

文章编号: 1006-4710(2013)04-0411-05

再生水作为人工湖唯一水源的小试研究

王怡¹, 张永春¹, 袁园²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市清远中水有限公司, 陕西 西安 710086)

摘要: 为寻求城市人工湖可持续的补给水源并提高缺水城市的污水回用率, 在西安市气温最高月份通过围建小型人工湖, 补充实际再生水, 测定以再生水为唯一水源时人工湖水质的历时变化并预测其富营养化的可能性。结果表明, 将基本满足《城市污水再生利用景观环境用水水质》的再生水作为水源补充人工湖, 在夏季发生富营养化的趋势明显, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度平均为 0.676 mg/L 和 0.064 mg/L。夏季人工湖的物化条件及系统可能存在的硝化作用, 使人工湖中氨氮浓度相对于补充的再生水大幅度下降, 但再生水中 2.5 mg/m³ 的叶绿素可能成为人工湖重要的外源性叶绿素。

关键词: 再生水; 人工湖; 水源; 夏季

中图分类号: X703 **文献标志码:** A

Supply Reclaimed Water as Sole Water Source to a Man-Made Lake

WANG Yi¹, ZHANG Yongchun¹, YUAN Yuan²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Qingyuan Wastewater Treatment and Reuse Co. Ltd, Xi'an 710086, China)

Abstract: In order to search for a sustainable water source to supply lots of man-made lakes in cities and to enhance the ratio of wastewater reuse, a pilot lake is constructed in Xi'an to study the variance of water quality and eutrophication in the lake during the hottest months when the reclaimed water is used as the sole water source. The results indicated that reclaimed water, basically meeting with the water quality standard for scenic environment reuse of the urban recycling water, can be used as water source to supply the man-made lake. However the eutrophication is apt to happen in summer when the man-made lake is supplied with the reclaimed water. The average concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in the man-made lake arrived at 0.676 mg/L and 0.064 mg/L respectively. On the other hand, the environment of man-made lake and possible nitrification, can lead to a large decrease of inorganic nitrogen compared with the raw reclaimed water. However a trace chlorophyll-a of 2.5 mg/m³ in the reclaimed water might become an exogenous chlorophyll to the man-made lake.

Key words: reclaimed water; man-made lake; water source; summer

人工湖的正常运营, 离不开充足可靠的补给水源, 而西安市目前的水资源实际状况是降雨量有限、地下水缺乏, 地表水资源人均仅为 316 m³/a, 这一现状成为西安国际大都市建设的瓶颈^[1]。如果人工湖没有可持续的补给水源或者需要很高的引水成本, 那么人工湖工程就会给城市运行带来沉重的负

担。因此, 寻求可持续的人工湖水源, 对于西安市的水资源保护和生态城市建设具有重要意义。

再生水作为城市人工湖供水水源, 具有水量充足可靠、价格便宜的优点。西安市市政污水处理设施完善, 再生水生产能力巨大, 但目前的再生水回用仅限于热电厂, 导致整个污水回用率不足 5%。因此, 如

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108368); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2011-1139)

作者简介: 王怡, 女, 教授, 博士, 研究方向为水污染控制的理论和技术。E-mail: wangyi1003@xauat.edu.cn。

果能够将再生水作为人工湖的水源,不仅能大幅度地降低城市人工湖运行成本,而且能够提高西安市的污水回用率,间接地保护和节约了西安市的水资源。

本研究基于西安市某中水公司再生水水质现状,选定西安市气温最高(6~8月)月份,通过围建小型人工湖,补充实际再生水,测定以再生水为唯一水源时人工湖水质的历时变化,研究该再生水直接作为人工湖水源的可行性,为未来再生水在西安市景观水体中大规模回用提供基础数据。

表1 城市污水再生利用景观环境(湖泊类)用水水质标准及试验水质

Tab.1 Water quality standard for scenic environment reuse of urban wastewater and the quality of reclaimed water in this experiment

