

Analysis of Conventional Antifouling Scheduling Method for Slice Gate Group*

Meifeng Zhong, Shichun Gao, Huiyun Zhang

State Key Laboratory of the Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: meifengzhong@yahoo.com.cn

Received: Apr. 14th, 2012; revised: May 21st, 2012; accepted: May 29th, 2012

Abstract: There are many sluice gates and dams in Shaying River, which is a tributary of Huai River. There is much sewage gathered between the dams during the dry season, which may lead to the pollution of the main stream of the Huai River. The unreasonable scheduling between sluice gate can easy cause the waste of resources. Conventional antifouling scheduling made quite a good effect on reducing and avoiding the water pollution accidents in recent 10 years. This article analyses the conventional antifouling scheduling which contains grading optimization and economic operation ideas in the Shaying River. The simulation results indicate that the system has good performance in operation and adaptability, and provides guidance and reference value for joint reservoir operation of the Huai River.

Keywords: Sluice Gates and Dams; Grading Optimization; Antifouling Operation; Shaying River

闸坝群常规防污调度方法分析*

钟美凤, 高仕春, 张慧云

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: meifengzhong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年4月14日; 修回日期: 2012年5月21日; 录用日期: 2012年5月29日

摘要: 淮河支流沙颍河上闸坝众多, 枯水期闸内聚集了大量污水, 如果调度不当, 易造成淮河干流污染事件发生, 且闸坝群之间的不合理调度易造成资源的浪费。常规防污调度是淮河流域水资源保护局长期以来的工作经验总结, 近 10 年来减少和避免了水污染事故的发生, 取得了相当好的效果。本文以淮河支流沙颍河为研究对象, 分析具有操作简单且适应性较强的常规防污调度方法。对 2012 年现状年的模拟结果表明: 常规防污调度具有分级优化和经济调度思想, 为淮河流域闸坝群多目标联合调度提供了指导和参考价值。

关键词: 闸坝群; 分级优化; 防污调度; 沙颍河

1. 前言

淮河流域位于我国的东部, 流域面积 27 万 km², 平均人口密度是全国平均人口密度的 4.8 倍, 居各大

河流域人口密度之首, 跨越豫、苏、皖、鲁, 分别占四省总面积的 52.9%、61.8%、48.0%、32.7%, 四省社会经济的协调可持续发展对于全国具有战略意义。近十年来, 淮河共发生五次较大的污染, 都与沙颍河有关, 沙颍河闸坝众多(如图 1 所示), 大多数闸坝在枯水期关闭蓄水, 在汛期首次开闸泄洪, 这种闸坝群

*基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07010-006-5)和国家自然科学基金(51079098)资助项目。

作者简介: 钟美凤(1986-), 女, 湖南汨罗人, 研究生, 研究方向为水资源规划与管理。

之间的无序调度, 加剧了污染事故的发生。

为了防御支流污染水体下泄对淮河中下游的危害, 淮河流域水资源保护局从 1990 年开始, 组织河南、安徽、江苏 3 省水利、环保部门, 开展了沙颍河、淮河水污染联防工作。1995 年 8 月 8 日国务院发布的《淮河流域水污染防治暂行条例》, 进一步明确了水污染联防工作的主要内容和各部门的职责, 以法律的手段保证了水污染联防工作的正常开展。常规调度是自防污调度以来的经验总结, 利用流域上的闸坝设施, 对淮河流域进行水质问题的闸坝群联合调度, 调控沙颍河入淮下泄流量, 充分利用淮河干流水环境容量稀释降解沙颍河高浓度污染水体, 以期达到防污、减灾的目的。自 2004 年以来, 减少和避免了水污染事故的发生, 取得了相当好的效果。

张永勇等^[1,2]将闸坝水量水质联合调度模型、遗传算法耦合到流域综合管理模型 SWAT 中, 从流域尺度上探讨了闸坝的合理调度模式, 并证明闸坝的水量水质优化调度对改善全流域水环境状况, 提高水资源利用率有积极的作用。王昭亮等^[3,4]采用离散微分动态规划法研究了沙颍河中颍上闸和淮河干流之间的调度关系, 定量评估闸坝调控入河污染负荷对河流水质浓度时空分布的影响。但都对常规防污调度方法分析不够。在污染事故频繁发生的淮河流域, 其支流沙颍河闸坝众多是其主要特色, 并且闸坝主要跨省分布在河南省和安徽省, 跨省分布的闸坝在进行防污调度中, 调度人员需要跨省交流需要执行的调度指令, 这给调

