

# 基于水质污染风险识别的人工湖需水研究\*

尤爱菊<sup>1</sup> 吴华安<sup>2</sup> 金倩楠<sup>1</sup> 韩曾萃<sup>1</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 玉环县水利局, 浙江 玉环 317600)

**摘要** 人工湖需水量是指维持湖区水量平衡、满足人工湖水水质目标的供水量, 人工湖需水量确定是人工湖水工程设计的主要内容之一。以上虞滨海新城建设的人工湖为例, 分析了人工湖建成后的可能污染源, 采用 TP 质量守恒模型, 预测了不同生活污水截污率、生态措施作用前后的人工湖需水量及水质要求。结果表明, 当生活污水截污率为 100% 时, 若供水 TP $\leq 0.10$  mg/L, 则人工湖需水量为 240 万 t/a; 当生活污水截污率为 95% 时, 若供水 TP=0.05 mg/L, 不考虑生态措施作用, 则人工湖需水量为 1 600 万 t/a; 当生活污水截污率为 95% 时, 若供水 TP=0.05 mg/L, 在生态措施作用下人工湖需水量为 730 万 t/a。

**关键词** 人工湖 生态需水 环境需水 TP 质量守恒模型

**Study on the water requirement of man-made lake base on water pollution risk analysis** YOU Aiju<sup>1</sup>, WU Hua'an<sup>2</sup>, JIN Qianan<sup>1</sup>, HAN Zengcui<sup>1</sup>. (1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou Zhejiang 310020; 2. Water Affairs Bureau of Yuhuan City, Yuhuan Zhejiang 317600)

**Abstract:** Water requirement of man-made lake depend on the ecological water requirement for maintaining the lake water balance and the environmental water requirement to achieve water quality objective. To determine the water requirement is one of the main design contents for man-made lake. In this paper, as for the man-made lake in Shangyu, possible pollution sources after the lake construction were analyzed. Water quality of the man-made lake was predicted using TP mass balance model with considering different sewage interception rate and the effect of ecological measures, meanwhile, the quantity and relevant quality of water requirements under different conditions were obtained. Water quality prediction results showed when domestic sewage interception rate was 100% and TP concentration of replenish water lower than 0.10 mg/L, the water requirement was 2.4 million t/a; when domestic sewage interception rate was 95% and TP concentration of replenish water was 0.05 mg/L, the water requirement was 16 million t/a; when domestic sewage interception rate was 95% and TP concentration of replenish water was 0.05 mg/L, the water requirement was 7.3 million t/a if considering the effect of ecological measures.

**Keywords:** man-made lake; ecological water requirement; environmental water requirement; TP mass balance model

近年来,在高档住宅区和大型公共绿地中多配置建设人工湖,但人工湖自净能力脆弱,如何在设计阶段借鉴已有城市湖泊水污染治理的经验和教训,从截污控污、湖泊供水、生态系统构建及水质监控等各个环节做好水体污染的防范和水质保护工作,是人工湖设计成败的关键。湖泊供水即“引清调水”,是目前人们利用水利工程改善湖泊水质的有效手段,在国内外有较多成功的实例<sup>[1-4]</sup>。在已有案例中,调水量往往取决于水源的可供应量,较少从湖泊自身需求出发确定调水量,但在人工湖的水质保障系统设计中,人工湖需水研究必不可少,尤其在河网水质污染严重的浙江沿海地区,合理确

定人工湖的需水量,对实现人工湖水水质目标起到决定性作用。

以上虞滨海新城建设的人工湖为需水研究对象,该人工湖的湖面面积为 0.99 万 m<sup>2</sup>,水质目标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准(TP 限值为 0.10 mg/L)。由于周边河网水质为Ⅴ类或劣Ⅴ类,因此,人工湖水水质保障系统设计中主要包括 3 部分:(1)采用闸、堰等工程措施,实现湖区与周边河网的控制性连接,即湖区水可以进入河网,河网的劣质水不能进入湖区;(2)采用物理措施,取河道水经混凝沉淀处理后为人工湖供水;(3)采用生态措施,在人工湖南侧布置湿地和生态河道等植物工