项目	COD/(mg/L)	BOD/(mg/L)	pH	余氯/(mg/L)	DO/(mg/L)	TP/(mg/L)	TN/(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)
标准水质	50	6	6~9	0.05	1.5	0.5	15	5
试验用水	12.3~34.3	0~4.69	6.76~7.84	0~0.23	1.63~5.82	0.06~0.28	0~13.7	0.85~9.13

1.2 人工湖概况

进行试验的人工湖位于西安市丰庆公园西北角,通过筑堰改造使该湖成为一个相对封闭的小型湖体。该小型湖呈不规则的长方形,经现场测定,长度约为23.5 m,宽度约为11.2 m,总面积约为263.2 m²。湖中心深度范围为35.9~52.9 cm,周边水深范围为26.2~43.2 cm,为小型浅湖。该湖经过清淤,于2012年6月5日注入再生水,启动本试验。试验运行期间,再生水通过压力管道从再生水厂补充,每周补水一次使水深达到启动时的水深。

1.3 水质测定

水质测定时段为2012.6.6~2012.8.2,测定频次为1次/4天,测定项目如表2所示,测定方法依据《水和废水监测分析方法》^[3]。

表2 水质测定项目及方法

Tab.2 Analytic items and methods in the experiment

项目	方法	项目	方法
水温	温度计法	DO	电化学探头法
pH	玻璃电极法	矿化度	重量法
总氮	过硫酸钾氧化紫外分光光度法	总磷	过硫酸钾消解法+钼锑抗分光光度法
氨氮	纳氏试剂分光光度法	溶解性磷	钼锑抗分光光度法
亚硝氮	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	COD	重铬酸钾法
硝氮	紫外分光光度法	细菌总数	营养琼脂平板计数法
叶绿素a	丙酮提取分光光度法		

1 材料与方法

1.1 再生水水源及水质

试验采用的再生水为西安市某中水公司生产的再生水,该公司以某市政污水处理厂二级出水为进水,采用预加氯+絮凝+沉淀+砂滤+消毒传统工艺,出水水质如表1所示,除氨氮外均符合《城市污水再生利用景观环境(湖泊类)用水水质》(GB/T18921-2002)要求^[2]。出水通过压力管道直接输送到试验地点。

1.4 采样点设置及样品采集

该研究共设置5个采样位置,分别位于人工湖的四个角和湖中心,采样方法按照《湖泊富营养化调查规范》,现场测定水温和溶解氧,其余样品24 h内在西安建筑科技大学环境与市政工程学院重点实验室测定。采样时间均为上午9:00~9:20。

2 结果与分析

2.1 水质测定结果

2.1.1 温度及DO历时变化

湖泊水体温度是影响水生生物存活和繁殖的重要因子^[4],而且湖水温度还影响湖泊中氧的浓度。当湖泊深度较大时,夏季湖水温度有明显的正温层现象,使得水层上下循环不畅,造成下层水域缺氧,导致水生鱼类的死亡。图1(a)为湖水温度随时间的变化,由图可知,在西安市夏季最热时段湖水的温度范围为23.9~30.5℃,平均为27.7℃。湖水较高的温度主要由于本人工湖属于极浅型人工湖,水温受气温影响较大。

溶解氧(DO)对水体中各种水生生物的生长繁殖具有决定性意义^[5-6],湖水中DO是耗氧与复氧的动态平衡,耗氧主要来自于水中耗氧物质(有机物和一些还原性无机物)及鱼类等水生生物的呼吸,复氧主要来源于温度和气压决定的大气复氧以及水生植物的光合作用。耗氧严重且DO得不到及时补充时,水体中DO就会下降。当水中的DO<5 mg/L时,一些鱼类的呼吸将会发生困难。图1(b)为湖水

DO 随时间的变化,从图中可以看出,本人工湖 DO 浓度虽有波动,但基本保持在 5 mg/L 以上,且前期浓度明显高于后期。其原因可能在于,前期人工湖新补充再生水,水生生物较少,DO 消耗低;随着水生生物的滋生,后期 DO 浓度有所下降。