度带来了一定的麻烦。本文意在深入研究常规防污调度方法隐藏的分级优化和经济调度思想, 为淮河流域闸坝群多目标联合调度提供理论依据和研究基础。

2. 常规防污调度方法分析

该闸坝群系统是一个大型的复杂系统, 沙颍河上闸坝众多, 对应着不同的用水户需求。淮河干流来水一般水质较好, 而沙颍河上各闸坝内水质比较脏。沙颍河上周口闸、槐店闸以灌溉为主, 枯水期保持较高水位, 颍上闸是沙颍河污水入淮河的主要控制闸, 枯水期也是灌溉为主。在常规防污调度过程中, 以淮河干流鲁台子作为主要监测断面, 以河道主要的污染物 COD_{Mn} 和 NH₃-N 为调度指标, 采用逆推的方法控制颍上闸的下泄流量。其目的是调用最少的闸坝, 使监测断面的水质达标。

2.1. 防污目标函数

为使干流监测断面的水质达标, 要求充分利用支流上闸坝形成的河道库容, 考虑干流来水的水质水量变化过程的实时信息, 调控支流上的闸坝, 使其泄流的水质水量与干流的水质水量相互配合, 以达到干流断面的水质目标或尽可能的靠近水质目标, 即使汇合后的污染物浓度最大值最小。

从系统示意图 1, 可以得出颍上闸是沙颍河上最后一道闸坝, 也是关键闸坝, 控制着沙颍河最终下泄到淮河干流的水质水量。为使主要监测断面水质达



Figure 1. Sketch map of Shaying River and Wo River
图 1. 沙颍河、涡河系统示意图

标, 保证淮河干流水质要求, 将主要监测断面水质小于或等于标准值作为常规防污调度目标函数。

经过沙颍河各个闸坝的调节控制后, 污水最终经颍上闸下泄进入淮河干流, 与干流来水进行混合, 混合后的水质必须满足一定的水质标准, 用数学表达式表示如下:

$$\frac{Q(t)C(t)+Q_0(t)C_0(t)}{Q(t)+Q_0(t)} \leq C_b \quad (1)$$

式中: 其中, $Q(t)$ 、 $C(t)$ 分别为淮河干流任一时刻的来水流量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 浓度; $Q_0(t)$ 、 $C_0(t)$ 分别为颍上闸对应时刻下泄的流量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 浓度; C_b 为规定的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 的水质标准值。

对上式进行整理:

$$Q_0(t) \leq \frac{Q(t)C_b - Q(t)C(t)}{C_0(t) - C_b} \quad (2)$$

由上式我们可以看出: 在某一时段, 淮河干流来水水质已知, 是一定值, 颍上闸下泄流量随其闸坝内的水质状态而变化。

2.2. 约束条件

1) 闸坝水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t})\Delta t - W_{i,t} \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为*i*水库*t*时段初末库蓄水(m³); $I_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为*i*闸坝*t*时段平均入闸流量(m³/s)和下游出闸流量(m³/s); $W_{i,t}$ 为*i*闸坝*t*时段上游引水量(m³)。

2) 闸坝约束

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (4)$$

式中: $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为*i*闸坝最小与最大闸坝蓄水量(m³)。

3) 闸坝综合利用约束

$$Q_{i,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\max} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,\min}$ 、 $Q_{i,\max}$ 分别为*i*闸坝最小与最大下泄流量, 最小下泄流量由下游水资源综合利用要求提出。

4) 闸坝引水约束

$$\sum_T W_{i,t} \leq W_{i,\max} \quad (6)$$

式中: $W_{i,t}$ 为*i*闸坝*t*计算期的允许用水量。

5) 闸坝水质平衡约束

$$\begin{aligned} & V_{i,t+1} \cdot C_{i,t+1} \\ &= V_{i,t} \cdot C_{i,t} + I_{i,t} \cdot \Delta t \cdot CI_{i,t} \\ & - (W_{i,t} + Q_{i,t} \cdot \Delta t) \cdot C_{i,t} \\ & - K(V_{i,t+1} + V_{i,t}) \cdot C_{i,t} / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $C_{i,t}$ 、 $C_{i,t+1}$ 分别为*i*闸坝*t*时段初末污染物浓度; $CI_{i,t}$ 为*i*闸坝*t*时段平均来水的污染物浓度; k 为*i*闸坝污染物的综合降解速率系数。

