

江阴城区水环境数学模型建立及应用

李 曦 逢 勇

(河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 根据 2005 年 9 月 21 日进行的江阴城区调水试验的实测数据 ,建立江阴河网区水量水质数学模型 ,并应用该模型计算分析了不同引水线路——分别通过黄山港和白屈港从长江引水对江阴城区水环境的改善效果。结果表明 :以应天河为界 ,北部城区的水环境可以通过黄山港引水得到改善 ;南部城区的水环境只能通过白屈港线路引水 ,且两种引水方案都必须持续 10 h 以上。

关键词 原型调水实验 ;水量水质模型 ;率定 ;江阴市 ;引水线路

中图分类号 :X52 ;O242.1 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2009)02-0038-04

Application of water environment numerical model in Jiangyin City

LI Xi , PANG Yong

(College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract A hydraulic and water quality numerical model was established for the river network regions in Jiangyin City according to the water quantity and quality monitoring data from the water transfer experiment in Jiangyin on September 21 , 2005 . The effects of two water transfer projects , one from the Huangshangang River and the other from the Baiqugang River , on the water environment in the urban areas of Jiangyin City was studied with the model . The results show that , with the Yingtian River being a dividing line , the water environment in the northern part of Jiangyin City can be improved through water diversion from the Huangshangang River , while the water environment in the southern part can be improved through the Baiqugang River water diversion . Both projects should be operated continuously for at least 10 h .

Key words :prototype water transfer experiment ; water quantity and quality model ; calibration ; Jiangyin City ; water diversion route

江阴市北临长江 ,南近太湖 ,是全国著名的经济发达地区。随着工农业生产和城市建设的高速发展 ,水资源配置不合理和水环境恶化正逐步成为制约江阴市社会经济发展的主要因素。为了改善江阴市的水环境状况 ,一方面需要从污染防治入手 ,提高污水处理率 ;点源面源治理双管齐下 ;另一方面可从江阴市紧邻长江的优势出发 ,研究引水改善水环境的各种途径。

根据江阴的实际情况 ,目前有两条引水线路 :分别通过黄山港和白屈港(图 1)从长江引水来改善城区水环境。这两条通江河道都建有相应的泵站实现泵引 ,黄山港泵站的流量为 8 m³/s ,白屈港泵站的流量为 100 m³/s。

1 江阴河网区水环境数学模型建立

1.1 水量水质基本方程^[1-2]

1.1.1 水量基本方程

水量计算的微分方程是建立在质量和动量守恒定律基础上的圣维南方程组 ,以流量 $Q(x,t)$ 和水位 $Z(x,t)$ 为未知变量 ,并补充考虑了漫滩和旁侧入流的完全形式圣维南方程组为 :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_T \frac{\partial Z}{\partial t} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{Q \mid Q \mid}{K^2} + \frac{Q}{A} q = 0 \tag{2}$$

作者简介 :李曦(1982—),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为环境系统规划与综合评价。E-mail:lixixi82@hhu.edu.cn

式中: Z 为水位; Q 为流量; K 为流量模数; q 为单位河长旁侧入流; A 为主槽过水断面面积; g 为重力加速度; x 为沿水流方向距离; t 为时间; B_T 为调蓄宽度, 指包括滩地在内的全部河宽。采用 Preissman 四点隐式差分格式离散方程组。

1.1.2 水质基本方程

河网对流传输移动问题的基本方程表达如下:

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

$$\sum_{i=1}^n (QC)_{i,j} = (C\Omega)_j \left(\frac{dZ}{dt} \right)_j \tag{4}$$

式中: E_x 为纵向分散系数; C 为水流输送的物质浓度; Ω 为河道叉点—节点的水面面积; j 为节点编号; i 为与节点 j 相联接的河道编号; S_C 为与输送物质浓度有关的衰减项; S 为外部的源或汇项。对时间项采用向前差分, 对流项采用上风格式, 扩散项采用中心差分格式。

