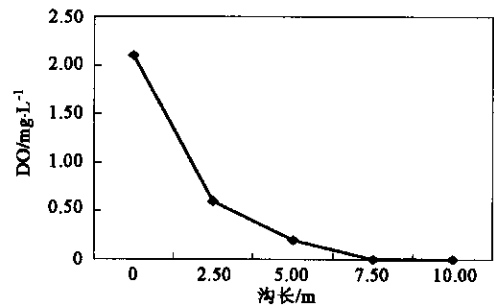


图 2 试验 I 溶解氧浓度沿沟长的分布
Fig.2 Distribution of DO along the wetland trench in experiment I

由图 2 可知,原水进入湿地 I 后 DO 值迅速下降,2.5m 后即下降了 72%,5m 后湿地床内几乎已测不出 DO 值.由于进水溶解氧浓度本来较低(1.6~2.6 mg/L),且滤沟宽 0.25m,深 1.8m,自然复氧条件非常差,所以整个湿地床内已呈现出典型的厌氧状态.

生物膜的生长也逐渐显现出厌氧特征.由于启动阶段温度较高,沟内生物膜的生长较为迅速,3 周后,表面填料上即出现了明显的生物膜.生物膜开始为较浅的黄褐色,结构较紧密,表面有细丝状絮体顺水飘动,而湿地床受阳光照射的内壁则开始生长出一些“绿膜”.随着启动日期的增加,生物膜颜色逐渐变浅,启动 4 周后,已由最初的黄褐色变为浅灰色,填料表面絮状物、丝状物增多,生物膜增厚,但结构

不如刚开始时致密,而且已在常温下发出较明显的臭味.镜检发现,生物膜中含有较多丝状菌胶团和大量藻类,生物膜以及出水中均未发现钟虫、轮虫等原生动物及后生动物,表明床体内处于缺氧或厌氧状态,因为一般说来,在无毒废水的生物处理中,若无微型动物生长,往往说明溶解氧不足.

作为景观水体而言,是否有令人不愉快的异嗅是判断水质优劣最重要的感官性状指标之一,因为它能被人最直观地判断.试验 I 中出水臭味呈上升趋势,与沟内的厌氧状态密切相关,首先有机物厌氧分解会产生氨、硫化氢等有明显令人厌恶臭味的无机气体.另外,许多厌氧细菌的活动能产生导致水体臭味的物质,这些物质在水中的含量一般在 μg/L 级,目前大多数还不能直接定性或定量检出,但随着色谱-质谱技术的发展,现已查明厌氧细菌引起水中产生嗅味的物质有 10 余种,其中主要有 2-甲基异冰片(2-MIB)、1,10-二甲基-9-十氢萘醇或称为土臭素(Geosmin)、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(IBMP)和三甲基胺等^[15].

3 试验 II

3.1 试验装置与试验方法

在试验 I 的基础上,试验 II 装置在设计时特别注意考虑了以下 2 点:①注意保证反应系统中有足够的溶解氧,防止臭气的产生;②加强滤沟的有机物及氮磷去除效果.

其中第①点是通过自然复氧的方式实现:减小沟深,设置 3 级跌水和自然复氧间隔段;第②点是通过增加植物床过滤段实现.试验 II 装置如图 3.其各段填料及植物床段植物的种植情况见表 4 和表 5.

3.2 试验 II 结果

试验 II 从 5 月中旬湿地系统稳定运行开始,到 9 月初结束,试验期间平均气温为 24.3℃.当 HRT 为 8.2h,进水流量 Q 为 14.4 m³/d 时,试验 II 结果汇总见表 6.由表 6 可知湿地床 II 对出水的色、嗅等感官性状指标有良好的控制作用,对有机物、总磷等均有较好的去除效果.除氨氮外,其它主要生化指标的出水浓度均优于一般景观水体水质标准(GB3838-2002 V 类水质标准).

3.3 溶解氧分布对处理效果的影响分析

3.3.1 试验 II 自然复氧效果

湿地床 II 的自然复氧方式主要采用进水 1.8m 落差的 3 级跌水盘跌水.试验所测不同温度下的跌水复氧效果见表 7.