6) 汇流节点水量平衡条件

$$I_{j,t} = Q_{j,t} + F_{j,t} \quad (8)$$

式中: $I_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 、 $F_{j,t}$ 分别为第*j*节点*t*时刻的流量、上游河段出流量、支流汇入流量。

7) 汇流节点水质平衡条件

$$CI_{j,t} = (Q_{j,t} \cdot C_{j,t} + F_{j,t} \cdot CF_{j,t}) / I_{j,t} \quad (9)$$

式中: $CF_{j,t}$ 为第*j*节点*t*时刻的支流汇入的污染物浓度。

8) 洪水演进方程

在没有河道水量水质模块的支持时, 洪水演进使用马斯京根法描述:

$$Q_{j,t+\tau} = C_0 I_{j,t+\tau} + C_1 I_{j,t} + C_2 Q_{j,t} \quad (10)$$

式中: τ 为河道洪水传递时段, $I_{j,t}$ 、 $I_{j,t+\tau}$ 为*j*河段*t*时段初、*t* + τ 时段末上断面的入流量; $Q_{j,t}$ 、 $Q_{j,t+\tau}$ 为*j*河段*t*时段初、*t* + τ 时段末下断面的出流量; C_0 、 C_1 、 C_2 为根据河段水力特性推算出的权重系数。

9) 水质演进方程

一维均匀河段的水质迁移转化基本方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_1 C \quad (11)$$

式中: C 为水体中*t*时的污染物浓度(mg/L); U 为河段平均流速(m/s); K_1 为污染物的一级降解系数(s⁻¹); E 为纵向离散系数(m²/s); x 为沿流程的距离(m)。

其中, 洪水演进方程中的权重系数是由淮委水文局提供, 水质演进方程中的纵向离散系数和降解系数是根据一维水动力模型的隐式差分形式, 以 2000 年至 2008 年的历史监测断面的实测水质数据为依据来率定的, 以 2008 年至现阶段的数据来进行调试的。

2.3. 方法分析

对于某一时段而言, 淮河干流来水水量、水质是已知值, 为了使混合之后的水质满足规定标准, 就必须使得颍上闸下泄的水量水质的乘积是一定的值。对于不同的干流来水情况, 颍上闸下泄的负荷不同, 即可以认为颍上闸下泄流量和淮河干流来水互为补偿, 最终使混合之后监测断面鲁台子的水质达标。根据式(2)求得的沙颍河下泄流量有如下几种情况:

1) 颍上闸下泄流量为负数

当准干来流和颍上闸下泄流量均优于水质标准, 或均劣于水质标准时, 根据式(2)得颍上闸的下泄流量为负数。

对于第一种情况, 不需要调动任何闸坝, 即可使鲁台子的水质达标, 此时为理想状况。

对于第二种情况, 此时为最差状况。这时应分析两边来水中两种水质指标的超标情况。若两边来水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 或者是 COD_{Mn} 超标情况不一样, 则还有调控的空间。如颍上闸下泄流量中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标, 淮河干流来水中 COD_{Mn} 超标的情况下, 根据准干来流情况, 通过调控颍上闸下泄流量, 可能使监测断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 都达标。反之, 若两边来水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 或者是 COD_{Mn} 同时超标, 则颍上闸调控无效, 只能利用颍上闸最大调控能力蓄滞污水, 使鲁台子的水质尽可能地好。

2) 颍上闸下泄流量为正数

当准干来流水质优于水质标准, 颍上闸下泄流量劣于水质标准, 或者准干来流劣于水质标准, 颍上闸下泄流量优于水质标准, 根据式(2)得颍上闸的下泄流量为正数。

第一种情况下, 若淮河干流来水水质好且流量大, 颍上闸不需调控的情况下淮干的水环境容量也可容纳稀释沙颍河下泄的污水。反之, 当淮河干流来水水质好但流量小, 则淮河干流水环境容量有限, 不足以全部容纳颍上闸下泄的污水, 此时应该调控颍上闸下泄流量, 控制、减小其下泄流量, 降低准干清水稀释的负担, 使准干来水与颍上闸汇入河口的来流通过一定比例相互混合, 可使鲁台子的水质达到标准值。

