

文章编号: 1674-8085(2015)05-0007-07

# 基于水质修复与保育的城市景观水体净化 循环比计算方法研究

许兰希<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, \*徐竟成<sup>1,2</sup>, 黄翔峰<sup>1,2</sup>, 杜朝丹<sup>3</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 福建海峡环保集团股份有限公司, 福建, 福州 350014)

**摘要:** 对于我国城市景观水体由于水体特性和外源性污染严重引起的水质不良现象, 人们越来越多地采用净化技术开展异位及原位水质修复与保育工作。而在相应的水质净化工程设计与运行中, 净化规模的确定依据与方法还有待完善, 本研究就景观水体水质修复及保育工程开展净化循环比计算模式的研究。通过对基本处于封闭状态的水体水量及水质内外源污染物的平衡分析, 进行了修复与保育两个阶段水质净化循环比数学模式的推演, 建立了相应的计算模式与方法, 并结合案例进行分析计算。结果表明: 水质净化循环比可以作为合理确定工程规模, 控制建设投入与运行费用的重要依据。

**关键词:** 城市景观水体; 水质修复; 水质保育; 净化循环比

中图分类号: X52

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2015.05.002

## COMPUTATIONAL METHODS OF PURIFICATION RECYCLE RATIO OF URBAN LANDSCAPE WATER BASED ON WATER RESTORATION AND CONSERVATION

XU Lan-xi<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, \*XU Jing-cheng<sup>1,2</sup>, HUANG Xiang-feng<sup>1,2</sup>, DU Chao-dan<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment <Ministry of Education>, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Fujian Haixia Environmental Protection Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350014, China)

**Abstract:** As the urban landscape water was polluted by endogenous and exogenous pollution, the ex-situ or in-situ purification technology is being increasingly used in water restoration and conservation engineering. But during the design and operation of the engineering, the method of determining purification scale remains to be perfected. With the balance analysis of water quantity and water quality of relatively closed scenic water, a mathematical model of purification recycle ratio based on water restoration and conservation was established. And the case analysis showed that the purification recycle ratio could be taken as the important basis for getting a reasonable engineering scale and controlling the construction investment and operation cost.

**Key words:** urban landscape water; water restoration; water conservation; purification recycle ratio

收稿日期: 2015-06-06; 修改日期: 2015-08-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC11B04)

作者简介: 许兰希(1991-), 女, 福建漳州人, 硕士生, 主要从事水污染控制研究(E-mail:1193714251@qq.com);

刘伟(1989-), 男, 上海人, 博士生, 主要从事水污染控制研究(E-mail:seewinner@163.com);

\*徐竟成(1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士, 主要从事水污染控制研究(E-mail:xujick@tongji.edu.cn);

黄翔峰(1974-), 男, 福建古田人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水污染控制研究(E-mail:hxf@tongji.edu.cn);

杜朝丹(1976-), 女, 福建古田人, 高级工程师, 主要从事水污染治理研究(E-mail:chddu2000@163.com).

城市景观水体对提高城区环境质量、营造生态氛围等方面都具有重要作用,但其多为静止或流动性弱的封闭缓流水体,具有水域面积小、水环境容量低、水体自净能力不足等特点。随着人口分布的集中和社会发展,水体富营养化问题日益加剧<sup>[1]</sup>,尤其在中国城市化地区,由于大气干湿沉降和地表径流等外源性污染,城市景观水体普遍存在着水质恶化的现象。2012年阎轶婧等对上海城区90个公园绿地共107个景观水体的检测结果表明<sup>[2]</sup>,62.4%水体未达到V类地表水水质标准,国内其它城市的类似情况也较普遍存在。为此,基于水质异位与原位修复的控制景观水体水质技术逐步得到应用,如福州白马支河生态净化系统<sup>[3]</sup>、上海梦清园生物生态净化系统<sup>[4]</sup>、上海辰山植物园景观水系水体净化场及人工湿地异位修复水质控制工程<sup>[5]</sup>等,对保持景观水体的水质起到了关键性的作用。

