

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.06.020

# 再生水回用于社区景观水体的富营养化风险与成本分析

王力玉<sup>1,2</sup>, 秦华鹏<sup>1,2</sup>, 王 波<sup>3</sup>, 李旭宁<sup>3</sup>

- (1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 广东 深圳 518055;  
2. 北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055;  
3. 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:**以深圳某社区内人工快渗处理装置与人工景观水体系统为例,根据再生水换水控制实验和富营养化模型模拟结果,建立再生水水质、换水周期与景观水体富营养化风险的关系;结合再生水处理成本分析,建立该系统运行费用、占地面积与水体富营养化风险的关系曲线。该方法可为社区景观水体设计与维护中权衡再生水处理成本与景观水体富营养化风险的矛盾提供科学依据。

**关键词:**景观水体;富营养化;再生水;成本分析

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2012)06-0093-04

## Eutrophication risk and cost analysis of reusing reclaimed water for community landscape water body

WANG Li-yu<sup>1</sup>, QIN Hua-peng<sup>1,2</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, LI Xu-ning<sup>3</sup>

- (1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;  
2. The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;  
3. Environmental Technology Center, Shenzhen-Hong Kong Institution of Industry, Education and Research, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:**An artificial rapid infiltration treatment and landscape water system in a community in Shenzhen was studied. The relationships between reclaimed water quality, the water exchange cycle, and eutrophication were established based on the results of a water exchange experiment and eutrophication simulation. The relationships between treatment cost, occupied area of treatment facilities, and eutrophication risk of the landscape water were obtained through cost analysis. The results indicate that the method can provide a scientific basis for balancing the contradiction between the cost of reclaimed water and the eutrophication risk of landscape water in design and maintenance of the community landscape water body.

**Key words:** landscape water body; eutrophication; reclaimed water; cost analysis

再生水回用于景观水体具有广阔的应用前景。再生水主要来源于集中式再生水厂或分散式、小型再生水处理系统。对于城市公园等大型景观水体,一般采用集中式再生水回用于景观水体的模式。集中式再生水厂在管理上具有可靠性和高效性,可以更好地对再生水处理过程进行控制;其缺点是占地

面积大,且在管网的布设上费用高昂<sup>[1]</sup>。在这种模式下,再生水系统与景观水系统是独立运行的。国内外学者分别针对景观水体富营养化风险和再生水处理能力两方面开展了研究。钱清华等<sup>[2-3]</sup>研究了不同再生水水质对景观水体富营养化风险的影响;吴文雯等<sup>[4]</sup>提出,根据气温变化改变景观水体换水

周期可以加强对景观水体富营养化风险的控制;而刘畅等<sup>[5]</sup>通过换水实验和模型模拟,分析了水质和换水周期对富营养化风险的影响。在再生水的处理能力方面,从20世纪90年代开始,污水再生研究就已启动,并取得了较好成效<sup>[6]</sup>;刘杰等<sup>[7]</sup>通过对城镇污水处理厂用地、运行及建设费用的研究,分析了占地面积、运行及建设费用与处理规模之间的关系。

对于社区的小型水体,由于其用水量少且分散,可通过分散式污水处理后就地回用<sup>[8]</sup>。在这种模式下,再生水系统与景观水体系统是联合运行的,而且运行费用一般由相应的社区承担,在设计时需要统筹考虑运行费用、占地面积、富营养化风险等问题,但目前还缺少相应的研究。

笔者以北京大学深圳研究生院内的再生水与景观水体系统为例,拟通过对换水控制实验和水体富营养化模拟,并结合再生水处理成本分析,建立该系统运行费用、占地面积与水体富营养化风险的关系曲线。

## 1 研究方法

北京大学深圳研究生院校园内拟建一个深1m,体积600 m<sup>3</sup>的景观湖。并将校内学生宿舍的生活污水处理后作为景观湖的换水水源。根据深圳大学城北京大学校区物业水表统计的数据,目前北京大学深圳研究生院学生宿舍污水量平均为800 m<sup>3</sup>/d。污水处理设施为校园内待改建的人工快速渗滤系统。

研究方法主要包括再生水换水控制实验、景观水体富营养化模拟和再生水处理成本分析,在成本分析中还包括对再生水处理费用及设施的占地面积分析。

### 1.1 再生水换水控制实验

再生水换水控制实验于2008年9月和2009年5月在北京大学深圳研究生院校园内进行,实验装置主要由人工快速渗滤系统(CRI)、流量调节池、实验池(1m×1m×1m)3部分组成。通过对实验池内的水体进行可控的连续换水实验,研究再生水水质、换水周期对实验池水体中Chl-a浓度、DO和水温等指标的影响<sup>[5]</sup>。再生水换水控制实验也为景观水体富营养化模型的参数校准和验证提供了数据。

