

改善张家港地区水环境引水方案的对比研究

李大勇,刘 凌,董增川,崔广柏

(河海大学水资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 基于张家港地区独特的地理位置,简述引水改善该地区水环境的必要条件、水动力条件及引水后合理调配水量的有利条件,拟定了 4 种调水方案,利用感潮河网数学模型,对 4 种方案调水后主要监测断面的 COD_{Cr} 进行预测,分析了各个监测断面调水后的水质变化趋势.从环境和经济的角度出发,提出在消减各类污染源的同时,充分利用长江水潮差大的特点自引流冲污是综合整治张家港地区水环境的最佳方案.

关键词 感潮河网;数学模型;潮位边界;引水;水质预测;张家港地区

中图分类号:X321 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2004)06-0017-04

改善区域水环境是一个复杂的系统工程^[1],除了从根本上消减各类污染源外,引清水冲污是改善水环境较实用和有效的方法之一,其在国内已有许多成功的应用例子^[2,3].长江张家港段河水水质优良、水量充沛,是张家港地区得天独厚的水利资源,为张家港地区引水治理水环境创造了必要条件;长江张家港段水面开阔,潮汛水位受非正规半日潮影响较大,为张家港地区引水治理水环境创造了水动力条件.张家港地区各个水利分片之间及其与相邻地区之间均建闸控制,为引水后在河网内合理地分配水量创造了有利条件.本文主要利用已建的感潮河网数学模型对 4 种方案调水后各个主要监测断面的水质变化趋势进行分析,为改善张家港地区的水环境、选择最佳综合治理方案提供科学借鉴.

1 张家港地区感潮河网水量水质数学模型

1.1 水量模型基本方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q_L \tag{1}$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^4} = 0 \tag{2}$$

式中: t 为时间坐标; x 为空间坐标; Q 为流量; Z 为水位; u 为断面平均流速; n 为糙率; A 为过水断面面积; B 为主流断面宽度; B_w 为水面宽度(包括主流宽度及仅起调蓄作用的附加宽度); R 为水力半径;

q_L 为单位河长的旁侧入流流量.

1.2 水量计算

张家港地区河网经概化后含 28 个节点、36 条河道、171 个计算断面(见图 1).用 Preissmann 加权隐格式离散方程,计算的时间步长取 900 s,空间步长依河道实际情况取 1.0~3.0 m,采用三级联合解法求解方程组,得到各断面各时段的水位和流量过程.边界条件处理如下:采用邻近整点潮位站的资料,用拉格朗日插值方法获得沿江 3 闸的整点潮位资料.在此基础上,采用三次样条插值插出 3 个边界的瞬时潮位;望虞河上游边界点采用望虞河闸上游引排水过闸流量资料,引水取正,排水取负;图 1 左侧 4 个节点位于白屈港控制线上,有闸控制且常年关闭,故而采用零流量边界条件;南部边界的 3 个控制站

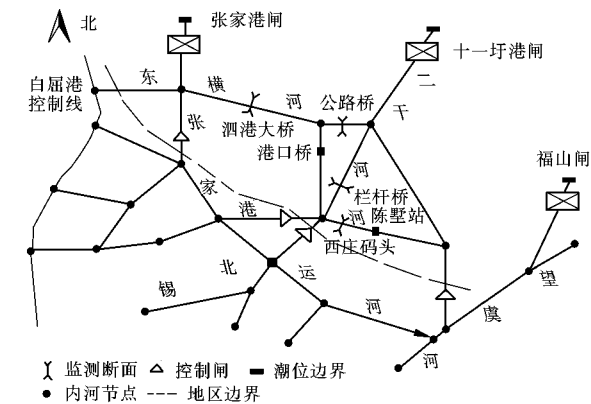


图 1 张家港地区引水工程布置示意图

基金项目 国家自然科学基金重点项目(50239030)
作者简介 李大勇(1975—),男,吉林长春人,博士研究生,从事水文水资源及区域水环境研究.