在基本封闭型景观水体水质修复与保育的工程设计与运行中,净化规模直接关系到水质净化效果与工程投资及运行费用。而水质修复及保育工艺净化水量与景观水体水量的比值,即净化循环比与净化工程规模直接关联,科学合理地确定净化循环比十分重要。针对以往景观水体净化工程设计中,凭借工程经验定性选取净化规模的情况,业内相继开展了利用数学模型计算确定净化规模的研究。卢峰等<sup>[6]</sup>对封闭景观水体水量补充和损耗等各项因素进行分析,计算得出总补充水量,为某植物园的水质净化设计提供参考。关丹桔等<sup>[7]</sup>对居住区可收集利用雨水量的计算结果,提出雨水收集水量满足景观水补水量和绿化用水量的依据。颜二萸等<sup>[8]</sup>在人工景观湖区水质保持技术研究中分析了景观水体水质稳定模型,通过物料平衡计算确定采用强制外循环的方式削减进入水体的污染物质。但在目前确定景观水体水质净化规模的研究中,大多只考虑水量平衡计算,水质模型研究方面较为模糊。因此,在相关研究及工程实践的基础上,通过综合考虑水质水量平衡关系,我们提出保持景观水体水质所需的净化循环比计算模式,确定相应的净化规模,可为科

学合理地建设与运行城市景观水体水质修复与保育工程提供依据。

## 1 计算模型与方法

### 1.1 计算原理

城市景观水体一般为封闭水体,其环境容量较小,水体中的污染物往往呈现明显的累积特性。待修复的景观水体与周围的环境以及水质净化设施之间,存在着物质和能量交换。本研究以物质平衡为基础,由此建立起景观水体水量水质平衡关系图,如图1所示。其中,水体向地下的渗透量及相应物质交换量微小,予以忽略。

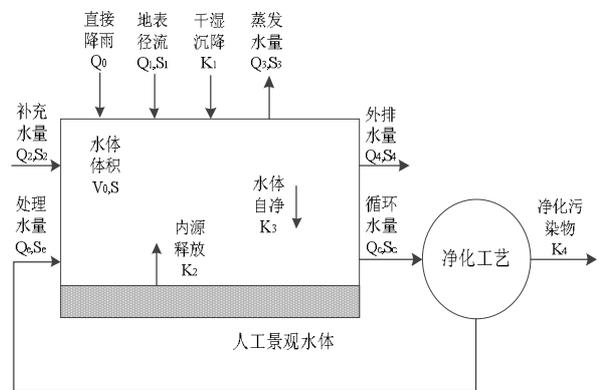


图1 人工景观水体水量水质平衡关系图

Fig.1 Water quantity and quality's equilibrium relationship of artificial landscape water

如图1所示,水体与环境交换的水量主要有降雨径流、补充水量、蒸发及外排水量等。降雨径流补充了水体水量,调蓄水体蒸发损失,在降雨较多的时段,为保持景观水体水位稳定,会将多余水量外排;而少雨及蒸发量大的季节,则需补充部分水量。除水量平衡外,干湿沉降<sup>[9]</sup>、初期雨水、地表径流以及内源释放等过程也会对水体中污染物质的浓度 $S$ 产生影响。其中,干湿沉降、初期雨水以及地表径流等外源污染中污染物质浓度较高<sup>[10-11]</sup>,是景观水体水质恶化的主要污染源。本研究设 $M_i$ 为水体中水质控制指标的积累量,并假定水体中水量保持恒定,为完全混合流态<sup>[12]</sup>。根据图1水量水质平衡关系,可得平衡关系式如下:

$$Q_0 + Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{d(V_0 \cdot S)}{dt} = V \frac{dS}{dt} = Q_1 S_1 + Q_2 S_2 - Q_3 S_3 - Q_4 S_4 - Q_c S_c + Q_e S_e + K_1 + K_2 - K_3 \quad (2)$$

图 1 及平衡关系式中符号含义:

$V_0, S_0$ ——景观水体有效体积及水体水质控制目标值,  $m^3, mg/L$ ;

$V_a, S_a$ ——景观水体初始体积及水体水质初始值,  $m^3, mg/L$ ;

$Q_0$ ——水体表面直接降雨量,  $m^3/月$ ;

$Q_1, S_1$ ——进入水体的降雨径流量及水质浓度,  $m^3/月, mg/L$ ;

$Q_2, S_2$ ——进入水体的补充水量及水质浓度,  $m^3/月, mg/L$ ;

$Q_3, S_3$ ——水体的蒸发水量及水质浓度,  $m^3/月, mg/L$ ;

