

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.01.012

再生水回用于北京景观水体引起的水质变化及其改善措施

孟庆义,吴晓辉,赵立新,廖日红

(北京市水利科学研究所,北京 100048)

摘要 论述再生水水质特性及回补景观水体产生的问题,综述再生补给型景观水体水质维护措施。以北京潮白河为例,分析了再生水回用所产生的水质问题及其改善措施的效果。结果表明:再生水进入河道后,有机污染和叶绿素浓度上升,藻类大量繁殖,河道水体表现出明显的富营养化趋势;但水质改善工程措施可明显降低 N、P 等营养元素浓度,改善水质。

关键词 再生水回用 景观水体 水质变化 潮白河 北京市

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2011)01-0051-04

Water quality variations and improvement measures of reclaimed water reuse in scenic water in Beijing

MENG Qing-yi, WU Xiao-hui, ZHAO Li-xin, LIAO Ri-hong

(Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China)

Abstract : The water quality characteristics and the problems of reclaimed water reusing as scenic water were discussed, and some improvement measures were summarized for the reuse of reclaimed water. With ChaoBai River as an example, the water quality problems of the reclaimed water and the effects of the improvement measures were analyzed. The results showed that the concentrations of COD and Chlorophyll a went up obviously while algae grew up abundantly after the reclaimed water entered into river, and the river showed the trend of eutrophication. However, the improvement measures could reduce the concentrations of N and P and improved the water quality.

Key words : reclaimed water reuse ; scenic water ; water quality variation ; ChaoBai River ; Beijing City

北京市是严重缺水的地区,也是世界上最缺水的大城市之一。2002 年以来,随着该市水资源短缺的加剧,污水再生利用受到了前所未有的重视。截至 2008 年,全市再生水利用量超过 6 亿 m³,再生水利用率达 57.6%。由于《北京城市总体规划(2004—2020 年)》中将市区 12 条Ⅳ、Ⅴ类河道作为再生水回用对象,因此,目前朝阳公园、陶然亭湖、南护城河等一大批景观水体实现再生水补水,年补水量约 1.8 亿 m³。

然而,北京市在推行再生水回用的过程中也产生了一些新问题,其中最主要的是再生水回用于景观水体引起的富营养化问题。由于再生水回用的景观水体功能要求各不相同,不同水体的周边环境、河

道形态千差万别,产生的水质问题也各不相同,只有因地制宜地采取针对性强的措施才能实现再生水的安全回用。笔者以北京潮白河为例,分析了再生水回用所产生的水质问题及其改善措施的效果,以期今后类似河道的再生水回用提供参考。

1 再生水回用于景观水体的水质特性及其问题

许多研究表明,我国再生水回用的现行水质标准中对 N、P 浓度值的规定偏高,由于污染物本底值相对较高,而且水体的稀释自净能力较天然景观水体差,再生水回用的景观水体易出现水华,相伴而来

的还有卫生学和美学问题^[1-2]。王鹤立等^[2]对郑州回水综合利用工程进行的研究表明,对于较高要求的再生水回用于人工景观水体的水质标准, $\rho(\text{TP})$ 应控制在 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 应控制在 $1 \sim 3 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD})$ 应控制在 $20 \sim 30 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5)$ 应控制在 $6 \sim 10 \text{ mg/L}$,夏季严格要求,冬季可适当放宽。赵乐军等^[3]对城市再生水回用于工业、景观水体、城市杂用等 5 项回用标准进行了比较,认为应加强开展再生水补充景观水体的水生效应评价研究。周律等^[4]认为,一些再生水回用量大的水体稀释能力差,长期使用会引起营养盐积累,对于完全以再生水补充的水体, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 宜降低到 1 mg/L 以下, $\rho(\text{TP})$ 宜降低到 0.1 mg/L 以下。郝瑞霞等^[5]对污水再生后回用于河湖补水时壬基酚对鱼类雌激素作用风险进行了评价,壬基酚对部分鱼类的性分化危害风险不容忽视,当河湖补充再生水的比例小于 50% 时,再生水中壬基酚标准限值建议为 $2 \mu\text{g/L}$ 。