1.2 水量水质方程的率定

1.2.1 原型调水实验

1.2.1.1 实验方案

2005 年 9 月 21 日在江阴城区进行了 1 次调水实验, 主要监测项目为水位、流量及水质(COD_{Mn} 、 COD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、挥发酚、 TP 、 pH 值等)。水位监测断面 22 个, 流量监测断面 22 个, 水质监测断面 23 个, 监测断面位置见图 1。每 1 h 测 1 次水位和流量, 每 2 h 测 1 次水质。

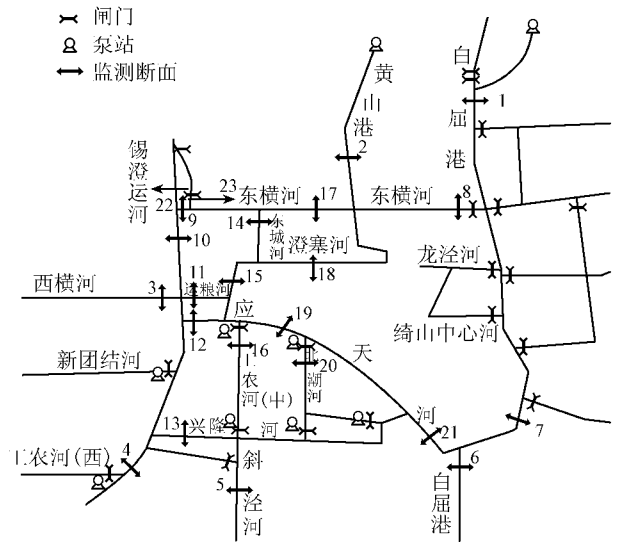


图 1 水质监测断面位置示意图

1.2.1.2 实验期间各节制(套)闸调度方案

①9 月 21 日 15:30 白屈港闸门和黄山港闸门开启, 直到长江潮位低于内河潮位时开始泵引; 白屈港泵站和黄山港泵站开启引水, 直到 22 日凌晨 1:30, 历时 10 h。②黄山港与东横河平交。③白屈港东岸

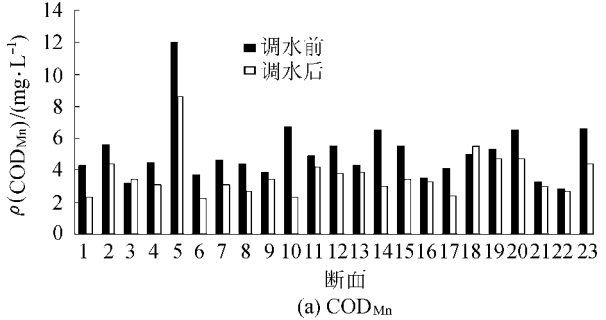
各闸门全部关闭。④白屈港西岸龙泾河、绮山中心河闸门关闭。⑤锡澄运河西岸的新团结河、工农河(西)闸门关闭。

1.2.1.3 实验成果分析^[3-8]

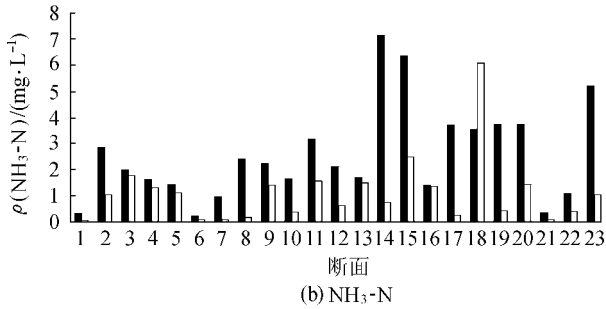
a. 水量分析: 引水 10 h 期间通过白屈港和黄山港从长江引入水量约 408.9 万 m^3 。在 1 号断面东新大桥实测, 白屈港从长江口引水量约 386.5 万 m^3 , 水流至 7 号断面东风桥处, 水量减少至 150.8 万 m^3 , 该断面过水量为闸口引水量的 39.0%, 通过 8 号断面杨市桥流入城区的水量为 67.7 万 m^3 , 该断面过水量为闸口引水量的 17.5%; 在 2 号断面秦泾桥处实测, 黄山港从长江引入的水量为 22.4 万 m^3 , 东横河 17 号断面新蒲桥处, 水量为 84.1 万 m^3 , 该断面过水量占 2 号和 8 号断面水量之和的 93.3%。整个调水区域内水流由东向西流动, 这主要源于白屈港引水水量较大, 使得东部水位高于西部。