$Q_4, S_4$ ——水体外排多余水量及水质浓度,  $m^3/月, mg/L$ ;

$Q_c, S_c$ ——水体循环净化水量及水质浓度,  $m^3/d, mg/L$ ;

$Q_e, S_e$ ——净化工艺净化后出水水量及水质浓度,  $m^3/d, mg/L$ ;

$K_1$ ——大气干湿沉降输入量,  $g/月$ ;

$K_2$ ——内源污染物的释放量,  $g/月$ ;

$K_3$ ——水体的自净量,  $g/月$ ;

$K_4$ ——净化工艺污染物去除量,  $g/月$ 。

注: 计算中所涉及的时间单位以月为单位进行换算。

### 1.2 净化循环比计算

景观水体水质净化工程的净化循环比是指单位时间内由净化工艺处理并返回水体的水量与水体总水量的比值, 单位为  $月^{-1}$ , 以  $R$  表示。在某一水质净化工艺对污染物去除效率确定的前提下, 控制一定的净化工艺循环净化的, 可使水体水质控制指标的浓度维持在目标值, 从而达到相应的《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 要求。净化工程的运行一般会经历两个阶段, 即初期水质修复阶段与水质达到要求后的保育阶段,

净化循环比  $R$  又可分为修复循环比  $R_1$  (单位:  $月^{-1}$ ) 与保育循环比  $R_2$  (单位:  $月^{-1}$ ), 即  $R=R_1+R_2$ 。两者关系如图 2 所示:

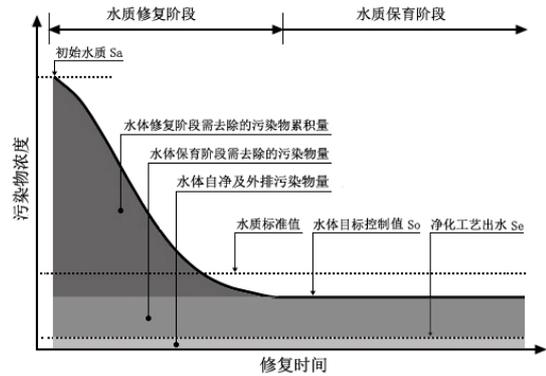


图 2 景观水体水质修复与保育过程及控制目标

Fig.2 Process and control objective of water restoration and conservation

如图 2 所示, 水质修复阶段目标是去除水体中累积的过量污染物, 使水体水质达到目标水质的要求; 水质保育阶段目标是去除大气干湿沉降及降雨径流等污染, 以保证水体中各项水质控制指标的稳定达标。为简化计算过程, 对 1.1 节中的景观水体水量水质平衡关系作如下基本假定:

(1) 水体中流态为完全混合流, 水质及温度各处相同<sup>[12]</sup>, 则有:  $S_4 = S_c = S$ ;

(2) 蒸发水中污染物质浓度极低, 予以忽略, 即:  $S_3 = 0$ ;

(3) 对于目标修复的人工景观水体, 忽略其生物自净能力, 即  $K_3 = 0$ 。

#### 1.2.1 修复循环比

在水体修复阶段, 通过净化工艺净化景观水体, 使其水质达到目标水质  $S_0$  的要求。在修复阶段, 要求以设计修复期  $T$  (单位: 月) 完成水体修复。则净化工程要去除的污染物总量为:

$$G_x = \sum_{i=1}^n V_0 \cdot (S_{ai} - S_{oi}) \quad (3)$$

式中:  $G_x$  为各项污染物去除总量,  $mg$ ;  $S_{ai}$  为各项污染物初始浓度,  $mg/L$ ;  $S_{oi}$  为各项污染物目标浓度,  $mg/L$ 。

假定修复阶段中水体中水量保持恒定, 为完全混合流态<sup>[12]</sup>, 且有  $S_a \geq S_0 \geq S_e$ , 得平衡关系式如下:

$$V_0 \frac{dS}{dt} = Q_x S_e - Q_x S \quad (4)$$

式中:  $S$  为修复阶段各时间点水体污染物浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $Q_x$  为修复阶段循环水量,  $\text{m}^3/\text{月}$ 。

