

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.04.004

临淮岗工程不同蓄水条件下的水质可达性分析

胡开明¹, 逢 勇^{1,2}, 王 华¹, 屈 健¹, 田 威³

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要 建立临淮岗工程淹没区在不同蓄水条件下的二维非稳态 FVS 格式水流水质模型, 基于水量、水质同步实测数据对模型进行率定验证。运用所建模型对研究区域水流水质过程进行数值模拟, 定量分析了研究区域在最不利条件下对临淮岗坝前水质的影响程度。对不同库容条件下在库区北部农业用水时的库区水质浓度场进行计算分析, 结果表明: 当上游边界来水为功能区Ⅲ类, 临淮岗坝前 COD、NH₃-N 和 TP 浓度都能达到 GB 3838—2002 Ⅲ类水质标准; 当边界条件为枯水期水质时, 临淮岗坝前的 NH₃-N 浓度超标, 超标率为 28%, COD 及 TP 均能达标。

关键词 临淮岗; 蓄水条件; 水质可达性; 二维非稳态 FVS 格式水流-水质模型
中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** :1004-693X(2010)04-0013-04

Analysis of water quality in different water storage conditions of Linhuaigang water control project

HU Kai-ming¹, PANG Yong^{1, 2}, WANG Hua¹, QU Jian¹, TIAN Wei³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract : A 2D unsteady hydrodynamic water quality model in the FVS form for a submerged area of Linhuaigang in different capacity conditions was established, and the simultaneous hydrodynamic and water quality data were used to calibrate and verify the model. Using the numerical model, the hydrodynamic and water quality processes of the studied area were simulated, and the impacts on the water quality in front of the Linhuaigang Dam in the most adverse conditions were quantitatively estimated. The results of water quality concentration fields calculation and analysis in different capacity conditions with water intake in the northern reservoir showed the following: when the inflow of the upstream boundary met the level III standard of the water function zone, the chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃⁺-N), and total phosphorus (TP) in front of the Linhuaigang Dam reached the level III standard of Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838—2002); when the boundary condition was the water quality in the dry season, the above-standard rate of NH₃⁺-N was 28%, and both COD and TP reached the standard as well.

Key words : Linhuaigang; storage conditions; water quality reachability; 2D unsteady hydrodynamic-water quality model in FVS form

水质模型是预测评价水环境的重要手段之一。往需要二维动态模型进行分析研究。近几十年来, 在研究工程、工业废水及生活污水的环境影响时, 往国内外许多学者已做了大量研究工作, 提出了各种

基金项目 国家自然科学基金(50579015); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-001-02, 2008ZX07101-002, 2008ZX07101-006, 2009ZX07528-005-03-02)
作者简介 胡开明(1985—), 男, 安徽铜陵人, 博士研究生, 研究方向为水环境保护及水污染防治。E-mail: hukaiming@hhu.edu.cn

方法的水质模型,包括有限差分法、有限单元法、特征线法及有限体积法,等等^[1]。笔者建立了二维非稳态 FVS 格式水流水质模型,对淮河干流中游战略性大型防洪控制工程临淮岗水库不同蓄水条件下的水流水质过程进行了数值模拟,计算了临淮岗不同库容条件下库区北部农业用水时的库区水质浓度场分布,对水质可达性进行了研究。

1 研究区域

临淮岗控制工程地处淮河中游,为黄淮海平原南缘。兴建之初其主要功能定位是洪水控制(即除害)临淮岗洪水控制工程与上游的山谷水库、中游的行蓄洪区、淮北大堤以及茨淮新河、怀洪新河共同构成淮河中游综合防洪体系。工程按 100 年一遇坝前设计洪水位为 28.41 m,滞洪库容为 85.6 亿 m³。工程建成后,可以利用河道蓄水。初步研究河道兴利水位 20.3 m、21.0 m、22.0 m 3 个方案,死水位按 17.0 m 考虑,河道蓄水兴利库容分别为 0.65 亿 m³、0.90 亿 m³ 和 1.42 亿 m³,一般情况下工程在汛期蓄水量可达 1.2 亿~2.0 亿 m³,这部分水资源的综合利用将对该地区的社会经济发展起到非常积极的促进作用。由于该地区水环境问题较为突出,工程综合利用对水环境的影响以及水环境对综合利用的影响都需要进行深入全面的研究,以确保水资源综合利用效益的完成。本文研究区域为临淮岗工程淹没区,上起王家坝,下至临淮岗坝前,面积为 1 469 km²。库区北部有 4 个取水口(扬圩、南照集、润河集、半岗),可进行农业灌溉取水,见图 1。