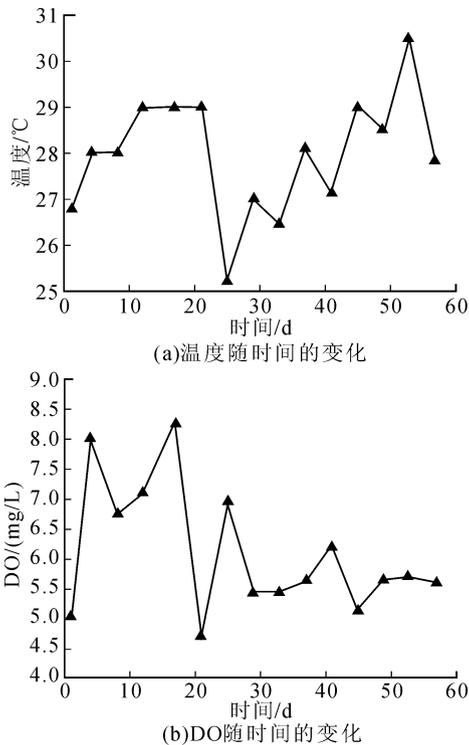


图1 湖水温度及溶解氧历时变化

Fig. 1 Time course of temperature and dissolved oxygen (DO) in the man-made lake

2.1.2 pH 及矿化度历时变化

pH 对水环境中物质的存在形式及迁移过程具有明显影响^[5-6]。由于蒸发过程在夏季对地表水影响较大,湖水含盐量会提高,导致水体矿化度及 pH 值提高。图 2(a) 和图 2(b) 分别为湖水的 pH 值和矿化度的历时变化。从图 2 可以看出,本人工湖水的 pH 值范围为 7.15 ~ 8.55,矿化度变化范围为 308 ~ 448 mg/L,均处于较佳的状态。测定期间(运行 25 ~ 37d)因为连降暴雨 4 次,使 pH 值达到最小值 7.15,但矿化度变化受降雨影响不大。

2.1.3 营养素浓度历时变化

无机氮浓度一直是地表水富营养化过程颇受研究者关注的因素,试验期间对该中水公司再生水测定结果表明,出厂 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化范围为 6.19 ~ 9.13 mg/L,均大于 5 mg/L。将再生水补充入人工湖后,人工湖水中氨氮、硝氮及亚硝氮浓度随时间的变化如图 3(a) 所示。从图中可以看出,与中水公司出水氨氮浓度相比,人工湖中氨氮浓度大幅下降,变