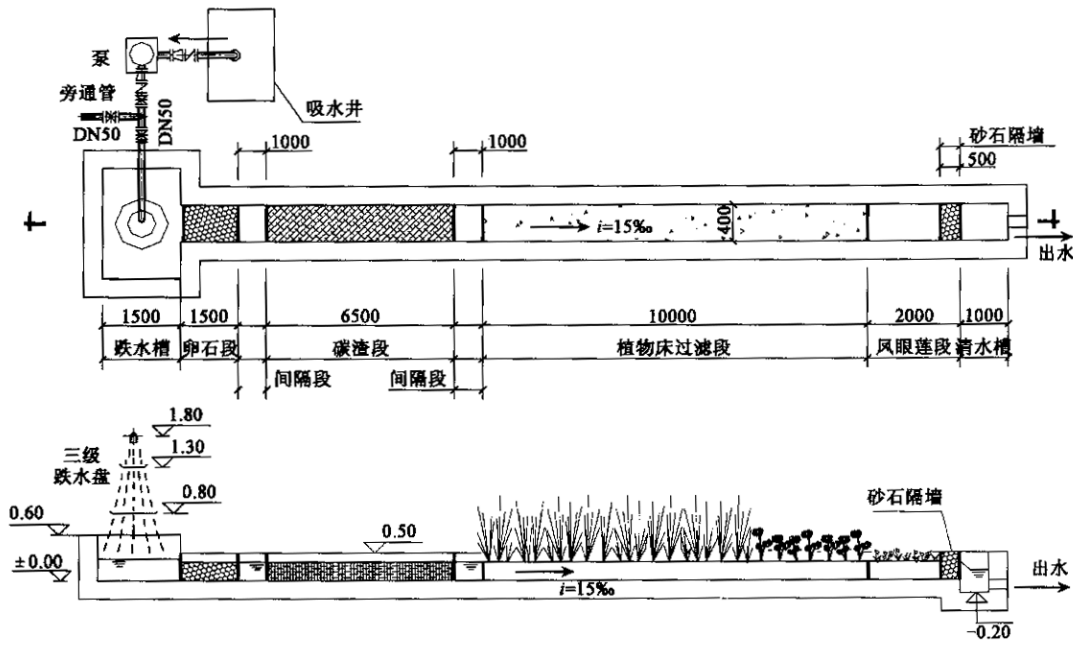


图 3 试验Ⅱ湿地床装置示意

Fig.3 Schematic diagram of constructed wetland trench of experiment Ⅱ

表 4 湿地床Ⅱ各段填料情况

Table 4 Parameter of substrates in wetland trench of experiment Ⅱ					
填料位置	填料材质	装填长度/m	粒径/mm	平均孔隙率/%	平均比表面积/m ² ·m ⁻³
卵石段	卵石	1.5	20~30	49.1	4.92×10 ⁵
碳渣段	炉渣	6.5	—	67.8	—
植物段	碎石	10.0	10~20	56.3	8.76×10 ⁵

表 5 植物床段植物种植情况

Table 5 Parameter of vegetation planted in wetland trench of experiment Ⅱ						
植物名称	香蒲	灯芯草	米草	野芋	水花生	风眼莲
种植长度/m	3.5	1.5	1.5	1.0	2.5	2.0
种植密度/株·m ⁻¹	15	12	12	9	21	12

表 6 试验Ⅱ结果汇总表

Table 6 Water quality parameters of influent and effluent in experiment Ⅱ					
污染指标	进水范围	进水均值	出水范围	出水均值	去除率/%
SS/mg·L ⁻¹	39~151	75	7~28	15	80.0
COD/mg·L ⁻¹	27.66~96.04	56.66	15.35~33.97	23.21	56.7
NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	4.6~8.6	5.69	2.9~5.8	3.73	34.8
TP/mg·L ⁻¹	0.17~0.71	0.41	0.15~0.31	0.20	48.9
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	8.2~24.1	13.95	3.8~7.9	5.26	59.6
浊度/NTU	18~56	32	9~24	12	63.5
色度(铂钴色度)	18~32	24	12~24	17	30.6

由表 7 可知 3 级跌水曝气效果明显,溶解氧浓度由进水的 2 mg/L 左右提高到 6 mg/L 左右.跌水复氧的效果用氧亏比 r 表示^[16],其值等于跌水前后的溶解氧(c_A 、 c_B)与饱和溶解氧(c_s)之差的比率,其

定义式如下:

$$r = \frac{c_s - c_A}{c_s - c_B} \quad (1)$$

式中 c_s 为当时温度下的饱和溶解氧值, c_A 和 c_B 分别为跌水前后的溶解氧值.通过氧亏比 r 可定量地表征跌水复氧的效果, r 越大,复氧效果越好.