### 1.2 景观水体富营养模型

由于水体富营养化演变过程的复杂性,且具有一定的偶发性,数学模型已成为研究富营养化问题的重要手段。本研究选用美国国家环境保护局推荐使用的WASP6的EUTRO富营养化模块,并采用中等复杂程度的富营养化动力学选项(intermediate eutrophication kinetics with benthos)进行建模。

WASP6能够有效模拟NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、无机磷、浮游植物、碳素生化需氧量、DO、有机氮和有机磷等8个状态变量<sup>[9]</sup>,其状态变量的全面性、数据输入的规范性和在时空尺度上的灵活性,适合于本研究的模拟需要。

模型主要的外界输入条件有:水质、换水周期、光照辐射、风速、水温以及雨强等,其中主要变量为水质和换水周期,这是由于本研究针对的是特定的景观水体,在确定水深及相同的气候条件下,通过对富营养化风险的控制找到合适的处理工艺以及出水水质和水量的相关性。

利用再生水换水控制实验数据对WASP富营养化过程模型进行参数率定和验证。主要特征参数的率定结果分别为:浮游植物20℃最大生长速率3.2 d<sup>-1</sup>、浮游植物非捕食性死亡速率常数0.4 d<sup>-1</sup>、浮游植物氮摄入的半饱和常数0.05 mg/L、浮游植物磷摄入的半饱和常数0.5 mg/L、浮游植物20℃内源呼吸速率常数0.125 d<sup>-1</sup>。验证结果表明,拟合度较好,模型可用于进行中水回用于城市景观水体富营养化过程的情景分析<sup>[5]</sup>。

### 1.3 再生水处理成本分析

再生水处理成本考虑污水处理设施的建设成本和运行成本,还包括设施的占地面积。建设费用一般包括:征地费、设备购置费、建筑工程费、安装工程费和预备费用等<sup>[7]</sup>。运行成本包括:人员工资及附加费、材料费、水电费、折旧费、管道维护费、设备维修费、化验费、污泥运费、管理费、财务费、车间费及其他费用等<sup>[10]</sup>。总投资额与工艺类型、工艺复杂程度、构筑物多少和工艺设备成本相关。占地面积与再生水的处理工艺、处理规模及出水水质相关。

在研究案例中,污水处理设施为校园内待改建的人工快速渗滤系统。因此,本研究基于人工快速渗滤系统实例、相关专利和文献<sup>[11-12]</sup>,估算不同再生水补水规模下的处理费用和占地面积。例如,当处理规模分别为75 m<sup>3</sup>/d、300 m<sup>3</sup>/d和600 m<sup>3</sup>/d时,出水达到GB/T18921-2002《景观环境用水水质标准》的单位处理费用分别为0.84元/m<sup>3</sup>、0.66元/m<sup>3</sup>、0.50元/m<sup>3</sup>;单位占地面积分别为1.67 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>、1.50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>、1.47 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 再生水水质、换水周期与水体富营养风险的关系

研究表明:富营养化发生条件为充足的氮、磷等营养物质,缓慢的水流状态及适宜的温度条件等<sup>[13]</sup>。王鹤立等<sup>[14]</sup>综合考虑安全性与技术可行性,建议当再生水回用于人工景观水体时,水质标准

应相应提高,如 $\rho(\text{TP})$ 应控制在 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ , $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 应控制在 $1 \sim 3 \text{ mg/L}$ , $\rho(\text{BOD})$ 应控制在 $6 \sim 10 \text{ mg/L}$ ;夏季要求较为严格,而冬季可以适当放宽。

根据以上的研究,本研究选取以下水质标准的控制指标(表1)。

标准	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
地表V类水标准 GB3838—2002	10	2	2	0.4
景观环境用水水质 标准 GB/T18921—2002	6	5	15	0.5

水动力条件按照 GB/T 18919—2002《城市污水再生利用—景观环境用水水质》设定为低进高出,景观水体内部均匀稳定换水,水力停留时间分别选取 $1 \text{ d}, 2 \text{ d}, \dots, 8 \text{ d}$ 进行模拟。以深圳典型的夏季气候作为气象参数的输入条件(表2)。

气象参数	水温/ $^{\circ}\text{C}$	太阳辐射/(Langley $\cdot \text{d}^{-1}$ )
日变化范围	24 ~ 28	0 ~ 1800
日平均值	26	780
昼夜变化规律	6:00	24
	8:00	26
	14:00	28
	18:00	26
	22:00	25

