再生水景观功能保障系统的试验研究

李春丽[1] 周 律[1] 贾海峰[1] 张晓健[1] 王永胜[1] 甘一萍[2] 周 军[2] 石 磊[2] 高京华[2]

（1 清华大学环境科学与工程系，北京 100084；2 北京城市排水集团，北京 100022）

摘要 以北京北小河污水处理厂二级出水作为观赏性景观水体补水水源，研究了过滤系统在改善再生水景观功能中的作用，同时得出以再生水作为补水水源的景观水体爆发水华时的水质特征和优势藻种。通过试验研究得出相关的工艺参数。研究表明，采用过滤系统作为再生水景观功能的水质保障系统具有处理效果好、运行经济的特点。

关键词 再生水 景观水体 过滤系统 水华

Experimental research on the scenery safeguard system of reclaimed water

Li Chun-li[1], Zhou Lu[1], Jia Hai-feng[1], Zhang Xiao-jian[1], Wang Yong-sheng[1], Gan Yi-ping[2], Zhou Jun[2], Shi Lei[2], Gao Jing-hua[2]

(*1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Municipal Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China*)

Abstract: The secondary effluent of Beixiaohe Wastewater Treatment Plant was reused to recharge the scenery water body. It was researched the means to improve the quality of the reclaimed water by filtration and the nature and the predominant organisms in outbreak of water crown when reclaimed water was used. The necessary operating parameters have been obtained by experiment research. The research results shown that filtration process with reliable and economical operation would be effective in the scenery water quality safeguard system of reclaimed water.

Keywords: Reclaimed water; Scenery water body; Filtration system; Water crown

0 引言

随着经济发展和工业化程度的提高，水资源短缺和水环境污染已日益严重。利用城市污水经深度处理回用景观水体既可以增加环境湿度，改善小气候，同时也可以缓解城市缺水，提高水资源有效利用率，有效控制水体污染[1]。

在再生水回用景观水体存在的问题中，富营养化是其中的最大障碍之一。因为再生水是来自经过一定深度处理的城市生活污水，其污染物本底值相对较高，营养盐含量丰富[2]；景观水体属于非连续流动水体，流速缓慢，为藻类的生长提供了稳定的水环境；同时人工景观水体的水深一般在 1～2 m，研究经验表明，浅水比深水更易发生富营养化问题[3]，在外界适宜条件下，极易爆发水华，严重影响水体的景观效果。因此在再生水回用于景观水体的过程中，需要采取一定措施来保障再生水的景观功能。

1 试验部分

1.1 试验系统

试验在北京北小河污水处理厂内的露天池塘进行，该池塘面积约 450 m^2，底质是泥底，水深约 1.4 m。再生水原水来自北小河污水处理厂二级出水，二级处理采用普通活性污泥法。

试验中采用过滤作为水质保障系统的主要部分。过滤包括补水过滤和循环过滤[4]。为了补充景观水体的蒸发量、渗透量以及过滤系统反冲洗损失水量，同时缩短水体的换水周期[5]，需要定期对景观水体进

行补水，试验以北小河污水处理厂二级出水经过滤后作为补水水源；循环过滤系统是对池塘中景观水体进行过滤，为了增加水体的流动性，试验中采取了陈立等人提出的“高出低进”的流动方式[6]，它对藻类生存所要求的相对稳定的水环境起了扰动的作用。

过滤系统中使用的过滤器直径 800 mm，净高 3.3 m，过滤面积 0.5 m^2。运行中的滤速大约 30 m/h，工作压力 < 0.35 MPa。过滤器滤料为纤维滤料。混凝剂选用的是液态聚氯化铝(PAC)，纯度(按 Al_2O_3 含量计算)为 10%，采用泵前投加方式。

