



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.010

米玉华, 刘佳, 刘克岩, 等. 串联型水体生态需水补水方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 54-58. MI Yuhua, LIU Jia, LIU Keyan, et al. A scheme to meet ecological water demand of serial water bodies[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 54-58. (in Chinese)

## 串联型水体生态需水补水方案研究

米玉华<sup>1</sup>, 刘佳<sup>2</sup>, 刘克岩<sup>1</sup>, 刘慧霞<sup>1</sup>, 王海宁<sup>1</sup>

(1. 河北省水文水资源勘测局, 石家庄 050031; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:** 在水资源长期短缺的北方地区, 拦河蓄水形成的串联型河流坝式景观水体几乎在每个城市都可以看到。为计算维持这种以水景观为主的人工河流生态系统基本健康的最小需水量, 以滹沱河水环境修复段为例, 构造描述“串联型坝式景观水体”水质、水量变化的综合数学模型, 提出了水质、水量相结合的河流坝式景观水体生态需水补水方案。结果显示: 75% 频率降水情况下, 滹沱河水环境修复段现状水平年最小需水量为3 450万 m<sup>3</sup>, 并给出了明确的补水时机和补水量, 为北方串联型河流坝式景观水体的生态保护提供了支撑。

**关键词:** 河流; 生态需水; 串联型水体; 水质水量结合; 综合数学模型

**中图分类号:** X52   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0054-05

### A scheme to meet ecological water demand of serial water bodies

MI Yuhua<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>2</sup>, LIU Keyan<sup>1</sup>, LIU Hui Xia<sup>1</sup>, WANG Hai ning<sup>1</sup>

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract** In northern China, where water resources are in long term shortage, it is common in nearly every city to see serial river dam type landscape water bodies built to obstruct rivers and retain water. To calculate the minimum water required to sustain the basic health of such an artificial river ecological system consisting mostly of water landscape, this paper studied the case of a segment of Hutuo River needing remediation of water environment, built an integrated mathematical model that describes the water quality and quantity changes of the "serial dam type landscape water body", and proposed a scheme to meet the ecological water demand of river dam type landscape water bodies with consideration to both water quality and quantity. The results showed that under the circumstance of 75% frequency of rainfall, the minimum water required by this segment of Hutuo River needing remediation of water environment is 34 500 thousand m<sup>3</sup>/a. This paper also provided the explicit dates and amount of water supply, and provided support for the ecological protection of northern serial river dam type landscape water bodies.

**Key words:** river; ecological water demand; serial water body; combining water quantity and quality; integrated mathematical model

生态需水是在特定时间和空间满足生态系统某种生态功能和保护目标所需保持的一定水质目标下的水量<sup>[1-2]</sup>。河流生态需水量的概念是在生态需水量的基础上根据研究对象的侧重不同而有所不同。

广义上讲, 河流生态需水量不仅包括满足水生生物需要的最小水量还包含维持环境现状所需的一定水质的水量。狭义上, 河流生态需水量指河流最小或适宜的生态需水量。国外河流生态需水量计算方法

收稿日期: 2016-04-20   修回日期: 2016-09-11   网络出版时间:

网络出版地址:

作者简介: 米玉华(1964), 女, 河北石家庄人, 教授级高级工程师, 主要从事水资源保护方面研究。E-mail: myhsjz@126.com

大致可以分为4类历史流量法、水力学法、栖息地法和整体分析法;国内河流生态需水计算方法主要有历史流量法和防治河流水质污染的计算方法<sup>[3]</sup>。虽然河流生态环境需水量的量化研究已经形成了比较成熟的体系,但研究多聚焦在天然河、湖,对拦河蓄水形成的串联型水体生态需水量的研究却少有报道。串联型水体的水循环及物质循环既不同于湖库又不同于天然河流,串联型水体的水质、水量的独立性与关联性并存,平时由于水坝的阻隔,串联的各水体相对独立;补水时上游水体的水质又会影响到下游水体的水质。笔者以滹沱河水环境修复段为例,考虑水的自然循环与水在人类活动影响下的循环,构造描述串联型水体水质、水量变化的综合数学模型,给出该串联水体的生态需水量,以期对在水资源长期短缺地区广泛存在的串联型河流坝式景观水体的生态保护、水资源管理和有效利用提供参考。