求解上述线性微分方程, 得其通解为:

$$t = \frac{V_0}{Q_1} \cdot \ln \frac{c}{S-S_e} \quad (5)$$

式中:  $C$  为任意常数。

代入边界条件:  $S_{t=0} = S_a$ 、 $S_{t=T} = S_0$ , 求得方程解析解为:

$$T = \frac{V_0}{Q_x} \cdot \ln \frac{S_a - S_e}{S_0 - S_e} \quad (6)$$

显然, 在景观水体水量  $V_0$ 、初始水质  $S_a$  及目标水质  $S_0$  确定的情况下, 修复周期  $T$  是修复阶段循环水量  $Q_x$  及净化工艺出水水质  $S_e$  的函数。因此, 修复循环比  $R_1$  的计算式为:

$$R_1 = \frac{Q_x}{V_0} = \frac{1}{T} \cdot \ln \frac{S_a - S_e}{S_0 - S_e} \quad (7)$$

### 1.2.2 保育循环比

当水体水质达到目标值  $S_0$  时, 水质净化工程进入保育运行阶段。降雨径流、补充水水质、内源释放及干湿沉降等这些互动过程都会对水体中污染物质的浓度产生影响, 需要在保育阶段去除这些污染物。据此, 建立起该阶段的人工景观水体水量水质平衡关系, 据 1.1 节得平衡关系式如下:

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{d(V_0 \times S)}{dt} = V_0 \frac{dS}{dt} = \sum K_i + \sum Q_i S_i \quad (8)$$

式中:  $K_i$  为各项污染物干湿沉降及内源释放量,  $\text{g}/\text{月}$ 。

其中, 降雨量及蒸发量的计算公式如下:

$$Q_0 = H_p A_1 \quad (9)$$

$$Q_1 = \alpha H_p \sum A_{2i} \varphi_i \quad (10)$$

$$Q_3 = H_e A_1 \quad (11)$$

式中:  $H_p$  为水体所在地区时段内的平均降雨量,  $\text{mm}$ ;  $H_e$  为水体所在地区时段内的平均蒸发量,  $\text{mm}$ ;  $A_1$  为水体的面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_{2i}$  为各汇入水体的地表径流的流域面积,  $\text{m}^2$ ;  $j_i$  为相应流域面积的径流系数;  $\alpha$  为季节折减系数<sup>[13]</sup>。

内源营养盐释放是一相当复杂的动态过程,

释放量的大小受到底层中溶解氧的状况、温度、pH、生物活性、风浪扰动等多种因素的影响<sup>[14]</sup>。对于人工景观水体, 在水质保育阶段, 通过水质净化循环, 可以有效降低底泥沉积物中营养盐量, 并逐渐消除内源释放对水体的影响。因此, 在保育阶段, 景观水体中污染物浓度已达到较低的目标水质, 可以主要考虑降雨径流及干湿沉降的影响。在该阶段, 水体水质控制指标浓度需维持在目标值, 即水体水质的浓度变化率接近于零, 因此有:

$$\frac{dM_i}{dt} = 0 \quad (12)$$

同上, 结合上述假定整理得到保育循环比  $R_2$  的计算式为:

$$R_2 = \frac{Q_b}{V_0} = \frac{K_1 + Q_1 S_1 + Q_2 S_2 - Q_4 S_0}{V_0 (S_0 - S_e)} \quad (13)$$

式中:  $Q_b$  为保育阶段循环水量,  $\text{m}^3/\text{月}$ 。

综上, 净化循环比  $R$  的计算式为:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{1}{T} \cdot \ln \frac{S_a - S_e}{S_0 - S_e} + \frac{K_1 + Q_1 S_1 + Q_2 S_2 - Q_4 S_0}{V_0 (S_0 - S_e)} \quad (14)$$

## 2 案例分析

### 2.1 三好坞景观水体概况

同济大学三好坞景观水体属封闭水体(如图3所示), 水域面积  $7880 \text{ m}^2$ , 平均水深约为  $1.5 \text{ m}$ , 水体体积为  $11820 \text{ m}^3$ , 周边径流面积约  $20000 \text{ m}^2$ ; 水体补充水来自洗浴中心废水经深度处理后的再生水<sup>[15-16]</sup>, 以及降雨时进入水体的雨水和周边径流, 水体原水水质见表1。拟采用生物碳净化工艺对景观水进行异位修复, 工艺中设有微絮凝强化段, 可在必要时加强对磷等污染物的去除效果。水体修复以  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮、TN 和 TP 为水质主要控制指标, 其目标值达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水标准。大气干湿沉降测定参考《空气和废气监测分析方法(第四版)》<sup>[17]</sup> 中重量法, 净化工艺的水质净化效果及工艺参数