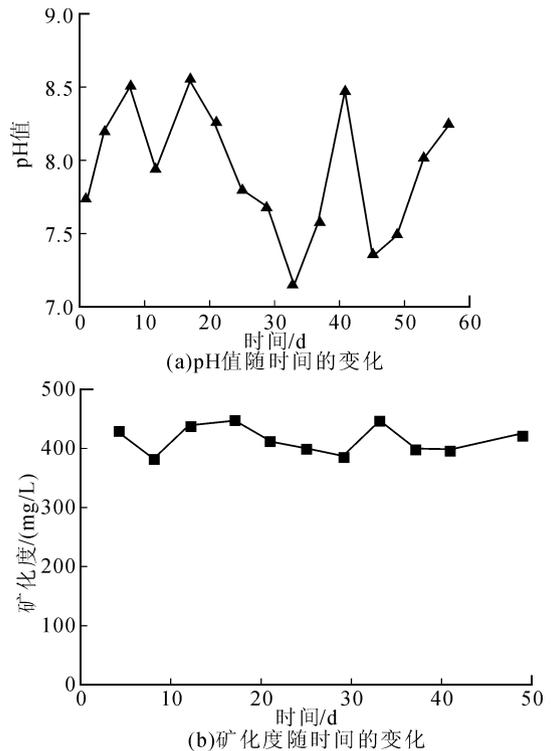


图2 湖水 pH 值及矿化度的历时变化

Fig. 2 Time course of pH value and salinity in the man-made lake

化范围为 0.132 ~ 2.547 mg/L,平均为 0.676 mg/L。此外,还有少量硝氮(均值为 0.435 mg/L)和微量亚硝氮(均值为 0.054 mg/L)产生。以再生水为水源的人工湖中氨氮大幅下降的原因在于:(1)较高的水温,中性偏碱性的 pH 条件,有可能导致部分氨氮以 NH_3 形式进入大气,减小了湖水中氨氮的浓度;(2)再生水的上游污水处理系统为典型的生物脱氮工艺,即使再生水制取过程中经过了消毒流程,再生水中仍可能残留部分硝化菌,再加上人工湖中较高的 DO 浓度,硝化作用可能成为以再生水为水源的人工湖中夏季的主要生化过程,从而降低了水体中氨氮的浓度。总之,由于夏季人工湖的物化条件及生化条件,使人工湖中氨氮浓度出现明显降低。

磷是影响水体富营养化的最主要因素,水体中能够被藻类利用的磷基本为溶解态磷,特别是 PO_4^{3-} ,因此, PO_4^{3-} 与水体富营养化的关系最为密切^[7]。本试验研究期间对水体的 PO_4^{3-} 和 TP 测定结果如图 3(b) 所示。从图可知, PO_4^{3-} 和 TP 的变化趋势基本相同,TP 波动较大(0.04 ~ 0.307 mg/L),平均为 0.154 mg/L; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度变化范围为 0.02 ~ 0.204 mg/L,平均为 0.064 mg/L。试验期间对该中水公司再生水测定结果表明,出厂 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度变化范围分别为 0.03 ~ 0.396 mg/L 和 0.01 ~

0.11 mg/L, 均值分别为 0.07 mg/L 和 0.03 mg/L。因此, 人工湖水中 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均高于再生水厂出水的对应值, 其原因需要进一步的探讨。

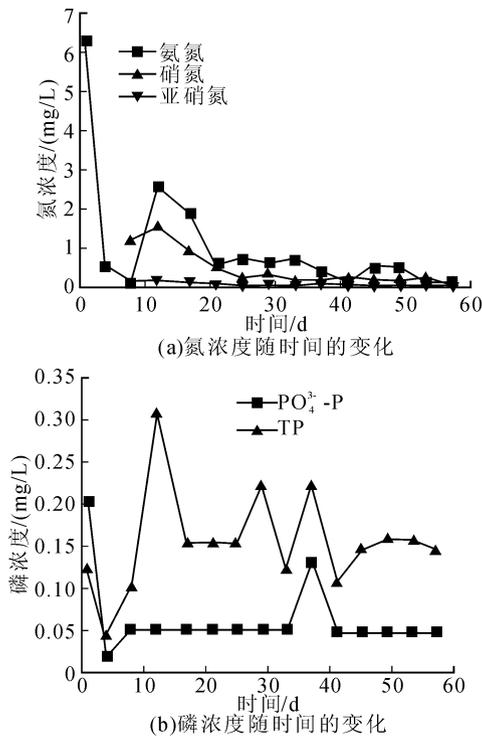


图3 湖水氮磷浓度的历时变化

Fig. 3 Time course of nitrogen and phosphorus concentration in the man-made lake

2.1.4 有机物及微生物历时变化

COD作为一种常用的评价水体污染程度的综合性指标, 在我国一般景观用水中其浓度要求小于 40 mg/L ^[8]。本研究中, 湖水 SCOD 浓度历时变化如图 4(a) 所示, 从图中可以看出, 湖水中 SCOD 浓度在测定初期呈现逐渐升高趋势, 从起始的 22 mg/L 上升到了 75 mg/L , 然后逐渐稳定在 70 mg/L 左右。其中, 由于暴雨扰动人工湖底泥而导致第 33 天的 SCOD 浓度达到最大值 99 mg/L 。整个测定期间, SCOD 浓度平均为 69 mg/L , 高于 40 mg/L 。