再生水回用引起的最大问题是水体的富营养化,特别是当夏季水华暴发时,一旦景观水体中水华发生,则透明度下降,水体浑浊,水味腥臭,水体功能大大降低。研究^[6]表明,以北京城市污水处理厂二级出水作为景观用水的人工水池中,夏季暴发水华的藻种类以绿藻为主,主要有小球藻、十字藻、栅藻,另外还有短时期的裸藻出现,蓝藻一直没有成为优势种。在南方某市开展的以再生水为补水的景观水体的藻类生长模拟试验表明,在春、夏、秋季影响藻类生长的最主要因素是 TP 浓度,而在冬季则是活跃的藻种,再生水露天静置后出现的藻类主要是蓝藻和绿藻,主要包括微囊藻、栅藻和色球藻,在静置初期,微囊藻占优势,后期则是色球藻占优势^[7]。对合肥环城水系的研究^[8]表明,在以再生水为唯一补水源且生态系统功能不完备的情况下,引起水华的优势藻类为蓝藻和绿藻,主要包括微囊藻、丝藻、色球藻和栅藻等。

2 再生水补给型景观水体的水质改善措施

一般认为,水中 TN、TP、 BOD_5 的质量浓度分别大于 0.2 mg/L 、 0.01 mg/L 、 10 mg/L ,就可能引起富营养化。再生水虽然经过深度处理,其浊度、COD 等指标有所下降,但 N、P 等营养元素仍处于较高水平。针对再生水回用带来的景观水体的水质变化,研究人员采用了多种方法进行水质改善,目前已有报道的再生水补给型景观水体的水质改善措施一般可分为以下几类。

2.1 人工循环过滤

人工循环过滤方法在降低 N、P 等浓度的同时,

还可以去除过度繁殖的藻类,是最为常用的水质改善措施之一。人工循环过滤方法很多,其主要区别在于滤料的不同,如北京奥林匹克森林公园人工湖的人工湿地^[9]、天津开发区再生水修复生态示范工程采用的强化人工湿地岛^[10],是以砾石等湿地填料进行过滤。李春丽等^[11]在北京污水处理厂进行的研究,则采用高效纤维滤料过滤器进行循环过滤系统试验。

2.2 生物操控

在直接回用再生水的景观湖泊中,水生植物能显著降低水体的感官性污染,提高水体水质稳定天数,55% 的植物覆盖率能够有效避免再生水直接回用所导致的水体富营养化^[12]。在再生水补给型景观水体中建立水生植物区,放养适宜的水生动物,可以调整植物群落,增加水体生物多样性,构建完整的水生态系统,从而建立水体生态平衡。常用的生物操控措施有控制肉食性鱼类或浮游生物食性鱼类,如鲢、鳙等,引种大型沉水植物,直接投加浮游动物、光合细菌或复合微生物,构建人工生态系统等。

2.3 组合工艺深度处理

单一的水处理方法难以满足实际需要,一些研究人员开始探索利用组合工艺进行深度处理。天津市芳水园小区再生水补给的景观湖采用微滤除藻与生物接触氧化法结合的方法进行景观湖水的处理,效果明显^[13]。北京排水集团研发的 DePAT 系统由混凝沉淀旁滤单元、水力条件改善单元及生态改善单元 3 部分组成,可一定程度去除再生水回用后的色度和臭味问题^[14]。

3 工程实例 潮白河再生水回用

3.1 潮白河概况

潮白河位于北京市顺义区,属于郊区河道。由于上游密云水库不再往下游放水,加之连年干旱,潮白河近 10 年来一直处于断流状态。2007 年北京市实施了“引温济潮”工程,将温榆河的水经 MBR 工艺净化后,调至潮白河向阳闸-河南村橡胶坝段(受水区),以保障受水区的景观用水功能需求。根据北京市河道水体功能要求的相关规定,潮白河水体应达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类水质标准。潮白河受水区及其主要断面如图 1 所示。