此次调水过程中, 通过白屈港 6 号断面排水 102.3 万 m^3 , 锡澄运河 4 号断面排水 281.3 万 m^3 , 西横河 3 号断面排水 26.2 万 m^3 , 共计排水 409.8 万 m^3 , 在引排水过程中, 引入的长江水与江阴城区的河道水充分进行了混合交换。

b. 水质分析: 从本次引水的原型实验结果可看出, 锡澄运河、西横河和白屈港排水后, 城区各主要河道水质改善平均值见图 2。其中 3 号断面引水后 COD_{Mn} 没有改善, 主要是因为排水期间有城区污水经过; 18 号断面引水后水质没有改善, 这主要与黄山港与东横河的平交有关。在黄山港引水期间, 东侧白屈港同时开闸引水而且引水量较黄山港要大很多, 由于受到白屈港引水的顶托造成整个调水过程中 18 号断面基本没有流量。总体上江阴城区各主



(a) COD_{Mn}



(b) $\text{NH}_3\text{-N}$

图 2 引水前后断面水质对比

要河道水质有所改善, COD_{Mn} 主要断面平均改善程度为 25.2%, 其中 10 号断面西门桥 COD_{Mn} 改善最明显, 改善程度为 65.7%; 主要断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均改善程度为 53.7%, 17 号监测断面新蒲桥 $\text{NH}_3\text{-N}$ 改善最明显, 改善程度为 93.8%。

1.2.2 模型参数率定

根据 2005 年 9 月 21 日的江阴城区调水实验的监测结果, 对模型参数进行率定。利用实测数据进行计算, 调整各参数, 使各监测点的水量水质模型计算值和实测值达到基本吻合。水位边界条件采用开闸引水前的实测值, 率定得到河道糙率值为 0.01 ~ 0.03。水质边界条件采用边界断面各时段水质值, 率定得到 COD_{Mn} 降解系数为 0.10 ~ 0.18/d⁻¹, $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数为 0.08 ~ 0.2/d⁻¹。水量水质率定结果见图 3、图 4。

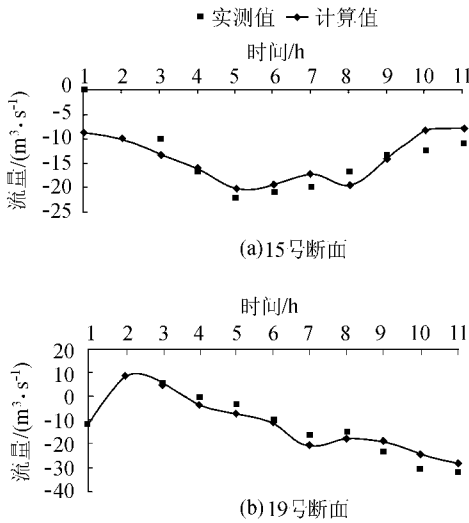


图 3 水量模型计算值和实测值对比

从率定结果可以看出, 各断面的水量水质模型计算值与实测值吻合较好, 相对误差在 10% ~ 20%, 说明该模型可用于模拟实验区域水量水质的变化过程。可用该模型对实验区域的水量水质进行计算分析, 为该河网区的引水调度提供水量水质技术保证。

2 不同调水线路对城区水环境影响分析

2.1 通过黄山港从长江引水的工况

单独通过黄山港从长江引水, 黄山港泵站开启进行泵引, 分析对江阴城区水环境的改善情况。其水文计算条件中白屈港的流量边界条件取自引工况下的流量值, 其余水文计算条件同原型调水试验, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别取调水试验前实测初始浓度值。通过黄山港从长江泵引, 不同引水时间后城区各主要断面(11、17、18 号断面位于应天河以北, 13、19、20 号断面位于应天河及以南)水质情况图见图 5。从图 5 可以看出: 应天河以北的 3 个断面的水质在引水 10 h 后都有所改善, 引水 20 h 后改善更为明