并未在张家港地区,只是为了计算的准确性及方便而采用它们作为控制边界,实际计算时采用实测水位资料,望虞河末端节点采用动水位边界.初始流量、水位取固定常数.应用2000年1月份和2月份陈墅站的实测水位过程、1月23日港口桥和泗港大桥的实测流量以及沿江3闸实际引排水量资料来率定糙率,取值范围为0.018~0.035.应用2000年3月份和4月份陈墅站的水位过程,西庄码头桥断面、港口桥断面流量值验证模型,部分验证结果见图2和图3.

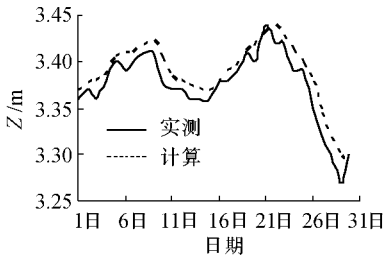


图2 2000年3月陈墅站水位过程线

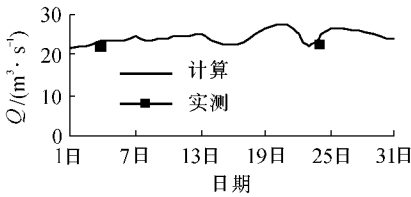


图3 2000年3月港口桥断面流量过程线

1.3 多参数水质模型基本方程^[4]

描述河网中污染物运动及浓度变化规律的控制方程是带源项的一维对流扩散方程:

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S_c - S = 0 \tag{3}$$

式中: C 为水流输送物质的断面平均浓度; A 为断面面积; E_x 为纵向分散系数; S_c 是与输送物质有关的衰减项,可写成 $S_c = K_d AC$ (其中 K_d 是衰减因子,取值在0.05~0.25之间); S 是外部的源或汇项; x 是空间坐标; t 是时间坐标; Q 为断面平均流量,由水量模型计算提供.

1.4 水质计算

为了便于后面的讨论,先列出污染控制因子 COD_{Cr} 的每一类别的标准浓度.按GB3838-2002《地表水环境质量标准》中 COD_{Cr} 的分类标准,第Ⅰ~Ⅴ类水的限制浓度分别为15 mg/L,15 mg/L,20 mg/L,30 mg/L,40 mg/L.

采用隐式迎风格式离散水质方程,形成的节点水位方程组采用迭代法求解.时间步长取3600 s,空间步长同水量计算. COD_{Cr} 的初始浓度取20 mg/L,沿江3闸引水 COD_{Cr} 的浓度取Ⅲ类水质的下限,其余的内边界给定浓度过程.纵向分散系数 E_x 是一个

不灵敏系数,随水流条件而定,采用Fisher的半经验公式:

$$E_x = 0.011 U^2 B^2 (h \sqrt{g h I})$$

式中: I 为水力坡降; U 为流速; B 为水面宽.采用2000年1月份张家港地区地表水监测资料进行模型率定,用2000年3月份8个监测断面的实测资料进行模型验证,验证结果见表1,可见该模型的模拟结果总体上令人满意.

表1 2000年3月监测断面 COD_{Cr} 的计算值与实测值对比

断面名称	计算值/ (mg·L ⁻¹)	实测值/ (mg·L ⁻¹)	绝对误差/ (mg·L ⁻¹)	相对误差/ %
张家港闸上游站	12.06	9.6	2.46	25.6
张家港袁家桥	27.47	23.6	3.88	16.4
西庄码头桥	31.33	34.8	3.48	10.0
港口桥	38.65	48.8	10.16	20.8
二干河乘航大桥	32.51	24.4	8.12	33.2
二干河栏杆桥	32.89	24.4	8.50	34.8
东横河泗港大桥	32.79	32.8	0	0
城东公路桥	35.74	41.2	5.47	13.3

2 主要污染因子及总引水量的确定

长江水质状况关系到引水量的大小和引水工程的成效,根据对长江近岸水进行的多次监测分析可知,当长江涨潮时,监测断面水质均较好,达Ⅱ类标准,而落潮时,沿江的闸门开闸排水,水质较差.因此,引水水体污染因子分别按 COD_{Cr} 为12 mg/L、 BOD_5 为1.5 mg/L、 NH_3 为0.25 mg/L进行计算.