Chl-a 浓度大小标志水体中藻类生物量的大小,Chl-a 浓度越高,水体的富营养化程度越高,水华风险越大<sup>[15]</sup>,因此选择 Chl-a 浓度作为景观水体富营养化风险的主要表征因素。将水质、换水周期及气象条件分别对应输入到 WASP 富营养化模型中进行模拟,得到再生水水质、换水周期与景观水体 Chl-a 峰值质量浓度的关系,见图1。

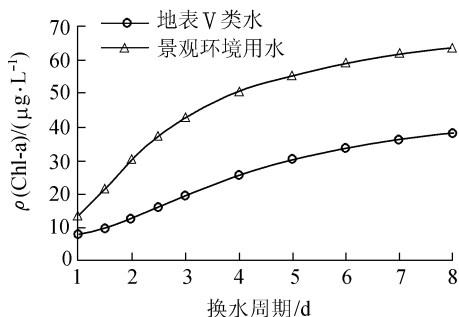


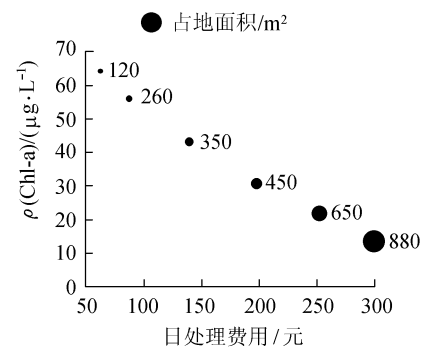
图1 不同水质、换水周期情况下, Chl-a 峰值质量浓度变化

图1表明,在相同的水质标准下,随着换水周期的增大,Chl-a 质量浓度逐渐升高,即富营养化风险有逐渐增加的趋势;在相同的换水周期下,提高再生水的水质标准,Chl-a 的浓度相应降低,即富营养化

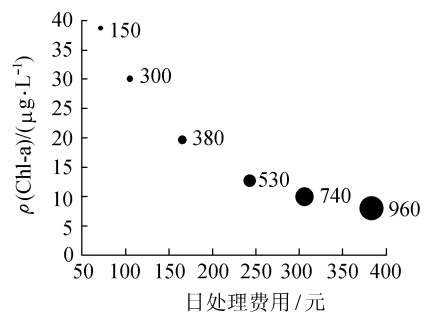
风险有减小的趋势。

## 2.2 处理费用、占地面积与水体富营养风险的关系

综合富营养风险和再生水处理成本分析,得到人工快渗处理工艺在不同水质条件下 Chl-a 峰值质量浓度与污水日处理费用及占地面积的关系,见图2。



(a) 再生水水质达到景观环境用水标准



(b) 再生水水质达到地表V类水标准

图2 不同水质条件下,Chl-a 峰值质量浓度与污水日处理费用及占地面积关系

由图2可知,在特定的再生水水质条件下,随着再生水处理成本的增加(亦即处理规模的增大、换水频率加快),Chl-a 的浓度逐渐降低。其中,当再生水水质达到景观用水标准时,Chl-a 的浓度随处理费用增加几乎呈线性减少;而当再生水水质达到地表V类水质标准时,Chl-a 的浓度随处理费用增加呈明显非线性减少,且当处理费用为 $50 \sim 250 \text{ 元/d}$ 时,增大处理规模对 Chl-a 浓度下降的影响更显著。

此外,随着人工快渗占地面积的逐渐增大,处理成本也逐渐增加。在相同的处理规模下,再生水水质越好,Chl-a 浓度就越低;但随着出水水质的提高,日处理费用逐渐增加,对土地的需求也逐渐增大。

## 3 讨论

受土地面积的限制,拟建的景观湖要求污水处理设施的面积小于 $500 \text{ m}^2$ ,预算的日污水处理成本约为200元,人工快渗系统规模根据研究区域的污水日产生量设计(不大于 $800 \text{ m}^3$ )。以下从控制富营养化、成本及占地面积等3方面进行景观湖的设计分析。

a. 控制富营养化风险分析。假设 Chl-a 质量浓度设定值为  $20\mu\text{g/L}$ , 由图 2 可知, 当再生水水质满足地表 V 类水、景观环境用水两种水质标准时, 对应的最小的处理成本分别为 166 元/d 和 300 元/d, 最小的占地面积分别为  $380\text{m}^2$ 、 $880\text{m}^2$ 。

b. 成本控制分析。由图 2 可知, 再生水水质满足地表 V 类水、景观环境用水两种水质标准时, 对应的最小的 Chl-a 质量浓度分别为  $16.1\mu\text{g/L}$  和  $30.6\mu\text{g/L}$ 。在满足成本控制的前提下, 再生水水质为景观环境用水标准条件下的富营养化风险最大。

c. 占地面积控制分析。根据实际情况, 污水处理设施的占地面积应不大于  $500\text{m}^2$ , 再生水水质满足地表 V 类水、景观环境用水两种水质标准时对应的处理量应分别小于  $240\text{m}^3/\text{d}$  和  $300\text{m}^3/\text{d}$ 。