目前北京地区大部分再生水在景观水体的回用多采用 GB/T 18921—2002《城市污水再生利用景观环境用水水质》标准,为减轻再生水回用后潮白河的富营养化压力,北京市引温济潮再生水厂设计出水指标作了很大调整,除 TN 外,其他主要指标达到 GB 3838—2002 地表水Ⅲ类标准。

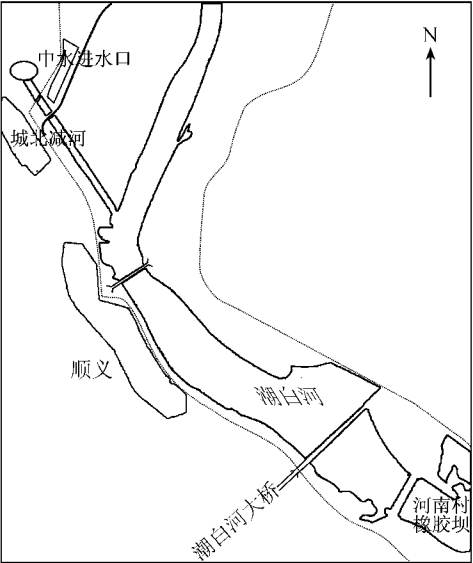


图 1 潮白河及中水进水口位置示意图

表 1 相关水质标准限值及再生水厂设计出水水质

分类	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$
城市污水再生利用景观环境用水水质 (GB/T 18921—2002)	≤ 5	≤ 15	≤ 0.5	/	≤ 6
地表水Ⅴ类水体 环境质量标准 (GB 3838—2002)	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 0.4	≤ 40	≤ 10
引温济潮再生水厂设计出水水质	≤ 1.0	≤ 15	≤ 0.2	≤ 20	≤ 4

3.2 受水区水质变化规律

2008 年 4 月受水区蓄水以来,对再生水来水和各主要断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 、 COD 、 Chl-a 质量浓度进行了连续监测。

再生水来水和各主要监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 、 COD 质量浓度的沿程变化如图 2 所示。可以看出,全部监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水体标准,且一直保持在较低水平,减河闸 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度相对较高。 TN 质

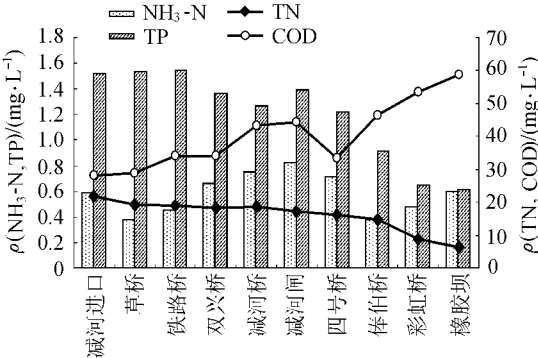


图 2 2008 年潮白河 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 、 COD 质量浓度沿程变化趋势

量浓度在减河进口较高,但进入受水区后自上而下呈下降趋势,尤其是进入潮白河段后,下降趋势更加明显。 TP 质量浓度的沿程变化趋势与 TN 基本相同。

COD 质量浓度在进入受水区以后明显上升,说明受水区水体中有机物等还原性物质浓度增加。可能由于受水区正在进行市政管网截流改造,部分点源污染入河,导致水体 COD 质量浓度升高。

虽然潮白河来水的 Chl-a 质量浓度的测值较低(图 3),年质量浓度平均值仅 $2.5\text{ }\mu\text{g/L}$,但草桥至减河闸测值明显呈上升趋势,下游四号桥至橡胶坝平稳波动。受水区各监测断面的 pH 值沿程表现出增加趋势,最后在潮白河段趋于稳定; DO 质量浓度整体上较高(图 4)。