1.2 分析方法及仪器

试验中对主要指标的监测分析方法见表 1。

表 1 主要监测指标的分析方法

监测指标	分析方法
TP	钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—89)
溶解性磷酸盐	0.45 μm 滤膜过滤 - 钼酸铵分光光度法：(GB/T 11893—89)
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法：(GB/T 11894—89)
叶绿素 a	研磨—离心—分光光度法
藻计数	血球计数板计数
SS	重量法(GB/T 11901—89)

1.3 试验目的

本研究采用传统深度处理—循环过滤系统，模拟再生水回用于观赏性景观水体，试验分析了过滤系统对再生水营养盐以及藻类的去除情况，对再生水景观功能的改善程度，并对过滤系统的经济效益进行评价。

2 试验结果

2.1 再生水中的浮游植物种类组成

试验跨度春、夏、秋三个季节，共检出浮游植物 10 属，分别属于绿藻门和硅藻门。其中绿藻门较多，8 属；硅藻门为 2 属，详见表 2。各藻门在各季节的分布比例不同：在初夏季节绿藻门占 80%，硅藻门占 20%；进入夏、秋两季后，绿藻门的比例上升，绿藻门占 90%，硅藻门占 10%。但各季节中均以绿藻门中小球藻属为优势，小球藻属是水体富营养化常见的优势藻种。

各大门类藻种适应生存于不同的营养型水体中。初夏季节出现的硅藻门中脆杆藻属、小环藻属均属于中富营养化的常见藻类；进入夏季后水体出现了衣藻属、栅藻属等绿藻，均为重富营养型湖泊、水库中常见的优势藻类[7]。可见水体在气温较高的夏、秋季节，处于富营养化或重富营养化状态。

表 2 试验中出现的主要藻种

时 间	4～5 月底	6～8 月	8～9 月
平均日最高水温	21～23 ℃	26～29 ℃	23～25 ℃
优势藻种	小球藻(*Chlorella*)	小球藻(*Chlorella*)	小球藻(*Chlorella*)
出现的其他藻种	栅藻(*Scenedesmus*) 羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*) 新月藻(*Closterium*) 脆杆藻(*Fragilaria*) 小环藻(*Cyclotella stelligera*)	衣藻属(*Chlamydomonas*) 栅藻(*Scenedesmus*) 小环藻(*Cyclotella stelligera*) 羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*) 新月藻(*Closterium*)	衣藻属(*Chlamydomonas*) 栅藻(*Scenedesmus*) 丝藻(*Ulothrix*) 盘星藻属(*Pediastrum*) 微星藻(*Micasterfamly*)

2.2 再生水中的限制性营养盐

北小河污水处理厂二级出水经过滤补充到池塘中的氮磷比均大于 10[8]，试验中以氮磷平均值为基础的氮磷比见表 3，可见试验水体中磷是限制性因子，所以通过去除水体中总磷可以抑制藻类的生长，试验中通过过滤系统去除限制性营养盐总磷。

表 3 再生水中平均氮磷浓度

TP/mg/L	TN/mg/L	氮磷比
0.7	20	28.5:1

2.3 循环过滤系统的过滤效果

2.3.1 对总磷和藻类的去除

试验研究了循环过滤系统中 PAC 在不同投加量下对限制性营养盐 TP 和藻类的去除情况。表 4 给出了投加量在 15mg/L 和 30mg/L 下对总磷和藻类的去除结果。

2.3.2 对悬浮物(SS)的去除

悬浮物是再生水景观功能评价中的一项重要指标。悬浮物含量高，会导致水体浑浊，透明度下降，影响水体的景观功能。表 5 是 PAC 投加量在 30mg/L 时过滤对 SS 的去除结果。进水 SS 的平均值是 16.3mg/L，经过循环过滤系统后，平均去除率达 70%。