第一作者:尤爱菊,女,1974 年生,博士,高级工程师,主要从事水资源、水环境研究。

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2009ZX07424-001);浙江省自然科学基金资助项目(No. Y5080219);浙江省创新团队建设项目(No. 2009F20024)。

程,进一步净化湖区水质。

笔者着重研究人工湖的需水内涵及影响因素,分析人工湖建成后的可能污染来源及大小,采用TP质量守恒模型,研究不同污染源条件、有无生态措施作用等情况下,满足人工湖水水质目标的需水量及相应水质要求,为人工湖设计提供参考。

## 1 人工湖需水内涵及影响因子

本研究所指人工湖需水量( $W, \text{t/a}$ )是指维持湖区水量平衡、满足人工湖水水质目标的供水量。根据定义,人工湖需水量包括蒸发补充水量( $W_{ev}, \text{t/a}$ ),渗漏补充水量( $W_i, \text{t/a}$ )及满足人工湖水水质目标的环境需水量( $W_{en}, \text{t/a}$ )。其中  $W_{ev} + W_i$  又可称为生态需水量,和环境需水量是兼容的。因此,人工湖需水量计算见式(1)。

$$W = \max(W_{ev} + W_i, W_{en}) \quad (1)$$

根据人工湖所在地降雨、蒸发和地质资料,估算湖区的生态需水量为240万t/a,在此不作详述。人工湖环境需水量是本研究的重点,取决于湖区的污染负荷、人工湖自净能力和供水水源的水质条件。由于人工湖尚未建成,人工湖的自净能力尚难定量研究,本研究暂不考虑。

## 2 湖区可能污染源及大小

对湖区污染源的准确估算,是掌握人工湖建成后水质风险并采取相应对策的关键。由于TP是湖泊富营养化最重要的指标,因此着重对TP的入湖负荷进行测算。人工湖建成后,其集水面积范围内没有工业污染源,因此湖区污染负荷来源主要包括:(1)集水面积内渗漏的生活污水;(2)湖面直接降雨;(3)湖周地表径流;(4)湖面大气降尘;(5)底泥释放。此外,人工湖外来供水也会携带一定的污染物,由此带来的人湖TP负荷会随着供水规模及供水水质发生改变,这部分入湖TP负荷将在TP质量守恒及人工湖需水计算中详细讨论。

### 2.1 生活污水污染负荷

生活污水的入湖污染负荷与截污率密切相关。研究区域规划截污率较高,但仍不可能实现100%截污。为此,依据上虞滨海新城规划的人口布局,参照《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》的排放系数,计算了截污率为85%、90%、95%、

100%的情况下,生活污水的入湖TP负荷,结果列于表1。

表1 不同截污率下生活污水的入湖TP负荷  
Table 1 TP pollution load of domestic sewage under different interception rate

| 截污率/%                       | 85   | 90   | 95   | 100 |
|-----------------------------|------|------|------|-----|
| 入湖TP负荷/(t·a <sup>-1</sup> ) | 2.51 | 1.67 | 0.84 | 0   |

### 2.2 湖面直接降雨污染负荷

参考杭州观测的雨水污染物浓度变化规律<sup>[5]12304</sup>,测算上虞滨海新城人工湖湖面降雨的污染负荷。考虑到TP浓度在降雨初期最大,随降雨的进行,TP浓度逐渐减少直至稳定的特点,按降雨量<10、10~20、20~30、30~40、40~50、≥50 mm将降雨划分为6个等级,不同降雨等级的TP质量浓度见表2。以2001、2007年为典型年,对各年不同等级降雨出现的天数进行了统计,分别估算2001、2007年的降雨TP负荷,再对2年负荷进行平均,视为项目所在地直接降雨TP负荷。根据人工湖的湖面面积,计算得到湖面直接降雨的入湖TP负荷为0.11 t/a。

### 2.3 湖周地表径流污染负荷

湖周地表径流污染负荷和湖区集水面积密切相关。根据对已有道路雨水管线设计情况的分析,确定合理的集水面积为4.0 km<sup>2</sup>(含湖面面积),根据徐海波等<sup>[5]12305</sup>对雨水中污染物浓度分布规律的研究,估算得到湖周地表径流的入湖TP负荷为0.52 t/a。