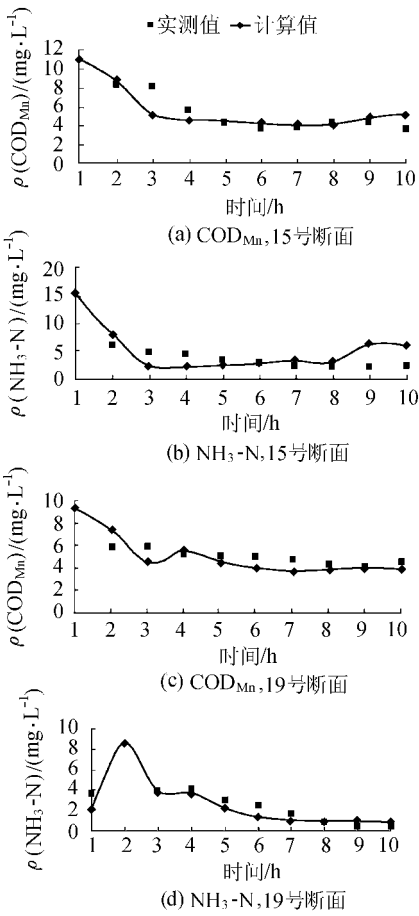


图 4 水质模型计算值和实测值对比

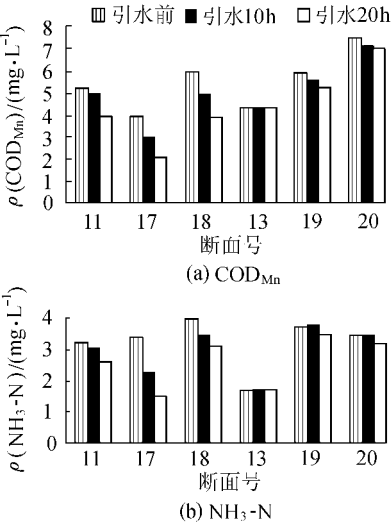


图 5 黄山港泵引前后各断面水质对比

显, 其中靠近黄山港的 17 号断面水质改善最显著, 引水 20 h 后 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的改善程度分别达到 47.5% 和 55.8%; 应天河及以南的 3 个断面的水质在引水 10 h 后只有 19 和 20 号断面的 COD_{Mn} 有一点改善, 引水 20 h 后 19 和 20 号断面的 COD_{Mn} 改善程度分别为 10.2% 和 6.7%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的改善程度分别为 6.7% 和 7.5%, 13 号断面的 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 都没有得到改善。

2.2 通过白屈港从长江引水的工况

单独通过白屈港从长江引水,白屈泵站开启进行泵引,分析对江阴城区水环境的改善情况。其水文计算条件中黄山港的流量边界条件取自引工况下的流量值,其余水文计算条件同原型调水试验,COD_{Mn}和NH₃-N分别取调水试验前实测初始浓度值。通过白屈港从长江泵引,不同引水时间后城区各主要断面水质变化见图6。从图6可以看出:应天河以北3个断面水质在引水10h后都有不同程度的改善,引水20h后改善更为明显,其中靠近白屈港的17号断面水质改善最显著,引水20h后COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度分别达到72.5%和88.2%;应天河及以南的3个断面水质在引水10h后也都有所改善,引水20h后改善更为明显,其中20号断面COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度为52.0%和85.5%,其黄山港泵引工况下水质没有改善的13号断面,其COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度达到34.9%和70.4%。