表 7 试验Ⅱ跌水复氧效果情况表

Table 7 Aeration effect of waterfall in experiment Ⅱ				
温度/℃	饱和 DO/mg·L ⁻¹	跌水前 DO/mg·L ⁻¹	跌水后 DO/mg·L ⁻¹	氧亏比 r
18	9.18	2.2	6.5	2.60
20	8.84	2.0	6.3	2.69
21	8.68	2.1	6.3	2.76
23	3.39	1.8	6.1	2.88
24	8.25	1.9	6.1	2.95
25	8.11	1.7	6.0	2.90
27	7.87	1.8	5.9	3.08

英国水污染研究实验室曾在实验室和野外对跌水的复氧效应进行了系统地研究,建立了如下预测方程^[17]:

$$r = 1 + 0.38abh(1 - 0.11h)(1 + 0.046t) \quad (2)$$

式中 h 为跌水的自由落差(m); t 为温度(℃); a 为水质参数,其取值为:较清洁水体为 1.8,污染较轻的水体为 1.6,中等污染水体为 1.0,严重污染水体为 0.65; b 为曝气系数,其取值随跌水的方式而变化,普通自由下落跌水为 1.0,阶梯跌水为 1.3,多级阶梯跌水为 1.35;试验Ⅱ中跌水高度(1.8m)与跌水形式(3 级跌水)一定,在假定进水水质稳定的前提

下,可建立氧亏比与水温的一次回归曲线,如图4所示.即假定进水水质稳定,在不同温度下,试验Ⅱ湿地床进水端的跌水充氧效果可用以下公式(曲线)表示:

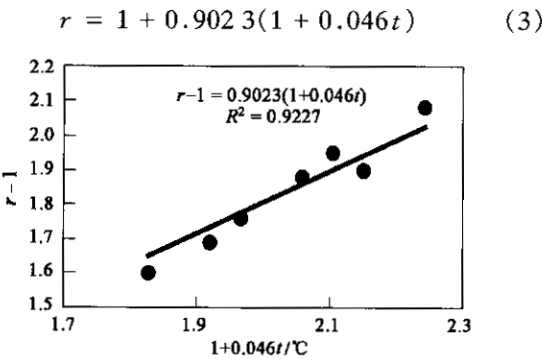


图4 温度对跌水充氧效果的影响

Fig.4 Effect of temperature on waterfall aeration effectiveness of waterfall in experiment II

试验Ⅱ跌水形式为梯级, b 取 1.35, 由拟合方程可反算出公式(2)中 a 值为 1.22. 因此本试验原水水质按照英国水污染研究实验室的地表水分类, 应接近于中等污染水体.

3.3.2 溶解氧分布与湿地床内的推流态特征分析

湿地床Ⅱ实质上是由多个不同的反应单元串联而成的一个连续流反应器, 总的长宽比约 60:1, 理论上可近似认为是完全推流式. 试验测得湿地床Ⅱ内溶解氧沿沟长的分布如图5, 生物量沿沟长的分布以及沟内有机物、总磷、氨氮沿沟长的去除规律分别见图6~9. 其中采样点深度为填料下 0.15m 处.

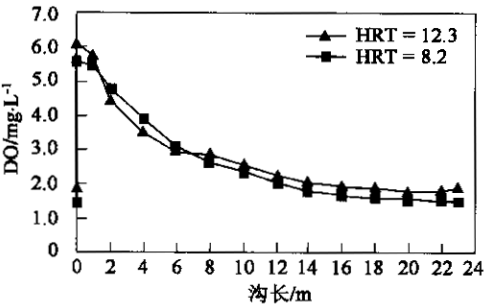


图5 试验Ⅱ溶解氧沿湿地床沟长分布

Fig.5 DO distribution along the wetland trench in experiment II

由图5可知, 跌水充氧后, 湿地床内的溶解氧沿沟长递减, 在前8m沟段, 溶解氧下降迅速, 平均下降速率 $0.3625\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$, 这与沟内生物量沿沟长的分布(图6)及有机物的去除规律(图7)是一致的. 湿地床前段, 有机物底物浓度高, 生物膜量多, 生物在降解有机物的同时, 大量消耗水中的溶解氧, 导致DO值迅速下降; 湿地床后段, 有机底物浓度下降,