对张家港地区内河多个监测断面的水质情况进行分析,可知内河水体主要遭受有机物污染,因此计算中根据监测资料把主要污染控制因子 COD_{Cr} , BOD_5 , NH_3 的现状本底浓度分别定为30 mg/L,5 mg/L和3 mg/L.引水完成后,控制河网中3种主要污染因子的浓度在Ⅲ类的下限.

根据张家港地区水文资料分析,地区的正常水位在3.0 m左右,然后按图1概化河道的断面尺寸资料,计算得张家港地区河网的总水量为820.4万 m^3 .

根据质量守恒定律,运用浓度控制方法计算引水总量,为保险起见,忽略引水期间污染物的降解,采用如下公式^[5]:

$$Q_0 = \frac{(C_1 - C)}{(C_1 - C_0)} Q \tag{4}$$

式中: Q_0 为引水总量,万 m^3 ; Q 为河网现有总水量,万 m^3 ; C 为引水后河网水体污染因子的混合浓度,最高限值一般为水功能区划确定的水质目标,mg/L; C_0 为引水水体污染因子的浓度,mg/L; C_1 为河网现状污染因子的浓度,mg/L.运用上式分别用3种主要控制因子进行计算,从计算结果可知由

COD_{Cr}控制的引水总量为 683.7 万 m³,占河网总水量的 83.3%。经验证,引水后其他两种主要污染因子的浓度全部达到Ⅲ类的下限。

3 各种方案预测结果分析

由图 1 所示,地区分界虚线以北为张家港地区,以南为常熟、无锡地区。张家港地区在建闸形成水利分片后,基本上形成了水利工程的合理的调度控制系统,在汛期按防洪安全要求调度,而在调水改善地区的水环境时,这些控制闸一方面起到控制水流流向的作用,以免污水在个别地方积存,另一方面可控制相邻区域的污水(主要是地面径流补给形成的污染源)进入而达到截污的目的。图 1 中张家港地区与相邻地区的控制闸并未给出,在调水时这些边界闸关闭,避免了污水被清水推动到相邻的地区,同时也避免了西南的 4 个控制水文站的水位在调水过程中受到影响。张家港闸作为引水闸门,十一圩港闸作为排水闸门。拟定 4 种调水方案,引水截止日期均为 1 月 20 日,这样便于观察调水停止后各个主要监测断面的水质变化趋势,比较方案的优劣。污染源采用 2000 年资料。

3.1 方案 1

利用长江水体的潮差,采用自流引水方式,高潮时开启张家港闸引水,关闭十一圩港闸,低潮时关闭张家港闸,开启十一圩港闸排水。从 1 月 10 日起开始引水,合理调度引水闸门的开启高度,10 d 内引进的水量可满足上述计算的引水量要求。水量模型中考虑各闸运行方式并进行计算,各个主要监测断面的 COD_{Cr}预测结果见表 2。

表 2 2000 年 1 月 23 日主要监测断面 COD_{Cr}预测浓度 mg/L

河 流	断 面	实测 浓度	预测浓度			
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
东横河	泗港大桥	38.8	27.6	19.6	22.4	15.7
东横河	公路桥	40.4	25.4	18.6	24.7	14.6
二千河	栏杆桥	49.2	28.9	22.7	26.8	16.7
张家港河	西庄码头	48.4	26.7	19.4	25.4	16.5

计算结果表明,各个主要监测断面的 COD_{Cr}浓度都有降低,但仍维持在Ⅳ至Ⅴ类水之间。从图 4 可以看出,引水停止后,COD_{Cr}浓度出现很大程度的上升,可见在现有的污染源情况下,利用张家港闸自流引水只能在一定程度上减轻污染,却不能彻底改善张家港地区的水环境状况。