## 1 滹沱河水环境修复段概况

滹沱河流经石家庄市北部,是石家庄市唯一的地表水来源。经过几十年的演变,滹沱河的生态环境问题越来越突出,河道干涸、植被退化、生态环境恶化。改善滹沱河区域生态环境状况成为石家庄市实施可持续发展战略的关键<sup>[4]</sup>。因此,2007年石家庄市开始了滹沱河综合整治工程。目前,从南水北调中线到太行大街,全长16 km的一期工程已经基本建成,通过橡胶坝和挡水堰,沿河道走势自上游至下游依次形成了1号、2号、3号、4号和5号五个水面工程近800万 $m^2$ 的水面,水面宽度为600~800 m,水深1.5~2.5 m<sup>[5]</sup>(见图1)。

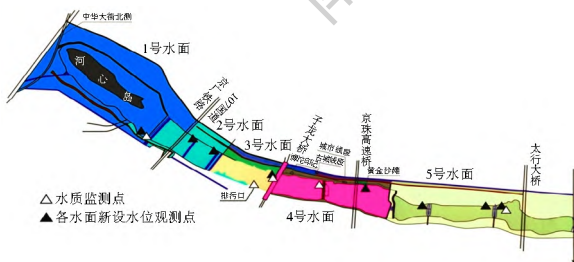


图1 滹沱河水环境修复段1号-5号水面分段示意图  
Fig. 1 Schematic map of Surface 1 to Surface 5 of the segment of Hutuo River needing remediation of water environment

## 2 耗水量分析

滹沱河水环境修复段的水量损耗主要包括:绿化浇洒取水、水面蒸发量和水体渗漏量三部分<sup>[7]</sup>。

滹沱河水环境修复段绿化用水时间为4月至10月,1~4号水面沿岸绿化总面积约为255万 $m^2$ ,4号水面沿岸林地面积90万 $m^2$ ,5号水面沿岸没有绿化。绿化用水定额依据《建筑给排水设计规范》(GB 50015-2003),绿化浇洒为1~3 L/ $m^2 \cdot d$ <sup>[8]</sup>,本次分析取2 L/ $m^2 \cdot d$ ,由此求得各水面日、月、年绿化用水量。

采用2010年-2013年四年实际蒸发量资料的平均值,并进行修正。通过对滹沱河水环境修复段河道内大型水面悬浮式蒸发皿与岸上常规监测站观测试验对比分析,得出宽敞河道内水面蒸发高于岸上常规监测站31.0%。参考气候变化,3月-11月水面蒸发乘以1.3修正系数,12月至次年2月为封冻期,不进行修正<sup>[9]</sup>,计算出滹沱河水环境修复段各水面逐月蒸发量。

根据滹沱河水环境修复段近一年的资料及每个河段的性质,采用《渠道防渗技术规范》SL18-91推荐的静水法<sup>[10]</sup>进行渗漏量分析计算。选择无补水、放水过程的水深资料对渗漏量进行计算分析。由此求得各水面日、月、年绿化用水量。

通过对实际观测资料进行分析,1~5号水面现状水平年的耗水量分别为:446万 $m^3$ 、270万 $m^3$ 、456万 $m^3$ 、834万 $m^3$ 和751万 $m^3$ ,合计为2757万 $m^3$ 。

## 3 补水方案确定

### 3.1 最佳补水时段确定

根据滹沱河生态修复段的蒸发、渗漏、绿化耗水量情况、补水情况以及“五一”、“十一”及盛夏度假需要,确定最佳的补水时间为3月底、5月底、8月底、9月底及11月底(封冻前)。

### 3.2 生态需水量的确定

基于物质守恒定律和化学反应动力学原理,构建描述北方坝式景观水体水质、水量变化的综合数学模型。依据实际观测资料率定模型参数,建立水体水质与补水量的定量关系。利用模型对串联水体联合推演,提出维持以景观为主人工河流水生态系统基本健康最小需水量的计算方法。

#### 3.2.1 水质状况分析

滹沱河水环境修复段,属于受人类活动影响频繁的、宽浅型坝前蓄水景观水体。为了掌握滹沱河水环境修复段的水质状况,在1号、3号-5号水面各布设1个水质采样点;2号水面由于工程原因,仅一土坎前间断蓄水,蓄水量很少,故与1号水体作为

一体处理;3号水面有排污口,所排污水影响3号-5号水面水质,在排污口设置1个监测点,共布设水质采样点5处。

为了掌握其水质的年内变化规律从2014年1月开始逐月监测。监测项目选择宽浅静止水体水质易变项目,结合《景观娱乐用水水质标准》(GB 12941-91)<sup>[11]</sup>的评价指标,选取水温、pH、电导率、溶解氧、矿化度、高锰酸盐指数、非离子氨、氨氮、总磷、总氮、叶绿素等11项水质指标<sup>[12]</sup>。按照《景观娱乐用水水质标准》(GB 12941-91)中主要适用于一般景观用水水体的C类标准进行评价:

1号水面水质良好,各测次的监测指标均不超标。3号-5号水面水质较差,超标项目主要为总磷,超标率分别为58%、75%和83%,最高超标倍数为6.4倍;其次为氨氮,超标率分别为17%、17%和25%,最高超标倍数为0.9倍。

3号水面污水排入口水质很差,各测次水质均超标。且超标倍数很大。主要超标项目是总磷,超标率为100%,最高超标倍数为21倍;氨氮超标率为100%,最高超标倍数为6.7倍;其次为高锰酸盐指数,超标率为36%,最高超标倍数为1.2倍;溶解氧超标率为50%,甚至有两次溶解氧含量为零。

3号、4号、5号水面是串联补水,可见,3号、4号、5号水面的水质超标与3号水面排污口的污水排入关系密切。

### 3.2.2 水质水量综合数学模型建造

根据物质守恒定律和化学反应动力学原理<sup>[13-14]</sup>,构造描述“坝式景观水体”水质、水量变化的综合数学模型,为其水质和补水量建立定量关系,公式见(1)-(4),并据此推求各水面逐时段维持水质达标所需的最小补水量 $W_{ij}(t)$ 。其中,上游来水、水面承接的降水及排污口汇入的水量及物质量为源项,蒸发、渗漏及向下游水面放水减少的水量及物质量为汇项。

$$Q_{ij}(t)C_{ij}(t) + Q_{jp}(t)C_{jp}(t) - [Q_{jL}(t) + Q_{jk}(t)]C_j(t) = C_j(t)dW_j(t)/dt + K_j(t)W_j(t)dC_j(t)/dt \quad (1)$$

$$Q_{ij}(t) + Q_{jp}(t) + Q_{jr}(t) - Q_{je}(t) - W_{jL}(t) - Q_{jk}(t) = dW_j(t)/dt \quad (2)$$

式中: $W_j(t)$ 为j号水面t时刻的蓄水量( $m^3$ ); $C_j(t)$ 、 $C_{jp}(t)$ 分别为j号水面t时刻某水质指标的浓度、入河排污口某水质指标的浓度(mg/L); $Q_{ij}(t)$ 为t时刻从i号水面补给j号水面的流量( $m^3/s$ ); $Q_{jr}(t)$ 、 $Q_{je}(t)$ 分别为t时刻降落到j号水面的降水量和蒸发水量( $m^3/s$ ); $Q_{jL}(t)$ 为j号水面t时刻的渗

漏、绿化水量之和( $m^3/s$ ); $Q_{jk}(t)$ 为j号水面t时刻流入k号水面的水量( $m^3/s$ ); $K_j(t)$ 为j号水面t时刻的综合衰减系数(1/d); $C_{ij}(t)$ 为i号水面t时刻流入j号水面的某水质指标浓度(mg/L);j、i、k分别为调算水面编号及其上、下游水面编号。

根据现有的数据精度及计算时段,把式(1)和式(2)离散化为:

$$[1 + \Delta t K_j(t)]W_j(t)C_j(t) + W_{ij}(t)C_{ij}(t) + W_{jp}(t)C_{jp}(t) - [W_{jL}(t) + W_{jk}(t)]C_j(t) = C_j(t)W_j(t+1) + \Delta t K_j(t)W_j(t)C_j(t+1) \quad (3)$$

$$W_j(t) + W_{ij}(t) + W_{jp}(t) + W_{jr}(t) - W_{je}(t) - W_{jL}(t) - W_{jk}(t) = W_j(t+1) \quad (4)$$

式中: $W_{ij}(t)$ 为 $\Delta t$ 时段内从i号水面补给j号水面的水量( $m^3$ ); $W_{jp}(t)$ 为 $\Delta t$ 时段内入河排污口流入j号水面的水量( $m^3$ ); $W_{jr}(t)$ 、 $W_{je}(t)$ 分别为 $\Delta t$ 时段内j号水面的降水量和蒸发水量( $m^3$ ); $W_{jL}(t)$ 为 $\Delta t$ 时段内j号水面的渗漏、绿化水量之和( $m^3$ ); $W_{jk}(t)$ 为 $\Delta t$ 时段内从j号水面流入k号水面的水量( $m^3$ ); $W_j(t+1)$ 为t+1时刻j号水面蓄水量( $m^3$ ); $C_j(t+1)$ 为t+1时刻j号水面某水质指标的浓度(mg/L); $\Delta t$ 为计算时段长(d)。