微生物活动受到限制, 导致耗氧速率下降. 另外, 植物床内根区的复氧作用^[18]对后段溶解氧变化渐趋稳定也起到一定作用.

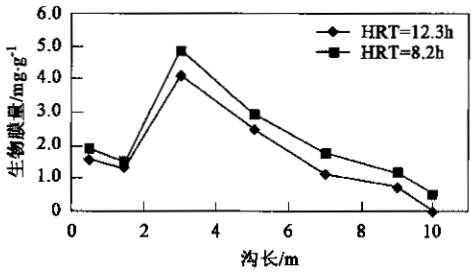


图6 生物膜量沿湿地床沟长的分布

Fig.6 Distribution of the quantity of microorganisms along the wetland trench in experiment II

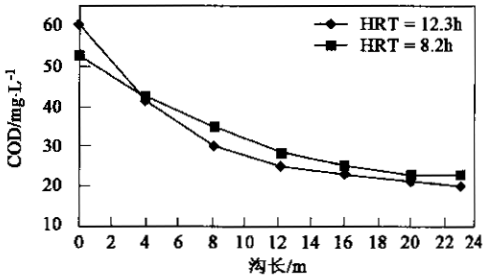


图7 COD沿沟长的去除情况

Fig.7 Removal of COD along the wetland trench in experiment II

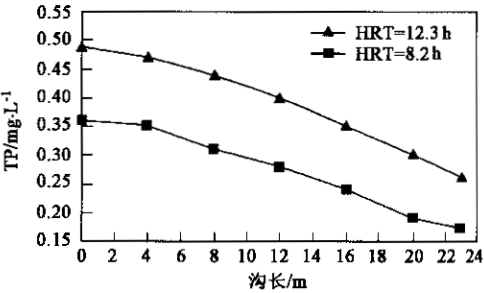


图8 总磷沿沟长的去除情况

Fig.8 Removal of TP along the wetland trench in experiment II

磷的去除(图8)在沟内的分布较为均匀, 与湿地床内溶解氧的下降速率和生物量的分布相关性不大, 说明磷的去除主要依靠填料内的物理化学反应以及植物的吸附, 而不是微生物的作用.

由图9可知, 氨氮在沟内转化的最高速率并没有出现在溶解氧和生物量最高的前4m段, 而是在沟中段. 而且, 沟后段出现了氨氮浓度增高的趋势. 这主要是有机物的氧化作用和硝化作用相互影响的结果^[19]. 沟前段有机负荷 F/M 最高, 异养菌在同硝化菌的生长竞争中占有优势, 并在降解有机底物的同时迅速耗氧, 降低了溶解氧的穿透能力, 抑制了硝化菌的生长, 导致该段硝化作用较低. 而在湿地床6

~9m 段,由于有机底物浓度减少,异养菌生长优势减弱,对水体中溶解氧的争夺减少,使硝化反应得以增强,随着沟长的增加,溶解氧浓度进一步下降,15m 后 DO 值降到 2mg/L 以下,硝化作用受到抑制,而在厌氧或缺氧的条件下,氨化作用加强,所以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度出现了增大的趋势。

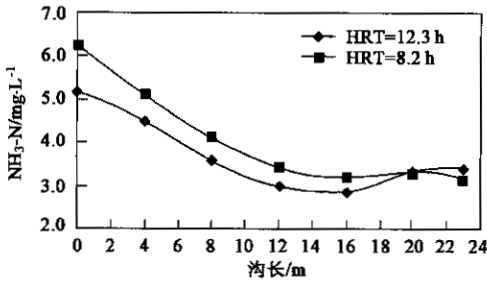


图 9 氨氮沿沟长的去除情况

Fig. 9 Removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ along the wetland trench in experiment II