3.2 方案 2

通过采取工业污染深度处理、生活污水集中处理及控制农业面源等措施,消减污染源 30%。闸门的调度方式同方案 1。合理调度后 COD_{Cr}的预测结果见表 2。

计算结果表明:各个主要监测断面的 COD_{Cr}浓

度普遍降低,基本为Ⅲ类,污染程度大为减轻。从图 4 中可以看出,调水停止后 COD_{Cr}浓度略有上升,可见在对现有污染源消减 30%的情况下,通过张家港闸自流引水合理调度后,能够从相当程度上改善张家港地区的水质状况。

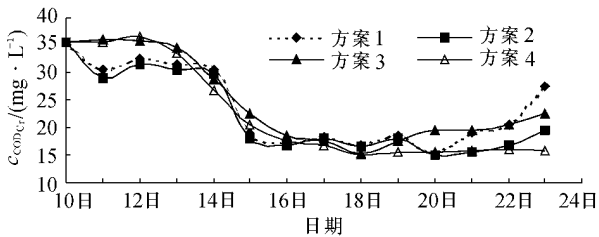


图 4 2000 年 1 月 4 种方案调水后泗港大桥断面 COD_{Cr}浓度变化趋势

3.3 方案 3

在张家港闸和十一圩港闸处建辅助的泵站,采用自流引水和动力引水相结合的调度方式,在长江水处在高潮位时,开启张家港闸自流引水,十一圩港闸开泵排水,当长江处在低潮位时,张家港闸通过泵站引水,十一圩港闸自流排水。引水日期从 1 月 13 日起,合理调度引水闸门的开启高度,控制泵在高潮、低潮时引排水流量都为 15m³/s,7 d 内引进的水量可满足上述计算的引水量要求。合理调度后 COD_{Cr}的预测结果见表 2。

计算结果表明,各个主要监测断面的 COD_{Cr}浓度基本处在Ⅳ和Ⅴ类水之间,COD_{Cr}浓度比方案 1 中有所降低。从图 4 可以看出,调水停止后 COD_{Cr}浓度有一定幅度的回升,可见在现有污染源情况下,通过闸门自流引水和动力引水相结合,能在一定程度上缓解张家港地区的水质污染状况。

3.4 方案 4

通过采取工业污染深度处理、生活污水集中处理及控制农业面源等措施,消减污染源 30%。引水调度方式同方案 3。合理调度后 COD_{Cr}的预测结果如表 2 所示。

计算结果表明,各个主要监测断面的 COD_{Cr}浓度普遍降低 20~35 mg/L 左右,污染程度大为减轻,水质类别低于Ⅲ类标准的下限。从图 4 可以看出,调水停止后 COD_{Cr}浓度在较长时间内无明显回升趋势,可见在对现有污染源消减 30%的情况下,通过闸门自流引水和动力引水相结合,能够从根本上改善张家港地区的水质状况。

3.5 比较分析

引水后,内河水体流动速度加快,且大部分河段呈单向流,一方面原河道污水被挤压排入长江,另一方面水体的自净能力得到加强,污染物浓度不断下降。方案 1 和方案 2 的引水期均为 10 d,10 d 的引水

总量可达到全部置换原内河水量的要求.从图4可看出,泗港大桥断面的水质情况在引水5d后就得到明显改善,截止到20日水质情况已达到基本稳定.而方案3和方案4由于采用动力设施,水体的置换速度加快,从1月13日起7d的引水总量可达到计算的总水量要求,引水2d后泗港大桥断面的水质状况就得到明显改善.

4 结 论

a. 从4个方案的比较计算中可以看出,方案2和方案4符合张家港地区水环境规划的水质要求,但由于方案4采用动力引水,因而增加了引水成本和建泵站的基建费用,综合考虑的结果方案2为最佳方案.

b. 从方案1与方案2的对比中可以看出,区域水环境综合治理的关键在于控制和治理各类水污染源,否则仅靠大引大排来改善水环境是靠不住的,从保护和合理开发利用水资源的角度来看也是不允许的.

c. 在现阶段,张家港地区在加强控制各类污染源的同时,利用自流引水方式改善水环境状况的综

合治理方案是可行的.

d. 调水工程合理性的论证具有相当的难度,原因有技术方面的(尤其体现在太湖河网地区),也有非技术方面的,本文只是在张家港地区现有水利工程设施的基础上做了一些初步的工作,至于在调水期间引水主河道几何尺寸是否满足过流量的要求,是否需要个别河道拓宽加深则需要进一步考虑.