通过现场试验取得。



图3 三好坞平面图与初始水质取样点布设

Fig.3 The plan of Sanhaowu and the sampling site

表1 三好坞景观水体水质状况

Table 1 The water quality of Sanhaowu

指标	浊度 (NTU)	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	氨氮 (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
数值范围	5.9~25.5	33.4~66.9	0.18~1.78	1.59~5.37	0.10~0.39
平均值	9.4	41.1	0.72	3.41	0.21
《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) V类	—	≤40	≤2.0	≤2.0	≤0.2

## 2.2 净化循环比计算

干湿沉降输入量、雨水径流水质<sup>[18-20]</sup>、净化工艺出水及水质控制目标值如表2所示。

表4 三好坞水体水量平衡计算表

Table 4 Computation sheet of water quantity balance of Sanhaowu

月份	平均降雨量 H <sub>p</sub>	湖面降雨量 Q <sub>0</sub>	周边径流量 Q <sub>1</sub>	降雨总量 Q <sub>0</sub> +Q <sub>1</sub>	平均蒸发量 H <sub>E</sub>	蒸发量 Q <sub>3</sub>	补充水量/外排水量 <sup>*</sup> Q <sub>2</sub> /Q <sub>4</sub> =Q <sub>0</sub> +Q <sub>1</sub> -Q <sub>3</sub>
	/mm	/m <sup>3</sup>	/m <sup>3</sup>	/m <sup>3</sup>	/mm	/m <sup>3</sup>	/m <sup>3</sup>
1	70.3	554	179	734	52.0	410	324
2	58.7	462	150	612	59.9	472	140
3	92.5	729	236	965	84.2	663	301
4	71.4	563	182	745	123.5	973	-228
5	84.8	668	216	884	158.6	1250	-365
6	183.4	1445	468	1912	147.7	1164	748
7	142.2	1120	363	1483	198.6	1565	-82
8	215.5	1698	550	2248	193.6	1526	722
9	83.9	661	214	875	140.7	1109	-234
10	53.6	423	137	559	118	930	-370
11	54.7	431	140	571	81.8	645	-74
12	45.1	355	115	470	61.7	486	-16

\*: Q<sub>2</sub> 补充水量, 数值为负数; Q<sub>4</sub> 外排水量, 数值为正数。

表2 各水质控制指标的浓度值

Table 2 The water quality of each control object

水质指标	干湿沉降输入 K <sub>1</sub> (g/月)	水体目标值 S <sub>0</sub> (mg/L)	雨水径流 S <sub>1</sub> (mg/L)	补充再生水 S <sub>2</sub> (mg/L)	净化工艺出水 S <sub>e</sub> (mg/L)
COD <sub>Cr</sub>	9509	≤40	80	20	26.3
氨氮	1983	≤2.0	1.5	3.0	0.34
TN	328	≤2.0	1.5	5.0	1.63
TP	154	≤0.2	0.5	0.5	0.08

### 2.2.1 修复循环比计算

如前所述, 修复过程的主要目标是去除长期累积的污染量, 达到水质修复目标, 计算基本依据如表3所示:

表3 净化工艺处理效率

Table 3 The purification's efficiency

水质指标	初始浓度 S <sub>a</sub> (mg/L)	水体目标值 S <sub>0</sub> (mg/L)	净化设施出水 S <sub>e</sub> (mg/L)	$\frac{S_a - S_e}{S_0 - S_e}$
COD <sub>Cr</sub>	41.1	≤40	26.3	1.08
氨氮	0.72	≤2.0	0.34	-
TN	3.41	≤2.0	1.63	4.81
TP	0.21	≤0.2	0.08	1.08

由表3可知, 净化工艺对 TN 处理效果为主要限制条件, 计算修复循环比:

$$R_1 = \frac{V_0}{Q_x} = \frac{1}{T} \cdot \ln \frac{S_a - S_e}{S_0 - S_e} = \frac{1.57}{T} \text{ 月}^{-1} \quad (15)$$