在来水和下泄水量、水质已知的情况下,利用式(3)和式(4)联立求解,可推求j号水面t+1时刻的蓄水量及水质指标浓度值。给j赋予不同的值,就可根据t时刻的水质、水量资料,预测出串联水体各水面t+1时刻的蓄水量及水质状况,以便管理部门根据预测的水质水量状况及早采取应对措施。

当为了某一目的,如水体的景观娱乐需求,要求各水面t+1时刻的蓄水量及水质必需达到一个给定值时,也可利用式(3)和式(4)联立求解,推求满足各水面水质、水量要求的最小补水量,为管理部门补水调度提供科学依据。

以溇沱河水环境修复段的主要超标项目总磷为例,采用实测资料率定法<sup>[15-16]</sup>,模型计算与实测值之间允许误差规定为不大于35%。经参数率定及验证,1-4号水面总磷的综合衰减系数为0.06 1/d,5号水面总磷的综合衰减系数为0.05 1/d。

### 3.2.3 综合需水量的确定

以补水节点划分的5个时段为计算时段,取各时段、各水面的补水等于相应的蒸发、渗漏、绿化需水与相应时段水面降水量之和,且水源从1号水面至5号水面串联补水,75%保证率降雨量补给量选用正定站作为代表站,月分配采用典型年同倍比缩放求得。各水面补给量见表1。

表1 75%保证率串联水体补给量

Tab.1 Serial water supply with 75% assurance rate (in ten thousand cubic meters) 万 m<sup>3</sup>

时段	12月-3月	4月-5月	6月-8月	9月	10月-11月	合计
1号水面	749	563	868	259	420	2 859
3号水面	569	403	606	186	314	2 078
4号水面	447	316	493	148	247	1 651
5号水面	227	147	243	70	121	808

以各水面各时段末 75% 保证率补水情况下的水质不超标为边界条件,运用式(3)与式(4)对各水面各时段进行联合推演,推求满足边界条件的 75% 保证率补水情况下,各水面、各时段最小需水量见表 2。

表2 水质水量结合 75% 保证率串联水体补给量

Tab.2 Serial water supply with 75% assurance rate, taking water quality into account (in ten thousand cubic meters) 万 m<sup>3</sup>

时段	12月-3月	4月-5月	6月-8月	9月	10月-11月	合计
1号水面	749+ 298	563	868	259	420+ 293	3 450
3号水面	569+ 298	403	606	186	314+ 293	2 669
4号水面	447+ 298	316	493	148	247+ 233	2 182
5号水面	227+ 298	147	243	70	121+ 133	1 239

注:表中“+”后面的数据为维持水质达标需增加的补水量。

由水质、水量综合数学模型,推求出在总磷达标时,75% 频率降水情况下,1号-5号水面的最小需水量为 3 450 万 m<sup>3</sup>。3月、5月、8月、9月及 11月各补水节点现状水平年 75% 保证率补水量分别为 1 047 万 m<sup>3</sup>、563 万 m<sup>3</sup>、868 万 m<sup>3</sup>、259 万 m<sup>3</sup>、713 万 m<sup>3</sup>。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

按照《景观娱乐用水水质标准》(GB 12941-91)的 C 类标准评价,各水面水质均时有超标。为计算维持水质达标的最低需水量,根据物质守恒定律和化学反应动力学原理,对 5 个串联水体,构造了描述“坝式景观水体”水质、水量变化的综合数学模型,依据水体蒸发、渗漏及水质监测资料,率定污染物综合衰减系数,从而建立起“坝式景观水体”水质和补水量的定量关系,进而对串联景观水体联合推演,确定了现状水平年 75% 保证率条件下,1号-5号水面年最小需水量为 3 450 万 m<sup>3</sup>。水量补充时间应为 3月、5月、8月、9月及 11月。各补水节点现状水平年 75% 保证率补水量分别为 1 047 万 m<sup>3</sup>、563 万 m<sup>3</sup>、868 万 m<sup>3</sup>、259 万 m<sup>3</sup>、713 万 m<sup>3</sup>。

### 4.2 建议

滹沱河水环境修复段为改善河流环境状况迈出

了第一步,但是通过对滹沱河水环境修复段的水位、水质进行跟踪监测,也发现了其在供水、用水管理中的一些问题。一是多水源供水保障机制尚未建立,工程用水保障程度不高。应尽快建立南水北调中线环境供水机制,对于像滹沱河水环境修复段这样的重要环境用水户,纳入供水目标,提高供水保证率。二是水量水质监测设施不完备,来水、退水、耗水水质等缺乏监测,尤其是对入河排污口的监测,据本次监测资料分析,三号水面以下水体水质受右岸排污口污水排放的影响很大,市政府应协调相关部门,彻底封堵右岸排污口。水质水量监测是保障工程长期稳定运行的基础,运行管理部门应当尽早立项,建立起完备的水质水量监测体系。