表4 不同投加量下对TP和藻类的去除率

日期	PAC投加量/mg/L	TP			藻数量		
		进水/mg/L	出水/mg/L	去除率/%	进水/cell/L	出水/cell/L	去除率/%
5月15日	30	0.49	0.30	37.9	6.10×10^8	3.80×10^8	37.7
5月16日		0.54	0.32	40.8	9.80×10^8	4.80×10^8	50.0
5月19日		0.57	0.43	24.6	8.70×10^8	4.00×10^8	54.0
6月8日		0.22	0.16	28.3	6.40×10^8	3.70×10^8	42.2
6月30日	15	0.61	0.50	18.5	1.60×10^8	1.20×10^8	25.0
7月6日		1.18	1.04	12.3	2.05×10^8	1.50×10^8	26.8
7月8日		0.83	0.67	20.1	1.05×10^8	7.50×10^7	28.6
7月12日		1.05	0.91	13.3	8.00×10^8	5.50×10^8	31.3

表5 循环过滤系统对SS的去除效果

日期	进水SS/mg/L	出水SS/mg/L	去除率/%
20040621	20	6.2	69
20040628	13.5	4.3	68.1
20040815	16	4	75
20040817	19	4.5	76.3
20040818	13	5	61.5
平均值	16.3	4.8	70.5

2.4 对水体景观功能的改善

试验对比了静态补水与循环过滤的景观功能，表6给出了两个过程的运行参数。图1、图2是两个阶段对应的藻数量和叶绿素的变化趋势以及与透明度之间的关系，图中直线左侧是指静态补水，右侧是过循环过滤，日平均过滤8 h，日循环过滤量是120 m^3，试验中平均水温为27 ℃。

由图1、图2可看出，静态补水中由于营养盐的不断累积，藻数量一直处于上升趋势，在补水后期达到了最大值，景观水体爆发了绿藻水华，同时水体变浑浊，透明度降到30 cm。经过过滤器的循环过滤，去除了水体中的限制性营养盐总磷和藻类，水质得到不断改善，藻量逐渐降低，透明度逐渐上升。

表6 静态补水和循环过滤中的运行参数

运行工况	运行时间	TP/mg/L	TN/mg/L	PAC/mg/L
静态补水	0630～0704	1.03	12.3	30
循环过滤	0705～0725	0.45	11.9	