### 2.4 湖面大气降尘污染负荷

因降雨冲刷进入人工湖的污染负荷只是大气沉降的一部分,此外还有非降雨期因尘埃降落携带的污染物。根据杨龙元等<sup>[6]</sup>对太湖周边地区8个站点大气干湿沉降量和降雨水化学组成的观测结果,测算得到本项目区的湖面大气降尘入湖TP负荷为0.30 t/a。

### 2.5 底泥释放污染负荷

根据韩伟明<sup>[7]</sup>对杭州西湖底泥释磷的观测,pH、温度、溶解氧等环境因素均会对底泥释磷量和释磷速率产生影响。底泥释磷与水温有着很好的相关关系,冬夏季释磷量可相差3~4倍。结合人工湖项目所在地环境情况,估算得到人工湖底泥释放的入湖TP负荷为0.30 t/a。

### 2.6 污染负荷汇总

对生活污水不同截污率下的入湖TP负荷进行

表2 不同降雨等级的TP质量浓度  
Table 2 TP concentration under different rainfall grade

| 降雨等级                     | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 降雨量/mm                   | <10   | 10~20 | 20~30 | 30~40 | 40~50 | ≥50   |
| TP/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 0.360 | 0.192 | 0.091 | 0.055 | 0.049 | 0.045 |

汇总,结果见表3,各污染源的人湖TP负荷所占比例见图1。由表3可见,当有部分生活污水进入人工湖时,入湖TP总负荷显著增加,当截污率从100%降至85%时,入湖TP总负荷从1.23 t/a增加到3.74 t/a,增加了2倍多。

表3 不同截污率下的入湖TP总负荷  
Table 3 Total TP pollution load of the man-made lake under different sewage interception rate

| 截污率/%                      | 100  | 95   | 90   | 85   |
|----------------------------|------|------|------|------|
| TP总负荷/(t·a <sup>-1</sup> ) | 1.23 | 2.07 | 2.90 | 3.74 |

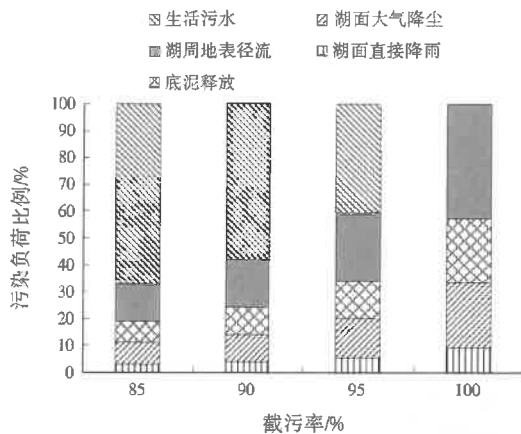


图1 不同截污率条件下各种污染负荷所占比例

Fig. 1 Pollution load proportion of different sources under different sewage interception rate

以生活污水截污率为95%计算,则各月入湖TP量预测结果见图2。由图2可见,各月入湖TP量变化较大,主要集中在降雨较多、温度较高的6—9月。由于湖面直接降雨、大气降尘及底泥释放都不是人为可控的,因此控制入湖TP量的主要方法为尽可能减少陆域污染负荷的输入,尤其是生活污水。