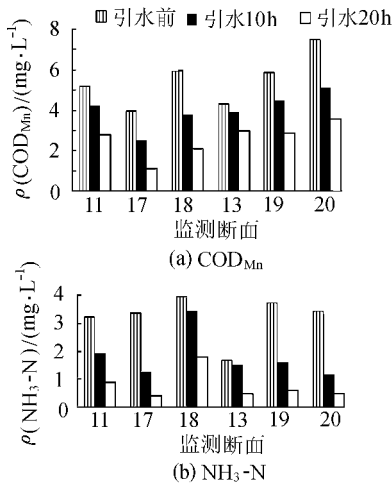


图6 白屈港泵引前后各断面水质对比

3 结论与建议

a. 从调水改善水环境角度考虑,江阴城区应天河以北的水环境可以通过黄山港或白屈港引水改善,但白屈港较黄山港泵站的流量要大得多,综合经济因素,推荐黄山港线路,各主要断面COD_{Mn}和NH₃-N在黄山港泵引10h后平均改善程度为16.6%和16.2%,泵引20h后为35.8%和32.3%;应天河及以南的水环境通过黄山港引水不能得到改善,只能通过白屈港泵引改善,各主要断面的COD_{Mn}和NH₃-N在泵引10h后平均改善程度为21.7%和45.3%,泵引20h后为45.9%和80.0%。

b. 从实验结果可知,江阴河网区通过调水来改善其水环境效果迅速明显。因此,在污染治理短期难以有效改善水质的情况下,江阴城区利用引长江水来缓解区域缺水问题,提高用水水质安全,有其现

实的必要性和紧迫性,通过这一手段不仅实现阶段性的区域水安全保障,同时也给区域水污染的综合防治创造必要的外在环境和赢得必要的时间。

参考文献:

[1] 韩龙喜,张书农,金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型:单元划分法[J]. 水利学报, 1994(2): 52-56.
[2] 卢士强,徐祖信. 平原河网水力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护, 2003(3): 5-9.
[3] 丁玲,逢勇,赵棣华,等. 调水工程对五里湖水环境影响分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(4): 1-4.
[4] 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): 3-5.
[5] LUNG W S, LARSON C E. Water quality modeling of upper Mississippi River and lake Pepin[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(10): 691-699.
[6] DONALD H B. Water quality management through combined simulation-optimization[J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, 115(5): 1011-1024.
[7] BEVEN K J. How far can we go in distributed hydrological modeling?[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2001, 5(1): 1-12.
[8] STEVEN C, RAYMOND C. Numerical methods for engineers[M]. McGraw Hill, 1998: 219-328.

(收稿日期: 2007-06-12 编辑: 高渭文)

(上接第37页)

[6] MDNR (Missouri Department of Natural Resources). Total maximum daily load (TMDL) for James River, Webster, Greene, Christian and Stone Counties, Missouri[EB/OL]. [2004-04-21]. http://www.dnr.state.mo.us/wpscd/wpcp/tmdl/james_river_final_tmdl.pdf.
[7] CLELAND B. TMDL development from the "bottom up"—part II: using duration curves to connect the pieces[EB/OL]. [2002-08-15] <http://www.in.gov/idem/programs/water/tmdl/bottomup.pdf>.
[8] CLELAND B. TMDL development from the "bottom up"—Part III: duration curves and wet-weather assessment. [2003-09-15]. <http://www.tmdls.net/tipstools/docs/TMDLsCleland.pdf>.
[9] US EPA Office of Wetlands, Oceans, & Watersheds. An approach for using load duration curves in the development of TMDLs[EB/OL]. [2008-05-28]. <http://www.epa.gov/owow/tmdl/techsupp.html>.
[10] HARRU X Z, SHAW L Y. Condition critical-defining the 'critical condition' for a total maximum daily load requires great care, especially when addressing nonpoint source pollutant[J]. Water Environment & Technology, 2005, 17(6): 38-42.
[11] US EPA. Total Maximum daily load for fecal coliform-upper broad river Basin[EB/OL]. [2005-09-11]. http://www.scdhec.net/environment/water/tmdl/docs/tmdl_lwrbrd_fc.pdf.
[12] VOLLENWEIDER R A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication[J]. Mem Ist Ital Idrobiol, 1976, 33: 53-83.

(收稿日期: 2007-12-07 编辑: 徐娟)