### 参考文献(References):

- [1] 刘光莲,张克峰,杜贞栋,等. 河口景观生态湿地需水量探讨[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(5): 100-103. (LIU Guanglian, ZHANG Ke feng, DU Zherrong, et al. Study on landscape water requirement for estuarine wetlands[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(5): 100-103. (in Chinese))
- [2] 严晨菲,李发文,王秀荣,等. 城市人工湖生态环境需水量的计算方法[J]. 北京水务, 2013, (增 1): 55-59. (YAN Chen fei, LI Fei wen, WANG Xiur duo, et al. Algorithms for environmental water demand in the city lake[J]. Beijing Water, 2013, (S1): 55-59. (in Chinese))
- [3] 徐志侠,陈敏建,董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 5-9. (XU Zhixia, CHEN Minjian, DONG Zhengchuan. Comments on calculation methods for river ecological water demand[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(1): 5-9. (in Chinese))
- [4] 梁洁,王宁. 滹沱河综合整治工程与生态环境[J]. 水科学与工程技术, 2010(增刊): 93-94. (LIANG Jie, WANG Ning. Integrated renovation and ecological environment of Hutuo River[J]. Water Resources and Engineering Technology, 2010( Supplement): 93-94. (in Chinese))
- [5] 田义轩. 石家庄滹沱河综合整治生态景观概念设计[J]. 水科学与工程技术, 2011, (6): 48-49. (TIAN Yixuan. Ecological landscape concept design of shijiazhuang Hutuo River comprehensive management[J]. Water Resources and Engineering Technology, 2011, (6): 48-49. (in Chinese))
- [6] 郝彦玲,卢双宝. 滹沱河整治工程的主要任务[J]. 河北水利, 1997(5): 48-49. (HAO Yanling, Lu Suangbao. Primary mission of renovation of Hutuo River[J]. Hebei Water Resources, 1997(5): 48-49. (in Chinese))
- [7] 许木启,黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 548-558. (XU Muqi, HUANG Yuyao. Restoration and reestablishment of the damaged ecosystem of inland waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 548-558. (in Chinese))
- [8] GB 50015 2003, 建筑给排水设计规范[S]. (GB50015 2003,

- Code for design of building water supply and drainage[S]. (in Chinese)
- [9] 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. (LU Feng, ZOU Weigu, LU Bin. Supplementary water quantity for closed landscape water body [J]. Water Purification Technology, 2010, 29(3): 11-13. (in Chinese))
- [10] SL 18-91, 渠道防渗技术规范[S]. (SL18-91, Standard for engineering technique of seepage prevention on canal[S]. (in Chinese))
- [11] GB 12941-91, 景观娱乐用水水质标准[S]. (GB12941-91, Water quality standard for scenery and recreation area[S]. (in Chinese))
- [12] 袁煦. 城市大型景观水体补水水质目标与处理工艺选择[J]. 中国给水排水, 2014, 30(6): 14-16. (YUAN Xu. Water quantity target and treatment process selection for water supplement of urban large scale waterscape [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(6): 14-16. (in Chinese))
- [13] 徐智廷, 李河海. S-P 概化模型在临沂水功能区纳污能力分析中的应用[J]. 水资源保护, 2007, 23(3): 27-29. (XU Zhiting, LI Hehai. Application of S-P generalized model to analysis of water environmental capacity in linyi water function area[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(3): 27-29. (in Chinese))
- [14] 李红亮, 李文体. 水域纳污能力分析研究方法研究与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(3): 58-60. (LI Hongliang, LI Wenti. Methods for calculation of water pollutant capacity and application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(3): 58-60. (in Chinese))
- [15] 李红亮, 米玉华. 河北省水功能区纳污能力及限制排污总量研究[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 76-79. (LI Hongliang, MI Yuhua. Study of the permissible pollution bearing capacity and gross discharge control of water function zones in Hebei Province [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(1): 76-79. (in Chinese))
- [16] 夏青. 流域水污染物总量控制[M]. 北京: 中国环境出版社, 1996: 170-287. (XIA Qing. Total quantity control of pollutant discharge in drainage basin[M]. Beijing: China Environmental Press, 1996: 170-287. (in Chinese))