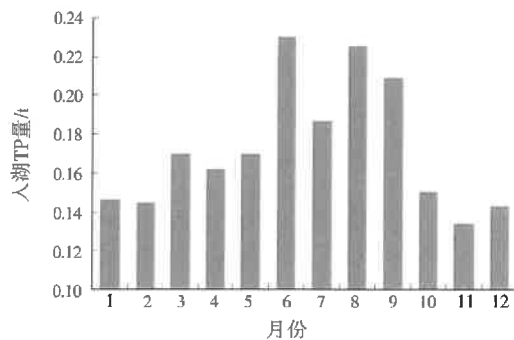


图2 人工湖各月入湖TP量

Fig. 2 Monthly distribution of inlet TP quantity

### 3 TP质量守恒模型

根据质量守恒原理,假设TP在人工湖内掺混均匀,因此可以用箱子模型研究人工湖TP浓度,得

到充分混合后的TP质量守恒方程(见式(2))。

$$Vdc = Pdt - Q_e c dt - Vck dt \quad (2)$$

式中: $V$ 为人工湖正常水位下的体积, $m^3$ ;  $c$ 为人工湖内TP质量浓度, $mg/L$ ;  $P$ 为计算时段内人工湖的入湖TP负荷总量(包括生活污水、湖周地表径流、湖面直接降雨、大气降尘、底泥释放和供水水源携带的TP负荷), $g/d$ ;  $t$ 为统计时间, $d$ ;  $Q_e$ 为流出人工湖的水流流量, $m^3/d$ ;  $k$ 为TP沉降系数, $d^{-1}$ ;  $Vck dt$ 为沉入湖底的TP质量。

令  $t_0 = \frac{V}{Q_e}$ , 将式(2)简化为:

$$V \frac{dc}{dt} + cV(k + \frac{1}{t_0}) = P \quad (3)$$

式中: $t_0$ 为停留时间, $d$ 。

当  $\frac{dc}{dt} = 0$  时,由式(3)可求得统计时间内人工湖平均TP质量浓度,即:

$$\bar{c} = \frac{P}{Q_e + kV} \quad (4)$$

式中: $\bar{c}$ 为统计时间内人工湖平均TP质量浓度, $mg/L$ 。

人工湖开湖初期,因生活污水、湖周地表径流、湖面大气沉降、底泥释放等因素造成污染物积累,人工湖TP质量浓度逐步增加,经过一定时间的供水,人工湖TP质量浓度维持在一个相对稳定的水平。采用式(4)可以计算得到不同污染负荷条件下,使人工湖长期稳定达到水质目标的需水量。

沉降系数  $k$  的经验计算公式见式(5)<sup>[8]</sup>。

$$k = 10/H \quad (5)$$

式中: $H$ 为人工湖平均水深, $m$ 。

### 4 人工湖需水计算

除受人湖污染负荷影响外,人工湖环境需水量还取决于供水的水质情况。为此,计算了3种供水水质情况下,满足人工湖  $TP \leq 0.10 mg/L$  的环境需水量。

#### 4.1 不同截污率下的环境需水量

##### 4.1.1 截污率为100%时的环境需水量

当人工湖周边生活污水截污率为100%,供水TP质量浓度分别为0.05、0.10、0.20  $mg/L$ 时,随着供水量的变化,人工湖TP质量浓度预测结果见图3。由图3可见,当生活污水截污率为100%时,人工湖TP质量浓度主要取决于供水TP质量浓度,随着供水量的增加,人工湖TP质量浓度逐渐向供水TP质量浓度接近。当供水TP质量浓度  $\leq 0.10 mg/L$  时,人工湖环境需水量小于生态需水量,

即人工湖的需水量为生态需水量,240 万 t/a。

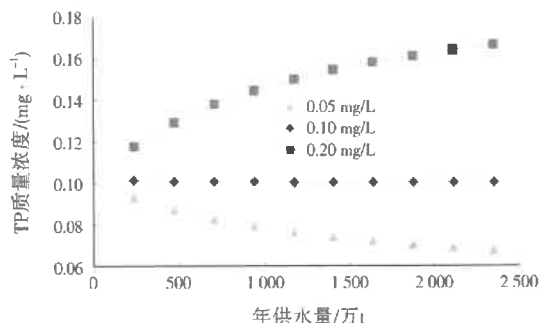


图3 截污率100%条件下人工湖TP质量浓度预测结果  
Fig.3 Prediction of the man-made lake TP concentration under 100% sewage interception rate

#### 4.1.2 截污率为95%时的环境需水量

当人工湖周边生活污水截污率为95%,供水TP质量浓度分别为0.05、0.10、0.20 mg/L时,随着供水量的变化,人工湖TP质量浓度预测结果见图4。由图4可见,当生活污水截污率为95%时,为达到TP≤0.10 mg/L的水质目标,对供水量和供水水质的要求均大幅提高。当供水TP质量浓度为0.10 mg/L时,人工湖需水量在6 000 万 t/a以上,为此需要付出高额的经济代价。当供水TP质量浓度为0.05 mg/L时,人工湖需水量约1 600 万 t/a,即日平均供水量4.4 万 t,方可满足人工湖水水质目标。