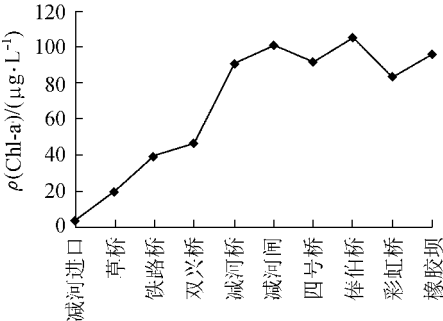


图 3 潮白河 Chl-a 质量浓度沿程变化

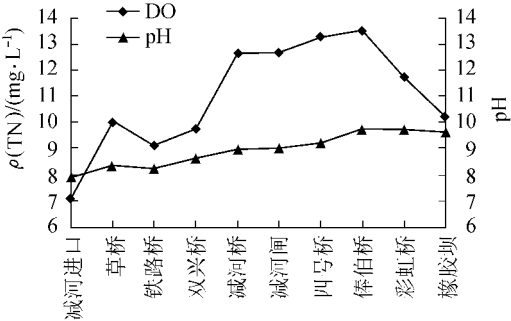


图 4 潮白河 pH 、 DO 质量浓度沿程变化

综合上述各项指标的沿程变化可知,再生水进入受水区后, N 、 P 等营养元素浓度下降,有机污染和叶绿素浓度上升,说明再生水进入河道后藻类大量繁殖,河道水体表现出明显的富营养化状态。

3.3 受水区水质改善工程

由于潮白河地处京郊,河道较宽,河道边绿化用地范围较大,为水质改善工程措施的实施提供了空间。但考虑行洪、行船等问题,水质改善措施不能过多占用河道空间。为改善受水区水质,应对随时可能暴发的水华,主要采取了以下工程措施。

a. 生物调控工程。在城北减河与潮白河内的河湾、浅滩布置水生植物区,共计 11.4 万 m^2 。主要包括在城北减河的草桥附近种植以香蒲为主要品种的挺水植物区 4 万 m^2 ,在城北减河的京承铁路桥附近布置以小茨藻、黑藻、金鱼藻为主的沉水植物区 2 万 m^2 ,在

城北减河的双兴桥附近种植荷花 0.6 万 m²,在潮白河俸伯桥左岸布置植物塘 6 万 m²,在潮白河河南村橡胶坝右岸布置植物塘 0.8 万 m²。此外,在城北减河和潮白河放养白鲢 27.95 万尾,鳊鱼 10.25 万尾。

b. 人工滤层+滤井循环净化工程。利用人工快速渗滤技术原理,在河道内靠近岸边一侧布置人工滤层,放置不同粒径砾石承托层,铺设 UPVC 花管,上面铺设不同粒径填料。通过管道将经过滤层过滤后的水体收集到河道外侧的滤井内,使用潜水泵将水抽出,通过管道输送到滤井下游,实现河道水体的过滤净化和循环。潮白河河道两侧共布置人工滤层加滤井循环净化工程 16 处,循环水量达 7.7 万 m³/d。

c. 辐射井循环净化工程。采用地下砂砾石层和土层作为过滤层,经过水平辐射管收集潜层地下水,潜层地下水进入岸边竖井后,由潜水泵重新抽回到河道中。潜层地下水中的藻类等悬浮物质已基本去除,有机物、NH₃-N、TN 和 TP 浓度也得到了大幅度降低,重新进入河道的地下水既增加了循环水量,又净化了水质。河道内共布置辐射井循环净化工程 4 处,循环水量达 0.7 万 m³/d。

d. 河道强化型缓冲带水质净化工程。利用陆地和水域之间的过渡带,与景观建设相结合,构建植物缓冲带,达到改善水质、修复生态和美化景观的多重效果。潮白河俸伯桥一带建设强化型缓冲带 1.05 万 m²。