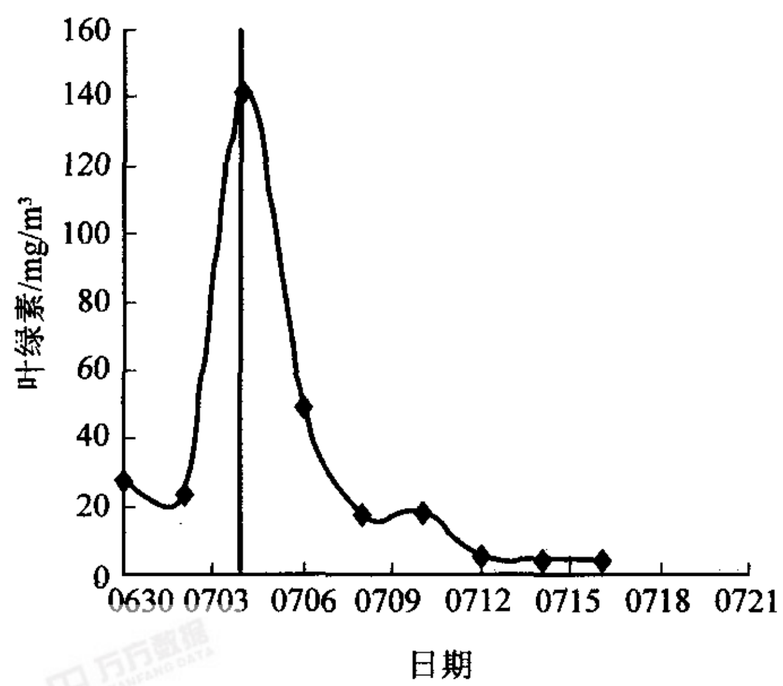

图1 过滤系统中叶绿素的变化趋势

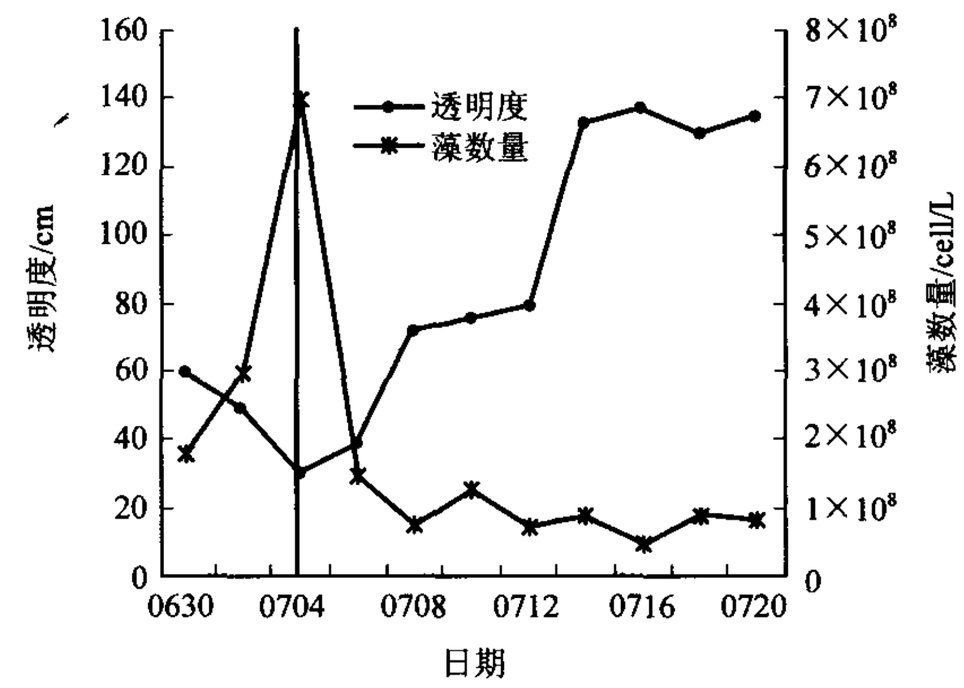

图2 试验过程中藻数量与透明度的关系

试验中同时监测了两个过程中溶解氧浓度变化情况，在透明度最低时测得的溶解氧平均浓度是1 mg/L，通过循环过滤后，水体溶解氧有提高，平均在3.6 mg/L，满足GB/T 18921—2002中观赏性景观水体溶解氧最低指标。

2.5 过滤系统运行费用分析

过滤系统的运行费用包括电费、药剂费、维护及设备折旧费、人工费，日过滤量按120 m^3计。

电费：0.17元/m^3（以0.55元/(kW·h)计）。PAC药剂费：0.05元/m^3。维护及设备折旧费：0.02元/m^3。人工费：0.08元/m^3。

因此采用过滤系统的运行费用是0.32元/m^3。

本研究系统属中试以上规模。与现有的二级出水物化法深度处理工艺相比，各项费用都略低。如酒仙桥中水处理厂的工程设计中，混凝剂采用与

本研究中纯度相同的 PAC，设计的最大投加量为 50 mg/L[9]。华能北京热电厂使用二级出水经深度处理回用作循环冷却水，采用的深度处理工艺是石灰混凝过滤法，对其进行经济评价，制水成本为 1.32 元/m^3[10]。而按照现行水价方案，目前市场上中水价格是 1 元/m^3，因此，本研究中的循环过滤系统与现行中水水价比较，从经济效益上分析可行的。

3 结论

(1)《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中针对观赏性景观环境用水，TP 要求低于 0.5 mg/L，TN 低于 15 mg/L，SS 低于 10 mg/L。试验中再生水经过滤器处理后 TP 为 0.45 mg/L，TN 和 SS 平均值分别为 11.9 mg/L 和 4.8 mg/L，可以已经满足 GB/T 18921—2002 中再生水回用于观赏性景观水体的要求。