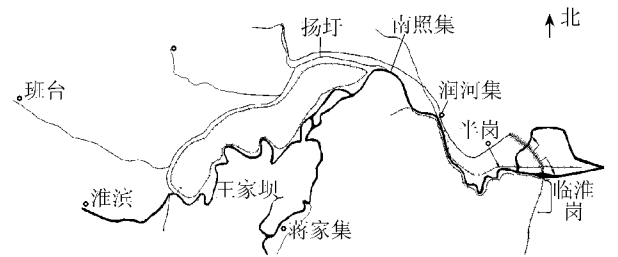


图 1 研究区域示意图

2 二维非稳态 FVS 格式水流-水质模型

2.1 基本方程

二维浅水方程和对流-扩散方程的守恒形式可表达为^[2-3]：

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} &= gh(s_{0x} - s_{fx}) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} &= gh(s_{0y} - s_{fy}) \\ \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x h \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y h \frac{\partial C}{\partial y}\right) - KhC + S \end{aligned}$$

式中： h 为水深； $u、v$ 为 $x、y$ 方向垂线平均水平流速分量； g 为重力加速度； $s_{0x}、s_{0y}$ 分别为 $x、y$ 向的河底底坡； $s_{fx}、s_{fy}$ 为 $x、y$ 向的摩阻底坡； C 为污染物的垂线平均浓度； $D_x、D_y$ 为 $x、y$ 方向污染物扩散系数； K 为污染物降解系数； S 为污染物源汇项。

2.2 数值解法

水量、水质模型可统一写为以下形式^[4-5]：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(f(q))}{\partial x} + \frac{\partial(g(q))}{\partial y} = b(q) \tag{2}$$

式中： q 为守恒物理量； $f(q)、g(q)$ 分别为 $x、y$ 方向通量； $b(q)$ 为源汇项。

定义矩阵 $F(q)=[f(q),g(q)]^T$ ，在任意形状的单元 Ω 上采用有限体积法对式(2)进行积分离散后的表达式为：

$$A \frac{dq}{dt} = - \sum_{j=1}^m \tau(\phi)^{-1} f(\bar{q}) L_j + Ab(q) \tag{3}$$

式中： A 为 Ω 的面积； m 为单元边总数； L_j 为单元第 j 边的长度； f 与 g 具有旋转不变性，满足 $\bar{q} = T(\Phi)q$ ， $T(\Phi)$ 和 $T(\Phi)^{-1}$ 为坐标旋转变换集逆变换矩阵，源汇项 $b(q)=[0,gh(s_{0x}-s_{fx}),gh(s_{0y}-s_{fy}),\nabla(D_i \nabla(hC))+S-KhC]^T$ ， ∇ 为梯度算子； $f(\bar{q})$ 为法向通量，通过求解局部一维黎曼初值问题的外法向数值通量 f_{LR} 得到。

一维黎曼初值问题可表达为^[6-7]：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial f(\bar{q})}{\partial \bar{x}} &= 0 \\ \bar{q} &= \bar{q}_R(\bar{x} > 0, t = 0) \\ \bar{q} &= \bar{q}_L(\bar{x} < 0, t = 0) \end{aligned} \tag{4}$$

FVS(通量向量分裂)格式为 Steger-Warming 于 1979 年提出并被应用于二维浅水方程数值解的格式。其主要方法是应用特征理论并根据特征值的符号将法向数值通量分裂成前向通量和后向通量进行求解,具体解算过程详见参考文献[1]。