### 2.2.2 保育循环比计算

保育阶段的目标主要是通过净化过程, 平衡大气干湿沉降输入量、雨水径流及补充再生水带入的污染量。三好坞景观水体周边约有 20000 m<sup>2</sup> 范围内的地表径流汇入水体, 绿地径流系数取  $j = 0.15$ , 季节折减系数为  $a$  取 0.85<sup>[13]</sup>。降雨量数据参考上海历年月平均降雨量, 蒸发量参考上海历年月平均蒸发量<sup>[21]</sup>。三好坞景观水体水量平衡计算结果见表4。

依据修复阶段的计算模型，代入表 2、表 4 中的各项数据参数，计算可得维持水体水质所需的保育循环比  $R_2$ ，计算结果如表 5 所示。

表 5 各月维持水体水质的保育循环比计算表  
Table 5 Computation sheet of each months' recycle ratio of water conservation

月份	水体体积 $V_0(\text{m}^3)$	径流量 $Q_1(\text{m}^3/\text{月})$	补充水量 $Q_2(\text{m}^3/\text{月})$	外排水量 $Q_4(\text{m}^3/\text{月})$	循环比				
					COD <sub>Cr</sub>	氨氮	TN	TP	最大值
					$R_2(\text{月}^{-1})$				
1	11820	179	0	324	0.067	0.082	—*	0.126	0.126
2	11820	150	0	140	0.098	0.098	0.062	0.141	0.141
3	11820	236	0	301	0.101	0.088	0.018	0.149	0.149
4	11820	182	228	0	0.177	0.150	0.398	0.253	0.398
5	11820	216	365	0	0.211	0.173	0.567	0.313	0.567
6	11820	468	0	748	0.105	0.060	—	0.168	0.168
7	11820	363	82	0	0.248	0.141	0.293	0.265	0.293
8	11820	550	0	722	0.152	0.069	—	0.200	0.200
9	11820	214	234	0	0.193	0.153	0.416	0.266	0.416
10	11820	137	370	0	0.172	0.168	0.546	0.287	0.546
11	11820	140	74	0	0.137	0.123	0.207	0.184	0.207
12	11820	115	16	0	0.117	0.112	0.133	0.154	0.154

\*: “—”表示该月相应污染物的输入量小于由外排水量引起的输出量。

为确保水体各项指标都达到水质控制目标值，取保育循环比  $R_2$  的最大值为保育阶段的设计依据。由表 5 可知，当保育循环比取  $R_2 = 0.567 \text{ 月}^{-1}$  时，能够满足在修复阶段的净化要求。

### 2.3 净化规模计算

综上，三好坞景观水体净化工程净化循环比  $R$  的计算式为：

$$R = R_1 + R_2 = \frac{1.57 \times 30}{T^r} + 0.567 \text{ 月}^{-1} \quad (16)$$

式中， $T^r$  为景观水体的设计修复期，d。

对应的景观水体设计净化规模为：

$$Q = V_0 \cdot R = 11820 \times \left( \frac{1.57 \times 30}{T^r} + 0.567 \text{ 月}^{-1} \right) / 30 \quad (17)$$

式中， $Q$  为景观水体设计净化规模， $\text{m}^3/\text{d}$ 。

对于受修复的景观水体，在保育循环比  $R_2$  确定后，净化循环比  $R$  与设计净化规模的取值与设计修复期  $T$  有关，三好坞景观水体中三者的关系如图 4 所示。

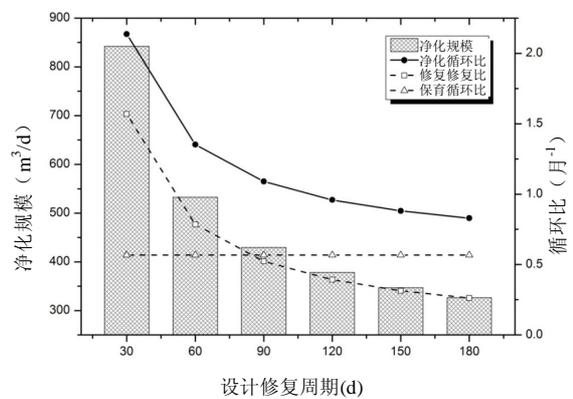


图 4 设计修复与保育阶段净化循环比及净化规模  
Fig.4 Purification recycle ratio of water restoration and conservation and engineering scale