综合富营养化风险、处理成本及占地面积的限制, 可得到以下设计方案: ①再生水水质达到地表 V 类水标准, 处理规模为  $200\text{m}^3/\text{d}$ , 处理费用为 166 元/d, 景观水体换水周期为 3d, Chl-a 质量浓度为  $19.7\mu\text{g/L}$ ; ②再生水水质达到地表 V 类水标准, 处理规模为  $240\text{m}^3/\text{d}$ , 处理费用为 197 元/d, 景观水体换水周期为 2.5 d, Chl-a 质量浓度为  $16.1\mu\text{g/L}$  等, 决策者可以根据具体情况进行选择。

该研究方法可同样应用于其他再生水处理工艺(如人工湿地、MBR、氧化沟和  $\text{A}^2/\text{O}$  等)与社区景观水体系统, 进而得到不同再生水处理工艺、出水水质和换水周期下, 再生水处理成本与景观水体富营养化风险的关系, 为决策者选择提供科学依据。此外, 由于水体的富营养化还受底质、水体生态系统结构等因素影响, 对景观水体的富营养化控制还可以通过对已经进入景观系统的水体采取进一步的净化措施<sup>[16]</sup>, 如曝气充氧法、物化法(如混凝—沉淀法、过滤法、加药气浮法)、生化处理法(如生物接触氧化法)等; 还可以通过建立完善的生态系统, 增加景观水体的自净能力, 从而降低富营养化风险。本研究尚未考虑这些措施的影响。在实际应用中, 应考虑将再生水水质、换水控制与这些措施相结合。

## 4 结 语

以深圳大学城北京大学校区的再生水与景观水体系统为例, 通过再生水换水控制实验和富营养化模型模拟结果, 建立了再生水水质、换水周期与景观水体富营养化风险的关系; 结合再生水处理成本分析, 建立了该系统运行费用、占地面积与水体富营养化风险的关系曲线, 根据对富营养化风险与处理成本的控制需要及工程实地情况, 找到满足实际条件

的合理的水质、水量组合。研究提出了一种社区再生水回用于景观水体在控制成本和富营养化风险前提下寻求合适处理工艺与水质、水量组合的方法。该方法为社区景观水体设计与维护中权衡再生水处理成本与景观水体富营养化风险的矛盾提供了科学依据。

## 参考文献:

- [1] 李静. 浅议生活污水分散处理和集中管理[J]. 环境保护, 2005(2): 39-40.
- [2] 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.
- [3] 周律, 邢丽贞, 段艳萍. 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.
- [4] 吴文雯, 徐国勋, 孙坚, 等. 上海住宅小区水景观建设探讨[J]. 中国给水排水, 2007, 23(20): 16-19.
- [5] 李畅, 秦华鹏, KHU S T, 等. 中水回用对社区景观水体叶绿素 a 变化的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(10): 1338-1343.
- [6] 孙亚军. 城市污水再生利用是实现水资源可持续利用的有效途径[J]. 给水排水, 2004, 30(1): 108-111.
- [7] 刘杰, 郑西来, 高超, 等. 城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2522-2526.
- [8] 吕宏德. 分散式污水处理系统的特征及其应用[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 113-115.
- [9] WOOL T A, AMBROSE R B, MARTIN J L, et al. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6.0 DRAFT: User's Manual [M]. Atlanta: US Environmental Protection Agency, 2001.
- [10] 周斌. 华东地区城市污水处理厂运行成本分析[J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 29-30.
- [11] 钟佐燊, 杨小毛. 人工快速渗滤污水处理系统装置[P]. 中国专利, 200410073951. 8. 2006-11-22.
- [12] 王艳华, 郑春燕, 简亮, 等. 小城镇人工快渗工艺污水处理厂投资及运行成本探讨[J]. 给水排水, 2010, 12(36): 39-42.
- [13] 邵辉煌, 方先金, 黄鸥. 以再生水为补水水源的景观水体富营养化及其控制技术研究[J]. 给水排水, 2010, 36(增刊): 158-161.
- [14] 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(增刊): 93-98.
- [15] BRICKER S B, FERREIRA J G, SIMAS T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. Ecological Modelling, 2003, 169: 39-60.
- [16] 邹平, 江霜英, 高廷耀. 城市景观水的处理方法[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 24-25.

(收稿日期: 2012-01-03 编辑: 徐娟)