参考文献:

[1] 邵东国.跨流域调水工程规划调度决策理论及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001.5~8.
[2] 熊万永.福州内河引水冲污工程的实践与认识[J].中国给水排水,2000,16(7):26~28.
[3] 薛朝霞,汪翔.引水冲污治理苏州水环境[J].中国给水排水,2002,18(10):33~35.
[4] 褚君达,徐惠慈.河网对流输移问题的求解及应用[J].水利学报,1994(10):14~35.
[5] 程声通,孟繁坚,徐明德.环境系统分析题解[M].北京:高等教育出版社,1994.51~58.

(收稿日期 2004-02-19 编辑 骆超)

(上接第12页)为了充分说明气垫式调压室的减振效果,考虑扰动源为尾水管涡流或接近机组转频的扰动,采用不同的扰动频率时,易知阻抗式调压室方案的阻抗模值大于气垫式调压室的阻抗模值.同时,如图6所示,给出其中两阶压力振荡振型,扰动频率均分别接近不同调压室系统的第3阶和第4阶固有频率,且在尾水管涡流或接近机组转频的扰动频率范围内,实线表示设气垫式调压室的强迫振动振型,虚线表示设阻抗式调压室的强迫振动振型.分析可知,采用气垫式调压室替代阻抗式调压室以后,尾水道压力振荡峰值明显减小,说明气垫式调压室的减振效果优于阻抗式调压室.

4 结 论

在水电站的有压输水系统中,考虑调压室等集中

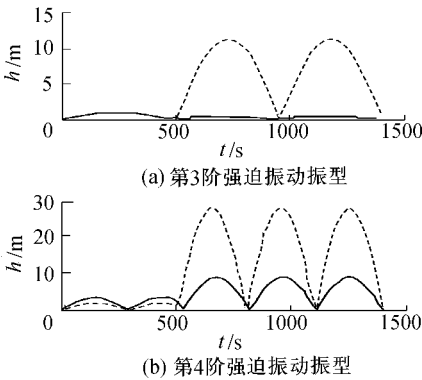


图6 设置不同类型调压室时的压力振荡振型

元件的减振作用,或在最可能引起水力振动的扰动源附近,设置盲管或蓄能器等结构,若位置和结构尺寸满足一定的条件,则能有效地削减因水力振动引起的剧烈压力振荡.设系统中出现几率较大的扰动频率为 ω ,相应波长为 λ ,则盲管和蓄能器能有效削减水力振动的条件为:单一管径的盲管,其长度满足 $l_m = \frac{\lambda}{4}(2k+1)$ ($k=0,1,2,3,\dots$),在合适的位置设置带连接短管的蓄能器,其体积满足 $V = \frac{A_3 a_4^2}{l_3 \omega^2}$.布置长有压输水系统时,若地质、地形条件许可,设置气垫式调压室,其减振效果优于相应的阻抗式调压室.

参考文献:

[1] 张绍春,陈鉴治,张师华.水电站引水隧洞的水力谐波共振[J].水力发电学报,1994(3):57~66.
[2] Wylie E B, Streeter V L, Suo Lisheng. Fluid transients in systems [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc, 1993. 287~363.
[3] 周建旭,索丽生,郭锐勤.水电站水力振动实例分析[J].水力发电学报,1998(4):50~55.
[4] Souza Jr O H, Barbieri N. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4):1269~1272.
[5] 罗志昌.流体网络理论[M].北京:机械工业出版社,1988.122~152.
[6] 张健.气垫式调压室水力性能研究[D].南京:河海大学,1999.

(收稿日期 2004-01-28 编辑 马敏峰)