水体中微生物不仅与区域环境有着密切的联系, 还在物质循环与能量流动中起重要作用^[9]。本研究对湖水细菌浓度的测定结果见图 4(b), 该图表明, 人工湖细菌浓度平均为 6300 个/mL , 且变化幅度不大。

2.1.5 叶绿素 a 历时变化

叶绿素 a 是水体初级生产力的重要指标, 它是藻类重要的组成成分之一。叶绿素 a 含量高低与水体中藻的种类数量密切相关, 也与水环境质量密切相关。因此, 对叶绿素 a 进行测定, 可以了解水体的生产力和富营养化水平。本研究中, 中水公司出水

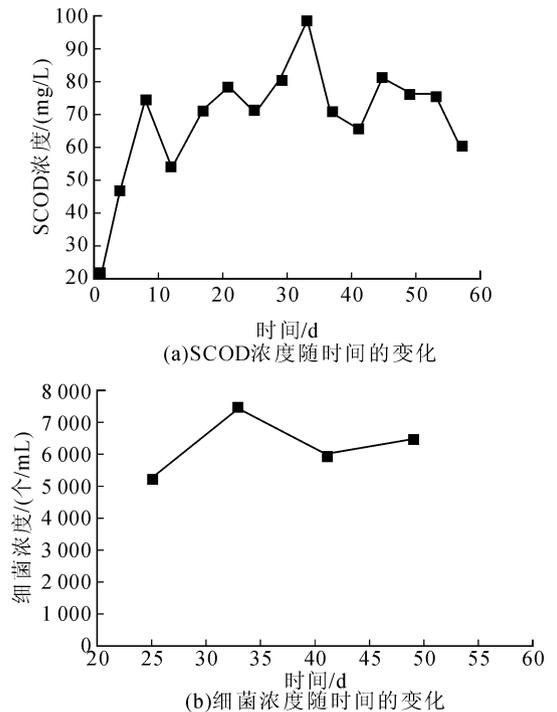


图4 湖水中 SCOD 及细菌浓度历时变化

Fig. 4 Time course of SCOD and bacteria concentration in the man-made lake

叶绿素 a 的浓度均小于 2.5 mg/m^3 。

图 5 为人工湖中叶绿素 a 浓度的历时变化, 可以看出, 人工湖中叶绿素 a 的浓度波动较大 ($14.83 \sim 165.36 \text{ mg/m}^3$), 总体水平较高 (平均为 97 mg/m^3), 且历时呈上升趋势。由于降雨和补水, 测定期间叶绿素 a 的浓度虽多次下降, 但测定后期, 湖水颜色明显加深, 透光度显著下降。

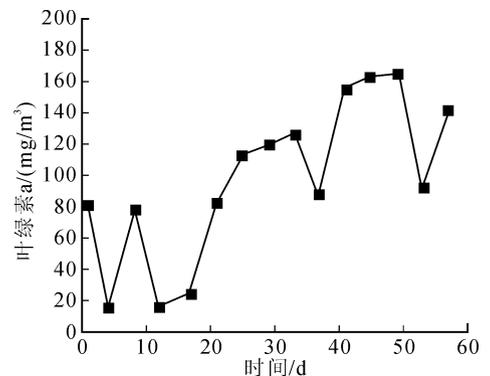


图5 湖水叶绿素 a 浓度的历时变化

Fig. 5 The time course of chlorophyll-a concentration in the man-made lake

2.2 人工湖富营养化预测

对于湖库的富营养化判别, 通常认为, 水体中的水质达到表 3 第 2 列的状态, 就可能引起富营养化^[10]。由表 3 可以看出, 除了细菌总数外, 其他水

质指标远大于发生富营养化的临界值。但是由于人工湖运行时间较短,富营养化导致的溶解氧浓度降低现象尚未发生。需要说明,在本研究中有有机物指标采取了简单准确的化学需氧量(COD)代替了富营养化评价中通用的生化需氧量(BOD)。而出厂水质监测表明该再生水 BOD/COD 均值为 0.148 (样本数 $n = 9$),据此该人工湖的 BOD 浓度约为 10.2 mg/L,略大于 10 mg/L。总之,以再生水为唯一补充水源的人工湖,夏季发生富营养化的趋势明显。