在控制颍上闸的下泄流量的情况下, 必然会导致闸坝内水位升高。若闸内水位超过防洪最高水位则会影响闸坝的防洪安全, 此时应该借助其上一级闸坝(阜

阳闸)的槽蓄能力去蓄滞部分污水, 即阜阳闸相应地减少下泄流量, 减轻颍上闸的防洪负担。同样的, 阜阳闸下泄流量的减少也会导致阜阳闸内水位的升高, 在不超过阜阳闸最高限制水位的情况下, 可以继续利用其调控能力蓄滞颍上闸不能调控的多余水量, 若超过了最高水位限制则造成防洪风险, 则继续上推利用耿楼闸多余的库容蓄滞多余水量。依次类推, 由于演进时间的限制, 可一直逆推计算到槐店闸。

第二种情况下, 原理如第一种情况, 通过颍上闸控制下泄流量, 增大颍上闸的下泄流量, 作为汇合时的补偿清水, 利用其水环境容量, 使准干来水与颍上闸汇入河口的来流通过一定比例相互混合, 可使鲁台子的水质达到标准值。

总之, 在常规调度过程中, 若单独启动颍上闸即可使监测断面水质达标, 则不用启动其上游闸坝; 若颍上闸自身的调蓄能力不足以使监测断面水质达标, 则会同时启动阜阳闸, 通过阜阳闸与颍上闸的联合调度使监测断面水质达标; 若阜阳闸与颍上闸联调, 其调控能力还是有限时, 则启动耿楼闸。同理, 在演进时间范围内可以继续启动上级闸坝。以上分析表明, 常规防污调度具有分级优化和经济调度的思想。

3. 实例验证

以 2012.4.10~13 号的来水为例。本算例降雨中心发生在淮河干流和沙颍河上游。淮河干流水质较好属于 III 类水, 沙颍河由于周边的生活污水和工厂的排污, 区间水质很差, 均是劣 V 类水。计算条件如表 1 所示。

以闸坝维持原泄流(现状模拟)的情况下鲁台子断面的水质水量变化过程作为参考, 来验证常规调度的

Table 1. Control ability and real-time information of sluice gates and dams

表 1. 闸坝调控能力和实时信息

闸坝名称	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	COD_{Mn} (mg/L)	实时水位 (m)	最高控制 水位(m)	正常水位 (m)	最低控制 水位(m)
周口闸	1.6	7	45.93	48	45.1	40
郑埠口闸	1.6	7	42.5	42.5	40.6	36.5
槐店闸	1.93	13.6	38.75	39	37	31.5
耿楼闸	1.5	3.5	32.37	33.5	33.5	28.5
李坟闸	0.04	12.8	30.71	35.5	33.46	30.6
阜阳闸	1.5	4.2	28.22	29	28	24.1
颍上闸	1.02	7.5	23.37	24	24	20.9

效果。两种情况皆是利用以上模型进行模拟计算, 但现状模拟是维持闸坝原始状态不动, 而常规调度是根据对闸坝的需求调动闸坝, 其计算结果如表 2 所示。对水质类别的判定采用综合分析法, 只要是其中一个指标超标, 则认定水质超标。图 2、3 为不同调度方式下鲁台子断面水质变化过程。

从图 2、3 可以看出, 常规防污调度可以使鲁台子断面的水质达标, 其调度效果优于现状模拟。

4. 结论及展望

常规调度采用分级优化和经济调度的思想, 在闸

Table 2. Water quality type and value of cross-section of Lutaizi under different scheduling modes
表 2. 不同调度方式下鲁台子断面水质类别及特征值

调度方式	水质指标	最大值 (mg/L)	平均值 (mg/L)	单指标水质标准	综合水质标准
现状模拟	NH ₃ -N	0.81	0.69	III类	IV类
	COD _{mn}	6.28	4.97	IV类	
常规调度	NH ₃ -N	0.81	0.69	III类	III类
	COD _{mn}	6.00	5.24	III类	