e. 生物浮床工程。以高分子材料等为载体和基质,利用水生植物或改良陆生植物,建立高效的人工生态系统,削减水体中的污染负荷。受水区中部难以开展其他工程建设的河段,进行了生物浮床水质净化工程的建设,共建设生物浮床水质净化工程 0.4 万 m²。

f. 人工强化推流曝气工程。以缓流水体流态改变技术研究为基础,在受水区缓流区域——河南村橡胶坝左岸共安装曝气推流装置 7 台。

3.4 水质改善工程效果

水质改善工程于 2008 年底建成,2009 年 3 月开始运行,工程运行后即对受水区的主要断面进行了连续水质监测。2009 年 7 月受水区水质指标与 2008 年同期比较,结果如表 2 所示,NH₃-N、TN、TP、Chl-a 浓度都明显低于来水,COD 浓度则有所升高,主要原因是潮白河内未完全截除的点源污染。总体效果是工程运行后的水华防治压力大大降低。

表 2 2008 年和 2009 年潮白河水质比较

年月	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
2008-07	0.582	16.008	1.203	40.482	61.45
2009-07	0.275	14.133	0.685	44.176	43.36

4 结 论

a. 再生水进入潮白河向阳闸—河南村橡胶坝后,表现出有机污染和叶绿素浓度显著升高,富营养化趋势明显。

b. 通过循环过滤、生物调控等措施的综合运用,明显改善了潮白河的水质,防止了水华的发生。

c. 由于北方城市水资源短缺,再生水成为许多景观水体的唯一补水水源,这类水体应采取有效的水质改善措施降低水体中 N、P 等营养盐浓度,改善水质,控制水体富营养化趋势。

参考文献：

[1] 钱靖华,田宁宁.再生水回用于景观水体存在的问题及防治对策[J].给水排水,2006,32(5):71-74.

[2] 王鹤立,陈雷,梁伟刚,等.再生水回用于人工景观水体的水质目标 策略与技术[J].环境科学,2002,23(12):93-98.

[3] 赵乐军,刘琳,唐福生,等.关于现行再生水水质标准和规范执行情况的讨论[J].给水排水,2007,33(12):120-125.

[4] 周律,邢丽贞,段艳萍,等.再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J].给水排水,2007,33(4):38-42.

[5] 郝瑞霞,万宏文,张毅,等.再生水用于河湖补水壬基酚环境风险评价[J].北京工业大学学报,2008,34(6):626-630.

[6] 吴薇薇,周律,邢丽贞,等.再生水回用人工景观水体优势藻和水华指示指标的研究[J].给水排水,2007,33(5):72-74.

[7] 刘莉,郑兴灿,廖飞凤,等.TP 浓度和季节变化对再生水水体中藻类生长的影响[J].中国给水排水,2007,23(21):102-104.

[8] 黄伟伟,郑兴灿,廖飞凤,等.再生水景观水体富营养化因素的垂直变化特征[J].中国给水排水,2008,24(1):65-72.

[9] 白宇,于德森,周军,等.再生水用于景观水体维护与保障技术示范研究[J].给水排水,2007,33(8):40-42.

[10] 柳成荫,李健,陈双星.天津开发区再生水修复生态示范工程[J].中国给水排水,2005,21(11):10-13.

[11] 李春丽,周律.再生水回用于景观水体的水质控制系统研究[J].现代城市研究,2005(4):32-35.

[12] 彭剑峰,宋永会,郭义川,等.植物对再生水回用于景观湖泊的水质调控能力研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2009,45(5/6):520-523.

[13] 许祯,叶雅丽,庄源益,等.微滤/接触氧化用于景观湖体水质保护[J].中国给水排水,2004,20(5):88-89.

[14] 周军,于德森,白宇,等.再生水景观水体色度和臭味控制研究[J].给水排水,2008,34(1):47-49.

(收稿日期 2009-12-16 编辑 高渭文)