表3 本人工湖的水质条件与富营养化类比表

Tab.3 Compare the water quality of the man-made lake with the condition of eutrophication

参数	富营养化的水质条件	本人工湖的水质条件
TN	>0.2 ~ 0.3 mg/L	>1.61 mg/L
TP	>0.01 ~ 0.02 mg/L	>0.04 mg/L
有机物	BOD >10 mg/L	COD >69 mg/L
pH	7 ~ 9	7.15 ~ 8.55
细菌总数	>100 000 个/mL	>6 300 个/mL
叶绿素 a	>10 mg/m ³	>14.83 mg/m ³

3 结论

从短期最不利条件下的人工湖水水质测定结果可以看出,以再生水作为人工湖唯一水源,即使出厂水质满足《城市污水再生利用景观环境用水水质》要求,人工湖中碳氮磷浓度均值仍然大于富营养化水质的临界值,因此,发生富营养化的趋势明显。此外,再生水中含有的微量叶绿素 a ($< 2.5 \text{ mg/m}^3$),在较高温度、营养物及光照充分条件下,成为人工湖不可忽视的外源性叶绿素。然而,夏季人工湖的物化及生化条件使人工湖中氨氮浓度大幅度下降,远小于出厂浓度。

参考文献:

[1] 严伏朝,解建仓,秦涛,等. 基于信息扩散理论的水资源短缺风险评价[J]. 西安理工大学学报,2011, 27(3): 285-289.
Yan Fuchao, Xie Jiancang, Qin Tao, et al. Risk evaluation of water shortage based on information diffusion theory [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3): 285-289.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T18921-2002 城市污水再生利用景观环境用水水质[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

The People's Republic of China State Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine. GB/T18921-2002 The reuse of urban recycling water—water quality standard for scenic environment use[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002.

[3] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analysis method of water and wastewater [M]. 4th edition. Beijing: China Environment Science Press, 2002.

[4] 李静,陈非洲. 太湖夏秋季大型枝角类(Daphnia)种群消失的初步分析[J]. 湖泊科学,2010, 22(4): 552-556.
Li Jing, Chen Feizhou. Preliminary analysis on population decline of Daphnia in summer and autumn in Lake Taihu [J]. Journal of lake Sciences, 2010, 22(4): 552-556.

[5] 陈金萍,陈述江. 淡水养殖水化学[M]. 北京:农业出版社,1993.

[6] 张玉,王洪滨,何江,刘海涛,朱存良,王志新,张建明,赵月红. 内蒙古达里诺尔湖水水质现状调查[J]. 水产科学, 2008, 27(12): 671-673.
Zhang Yu, Wang Hongbin, He Jiang, et al. Investigation of water quality in the Dalinor Lake in inner Mongolia[J]. Fisheries Science, 2008, 27(12): 671-673.

[7] 赵珊,孟春霖,刘晶晶,等. 奥林匹克森林公园人工湖营养盐与藻类生长规律研究[J]. 给水排水,2010, 36(2): 38-41.
Zhao Shan, Meng Chunlin, Liu Jingjing, et al. Research on relation between nutrient salt and algae growth in Olympic Forest Park in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(2): 38-41.

[8] 国家环保总局. GB3838-2202 中华人民共和国地表水质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
State Environmental Protection Administration. GB3838-2202 Surface water quality standard of the People's Republic of China[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2002.

[9] 陈新蕾,许均华,华中,等. 东湖水体的微生物污染状况初步调查[J]. 氨基酸和生物资源, 2004, 26(1): 16-19.
Chen Xinlei, Xu Junhua, Hua Zhong, et al. Elementary investigation of East Lake on its microbial contamination[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2004, 26(1): 16-19.

[10] 程声通. 环境系统分析教程[M]. 第二版. 北京:化学工业出版社,2012.

(责任编辑 杨小丽)