因此，综合考虑修复阶段和保育阶段的计算结果以及工程的经济性，得到三好坞景观水体的最大运行设计净化规模为  $430 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其相应的净化循环比为  $R = 1.09 \text{ 月}^{-1}$ ，设计修复周期约为 90 天。在不同的修复与设计阶段，可以如图 4 所示，采用不同的净化循环比及相应的净化规模，以能耗与减少运行费用。

### 3 结论

采用水质异位与原位修复的途径,是我国当前控制景观水体水质的重要途径。采用净化循环比作为景观水体水质净化工程设计规模的主要依据,可以兼顾水体修复阶段和保育阶段的不同特征。通过水量及水质内外源污染平衡建立的净化循环比数学计算模式,使设计净化规模的确定更趋合理,在水质控制目标实现的前提下减少建设投入与运行费用。

#### 参考文献:

- [1] 张宇燕,贺根和,陆丽君,等. 好氧反硝化菌的筛选鉴定及其脱氮特性研究[J]. 井冈山大学学报:自然科学版,2014,35(4): 1-6.
- [2] 阎轶婧. 城市水体藻华时期水体特征与藻华预警防控技术研究[D]. 上海:同济大学, 2014.
- [3] 熊万永,李玉林. 人工曝气生态净化系统治理黑臭河流的原理及应用[J]. 四川环境,2004,23(2): 34-36.
- [4] 陈漫漫,李小平,李丹. 梦清园人工湿地景观构建及运行效果研究[J]. 三峡环境与生态,2008,1(2): 10-13,16.
- [5] 张勇伟. 上海辰山植物园景观水体生态净化技术集成应用[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2014,32(3): 62-68.
- [6] 卢峰,邹伟国,卢斌. 封闭景观水体补充水量研究[J]. 净水技术,2010,29(3): 11-13,33.
- [7] 关丹桔,吕伟娅. 银城西堤国际小区雨水收集利用与景观水循环处理的设计研究[J]. 江苏建筑,2009(2): 61-63.
- [8] 颜二萑,王乾坤,姜应和,等. 人工景观湖区雨水资源化与生态水体构建及水质保持技术研究[J]. 浙江建筑,2008,25(2): 1-4.
- [9] Michael R, Goforth, Christos S. et al. Particle size distribution and atmospheric metals measurements in a rural area in the South Eastern USA[J]. Science of the Total Environment,2006,356: 217-227.
- [10] 车伍,刘燕,欧岚,等. 城市雨水径流面污染负荷的计算模型[J]. 中国给水排水,2004,20(7): 56-58.
- [11] 刘鹏,傅文华. 初期雨水要不要弃流的思考[J]. 给水排水,2004,30(12): 78-79.
- [12] 陈仁学. 化学反应工程与反应器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [13] 李俊奇,李宝宏,张洁,等. 住区雨水利用与景观水体水质保障工程设计[J]. 中国给水排水,2006,22(24): 57-60.
- [14] 李向梅,解岳,黄廷林,等. 景观水体底泥释放分析[J]. 水处理技术,2010,36(1): 60-63.
- [15] 郭冀峰,王荣昌,夏四清. 气浮/BAF/MBR 组合处理洗浴废水回用工艺的自控设计[J]. 电气应用,2007,26(3): 75-78.
- [16] 郭冀峰,王荣昌,夏四清,等. 气浮-曝气生物滤池-膜生物反应器处理洗浴废水回用工程[J]. 水处理技术,2007,33(11): 85-88.
- [17] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. 4版.北京:中国环境科学出版社, 2003.
- [18] 申欢,胡洪营,潘永宝,等. 用于净化景观水体水质的人工湿地设计[J]. 中国给水排水,2007,23(2): 39-42.
- [19] 米文秀,谢冰. 城市绿地对雨水径流中污染物削减效果研究[J]. 上海化工,2007,32(10): 2-4.
- [20] 林莉峰,李田,李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. 环境科学,2007,28(7): 1430-1434.
- [21] 杨凯,唐敏,周丽英. 上海近 30 年来蒸发变化及其城郊差异分析[J]. 地理科学,2004,24(5): 557-561.