(2)本试验检出了春、夏、秋三个季节爆发的藻属，表明水体处于富营养化或重富营养化状态，同时检出优势藻种为绿藻门中的小球藻属。经过北京市一些景观水体的调研发现：以再生水补给的公园景观水体在夏季爆发水华多为绿藻水华；自然水体补给的公园、河湖中，爆发水华时的优势藻种多为蓝藻中的微囊藻属等。因此，在对再生水回用景观水体的预警系统中，可以针对性地预防绿藻门为主。

(3)试验进行了混凝剂 PAC 在不同投加量下对 TP 和藻类的去除效果分析：投加量在 15 mg/L 时，对 TP 的去除率是 14%左右，对藻类的去除率是 28%；投加量在 30 mg/L 时，对 TP 的去除率是 30%左右，对藻类的去除率是 46%，在此投加量下，循环过滤系统可以满足再生水的景观功能。同时对水体进行循环过滤，在一定程度上可以增加水体的流动性。

(4)结合镜检结果和试验池塘景观水体感观进行分析：经过滤器过滤后，水体中的藻数量和叶绿素分别控制在 10^7 cell/L 和 10 mg/m^3 以下时，在池塘水深为 1.4 m 时，水体透明度达到 1.2 m 以上，没有水华爆发的现象，可以满足水体的景观功能；未进行过滤时，藻数量达到 7×10^8 cell/L 以上，叶绿素达到 100 mg/m^3 以上时，透明度只有 20～40 cm，水体浑浊，而且爆发严重的绿藻水华，严重影响了水体的景观功能。

(5)本研究采用的普通深度处理—循环过滤系统工艺可靠、运行稳定、自动化程度高。研究表明该系统保障水质效果好，运行费用低，实用性强。

参考文献

1 李谭笑，王仁强，曹阳华．水景住宅的设计理念与实践．低温建筑技术，2002，2：11～12

2 陈立，王启山，等．《城市污水再生利用 景观环境用水水质》国标制定过程中的若干问题研究．全国城市污水再生利用经验交流和技术研讨会 论文集，天津：2003.10

3 秦伯强．长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探．湖泊科学，2002，14(3)：193～202

4 曾新，陈筋华，等．循环过滤净化游泳池水质的效果观察．实用预防医学，2002，5(9)：511～512

5 杨汉，黄艳芳，等．洞庭湖的富营养化研究．甘肃环境研究与监测，1999，12(3)：120～122

6 陈立．城市污水回用于人工水体的探讨．中国给水排水，1999，15(9)：23～25

7 金相灿，屠清瑛．湖泊富营养化调查规范．第 2 版．北京：中国环境科学出版社，1990

8 陈竑，刘文炜，陈宗永．南湖富营养化主要控制因子分析．环境科学研究，1999，12(5)：31～35

9 张雅玲，赵志军，李艺．酒仙桥中水处理厂工程设计．给水排水，2005，31(1)：41～43

10 曾德勇．二级排水水经深度处理回用作循环冷却水．中国给水排水，2001，17(3)：61～63

◎电话：(010)62773079

E-mail：zhoulu@tsinghua.edu.cn

收稿日期：2004－12－16

修回日期：2005－03－24

北京高碑店污水处理厂 污泥发电 3 万 kW·h/d

目前高碑店污水处理厂的发电机组已增至 5 台，可把每天污水处理过程中产生的污泥全部进行高温消化处理，使沼气产量从原来的 1.5 万 m^3/d 提高到 1.8 万 m^3/d。按沼气发电 1.7 kW·h/m^3 计算，每天发电量提高到 3 万 kW·h，一年节约电费 500 万元。今年，北京高碑店污水处理厂的年发电量有望突破 1 000 万 kW·h，相当于5 000 户家庭一年的用电量。（丹 丹）