因此,从促进硝化反应的角度考虑,这样的溶解氧分布对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化不利,应进一步增加湿地床内中、后段的 DO 浓度,使硝化菌在低有机底物的条件下处于对溶解氧竞争的优势地位。在总跌水高度不变的情况下,工程上具体可采用在沟内设置分段多级跌水的方式,以均衡溶解氧在沟内的分布,提高后段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率。图 10 为改为 2 段跌水后溶解氧在沟内的理想分布情况。

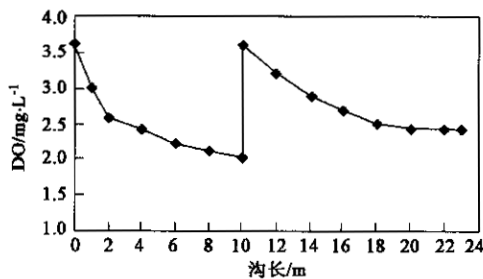


图 10 进口和中部设置 2 段跌水后的理想溶解氧分布示意

Fig. 10 Ideal DO Distribution along the wetland trench when there set two waterfalls at the entrance and in the middle of the wetland trench

4 结论

(1) 湿地床处理受污染景观水体中,床体内溶解氧不足 ($< 2 \text{ mg/L}$) 是导致出水水质尤其是出水感官形状指标不理想的主要原因。

(2) 利用地势落差的跌水是一种有效的自然充氧方式,工程设计上可利用跌水试验求得跌水后的氧亏比 r ,以估算充氧的效果。

(3) 湿地床内溶解氧的分布与沟内生物膜量分布以及沟内有机物沿沟长的去除规律呈现明显的相

关性,而对沟内 TP 沿沟长的去除速率影响不大;

(4) 设置多级多段跌水有利于均衡湿地床填料内的溶解氧分布,促进硝化反应,保证出水水质。

参考文献:

- [1] 潘永璋,张娜,叶林顺,等. 受污染景观水体的生物修复[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(3): 69~71.
- [2] 吕伟娅,张瀛洲,关丹桔. 聚福园景观用水的循环处理与雨水的利用研究[J]. 给水排水, 2002, 28(5): 56~59.
- [3] 毛俊琦,周翊. 高尚住宅区湖水治理及循环利用[J]. 给水排水, 2003, 29(9): 56~58.
- [4] 吕伟娅,张瀛洲,关丹桔. 利用雨水作为景观用水水源的设计与应用研究[J]. 给水排水, 2004, 30(10): 75~78.
- [5] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. Ecol. Eng., 2001, 16: 545~560.
- [6] Carleton J N, Grizzard T J, Godrej A N, et al. Factors affecting the performance of stormwater treatment wetlands [J]. Wat. Res., 2001, 35: 1552~1562.
- [7] Wood A. Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding [J]. Wat. Sci. Tech., 1995, 32(3): 9~21.
- [8] Nairn R W, Mitsch W J. Phosphorus removal in created wetland ponds receiving river overflow [J]. Ecol. Eng., 2000, 14: 107~126.
- [9] 严立,刘志明,陈建刚,等. 潜流式人工湿地净化富营养化景观水体[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2): 11~13.
- [10] 甘树应,杨青. 景观水体污染处理工艺研究及工程应用 [J]. 给水排水, 2002, 28(12): 56~58.
- [11] Piet Len, Grietje Zeeman, Gatzte Lettinga. 分散式污水的处理和再利用——概念、系统和实施 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 190~209.
- [12] Julie Stauffer. 水危机 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 69~108.
- [13] Metcalf, Eddy Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse [M]. McGraw-Hill Companies, Inc, 2003. 940~982.
- [14] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [15] 王占生,刘文君. 微污染源饮用水处理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 43~45.
- [16] Gulliver J S, Thene J R, Rindels A J. Indexing gas transfer in self-aerated flows [J]. Environ. Eng., 1990, 116 (3): 503~523.
- [17] 曹凤中,戴天有等编译. 地表水污染及其控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 37~60.
- [18] Keith R, Bissonnette G K, Sexstone A J, et al. Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands [J]. Wat. Res., 2003, 37: 921~927.
- [19] Belmont M A, Metcalfe C D. Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study [J]. Environ. Eng., 2003, 21: 233~247.