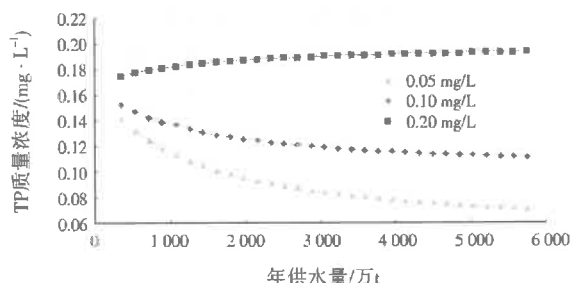


图4 截污率95%条件下人工湖TP质量浓度预测结果  
Fig.4 Prediction of the man-made lake TP concentration under 95% sewage interception rate

当生活污水截污率进一步降低时,满足人工湖水水质目标的供水压力将进一步提高。因此,控制湖区陆域污染负荷是保障人工湖水水质、降低污染风险、节约人工湖运行成本的基础与关键。

#### 4.2 考虑生态措施作用的人工湖环境需水

在人工湖生态措施设计中,布置生态河道3.0 km,河道容积近48 万 m³,主要利用水生植物进行原位净化处理,设计处理水量6 万 t/d。参照浙江大学环境与资源学院的相关研究成果<sup>[9,10]</sup>,水生植物对TP的年均去除率为20%~45%。设计生态河道的水力停留时间为8 d,以生态河道的TP去除效

率为25%计,预测了生活污水截污率为95%,供水TP质量浓度分别为0.05、0.10 mg/L的情况下,人工湖TP质量浓度随供水量的变化,结果见图5。

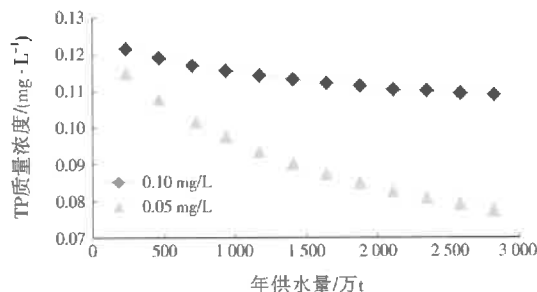


图5 截污率95%、考虑生态措施作用下人工湖TP质量浓度预测结果

Fig.5 Prediction of the man-made lake TP concentration under 95% of sewage interception and considering the effect of ecological measures

由图5可见,考虑生态措施作用后,人工湖的环境需水量大幅下降,在供水TP质量浓度为0.05 mg/L时,人工湖年供水量为730 万 t时即可满足人工湖水水质目标。

## 5 结 语

人工湖需水量确定是人工湖水体工程设计的主要内容之一,对保障湖区水质起到决定性作用。通过分析人工湖可能的污染源,采用TP质量守恒模型,预测了不同生活污水截污率、生态措施作用前后的人工湖需水量及水质要求。当生活污水截污率为100%时,供水TP质量浓度≤0.10 mg/L,则人工湖需水量为240 万 t/a;当生活污水截污率为95%,供水TP质量浓度为0.05 mg/L,如不考虑生态措施作用,则人工湖需水量为1 600 万 t/a,如考虑生态措施作用,则人工湖需水量为730 万 t/a。

为满足人工湖水水质目标,同时使人工湖供水量及相应投入、运行费用在可接受的范围内,必须要严格控制湖区周围的陆域污染负荷。

## 参考文献:

- [1] BILLY L E. Proceedings of the second symposium on coastal and ocean management[M]. New York, American Society of Civil Engineerings, 1980.
- [2] 何用,李义天,李荣,等.改善湖泊水环境的调水与生态修复结合途径探索[J].安全与环境学报,2005,5(1):56-59.
- [3] 刘春生,吴浩云.引江济太调水试验的理论和实践探索[J].水利水电技术,2003,34(1):4-8.
- [4] 俞建军.引水对西湖水质改善作用的回顾[J].水资源保护,1998,11(2):50-54.
- [5] 徐海波,尤爱菊,韩曾萃,等.雨水中污染物浓度分布规律研究[J].安徽农业科学,2011,39(20).

(下转第25页)