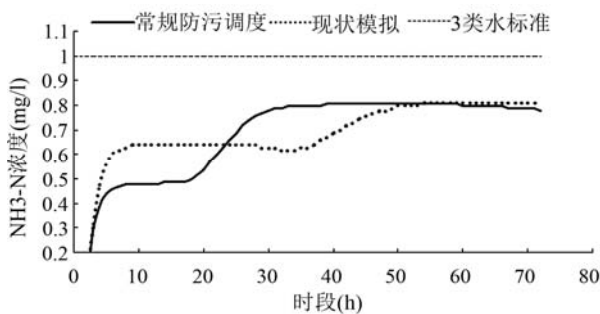


Figure 2. Change progress of NH₃-N of cross-section of Lutaizi under different scheduling modes
图 2. 不同调度方式下鲁台子水质指标 NH₃-N 的变化过程

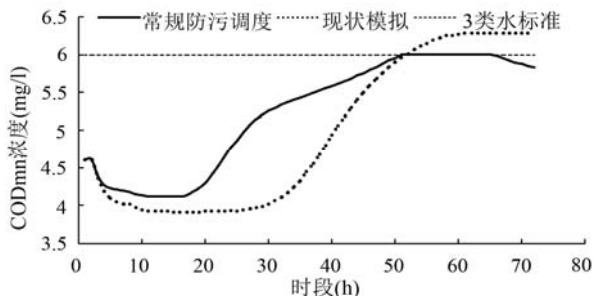


Figure 3. Change progress of COD_{mn} of cross-section of Lutaizi under different scheduling modes
图 3. 不同调度方式下鲁台子水质指标 COD_{mn} 的变化过程

坝众多的流域, 在调用尽可能少的闸坝的情况下可以使监测断面达标, 其简单的计算方法为沙颍河的调度带了极大的方便, 并且使得调度思想可以及时得到反馈和响应。

1) 当淮干来水比较大的情况下, 可以充分利用淮干形成的水环境容量下泄颍上闸的脏水, 防止污染团集中下泄, 达到经济调度的目的。

2) 当淮干来水较小的情况下, 则充分利用闸坝形成的河道库容蓄滞部分脏水在闸内, 在淮干实际来水的情况下, 能下泄多少就下泄多少。当颍上闸由于蓄滞脏水而达到防污高水位时, 则需要调用它的上一级闸坝(阜阳闸), 同理逐级类推, 直到在有效时间内使监测断面达标。如果在有效时间内断面依然不能达到水质要求, 则要求降低淮河干流的水质标准。

在实际应用中, 由于常规调度中, 闸坝内蓄滞的脏水较多, 可能会带来防洪风险, 所以要尽可能的利用气象预报资料。当在枯水期, 可以充分利用常规调度方法, 但是, 在丰水期可以把分级优化思想和全局优化思想结合起来。本文主要研究的是淮河干流和沙颍河闸坝群防污调度之间的关系, 我们还可以把淮干、沙颍河和涡河结合起来调度, 充分利用蚌埠和鲁台子之间的互补关系, 使鲁台子断面和蚌埠断面皆达标。

参考文献 (References)

- [1] 张永勇, 夏军, 陈军锋, 等. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究[J]. 水利发电学报, 2010, 29(5): 159-164. ZHANG Yongyong, XIA Jun, CHEN Junfeng, et al. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 159-164. (in Chinese)
- [2] 张永勇, 夏军, 王纲胜, 等. 淮河流域闸坝联合调度对河流水质影响分析[J]. 武汉大学工学学报, 2007, 40(4): 31-35. ZHANG Yongyong, XIA Jun, WANG Gangsheng, et al. Research on influence of dams' union dispatch on water quality in Huaihe River Basin. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 31-35. (in Chinese)
- [3] 王昭亮, 高仕春, 艾泽. 闸坝对河流水质的调控作用初步分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(12): 1339-1340. WANG Zhaoliang, GAO Shichun and AI Ze. Preliminary analysis of dams' regulating on river water quality. Water Conservancy Science and Technology, 2010, 16(12): 1339-1340. (in Chinese)
- [4] 王昭亮, 高仕春, 张慧云. 闸坝对河流水质调控作用的影响因子[J]. 武汉大学工学学报, 2011, 44(5): 571-575. WANG Zhaoliang, GAO Shichun and ZHANG Huiyun. Research on influential factors of dams' regulating on river water quality. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(5): 571-575. (in Chinese)