2.3 率定验证

运用 2006~2007 年临淮岗水库野外实测水质结果,对临淮岗水流水质模型计算参数进行率定验证。结果表明,计算结果与实测值拟合效果较好,平均相对误差在 10%~20% 之间,所建模型能够较准确地反映临淮岗水流水质浓度的动态变化过程^[8-10]。率定得到纵向及横向扩散系数分别取为 60 m²/s 和 0.6 m²/s,COD、NH₃-N 和 TP 的降解系数分

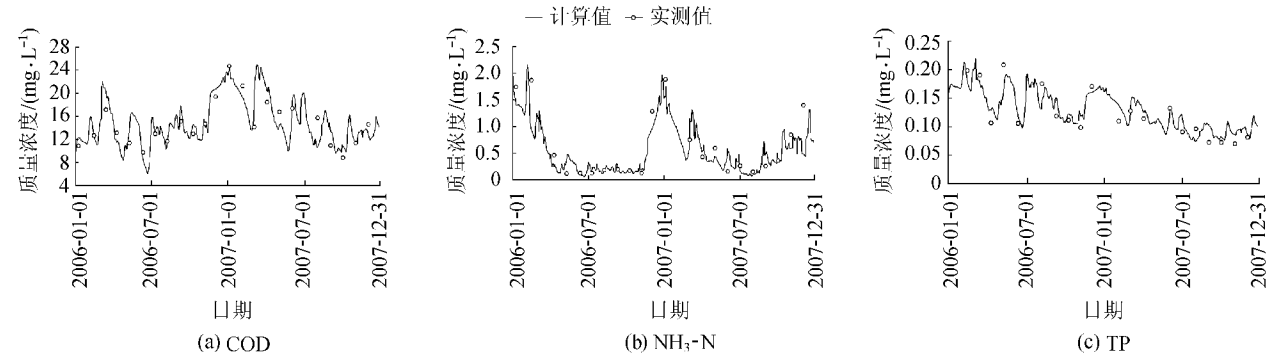


图2 模型率定验证结果

别取 0.1 d^{-1} 、 0.08 d^{-1} 和 0.07 d^{-1} 。图2给出水质参数计算值与实测值的对比结果。

3 临淮岗工程水质可达性研究

3.1 计算条件

资料来源 选用1972—2005年临淮岗上游淮河干流润河集、王家坝以及淮滨、洪河班台、史河蒋家集水文站(具体位置见图1)的流量、水位实测资料进行频率分析。

水文频率分析 临淮岗上游主要水文站入库径流频率分析结果见图3。由图3可知,临淮岗上游枯水期流量在90%保证率下的最小月平均流量值为 $40\text{ m}^3/\text{s}_0$

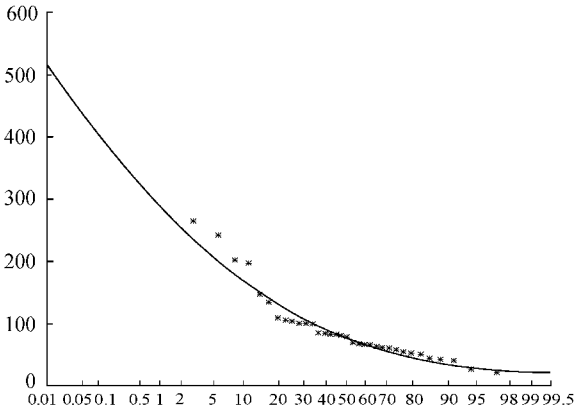


图3 临淮岗上游枯水期流量频率分析

设计库容选取:考虑到临淮岗工程的可能调度情况,选取临淮岗工程在进行水资源利用方面的设计库容为 1.20 亿 m^3 、 1.45 亿 m^3 、 1.97 亿 m^3 ,将这3个库容作为临淮岗工程水资源综合利用时的计算设计库容条件。

3.2 水质可达性分析

a. 计算方案。本研究主要计算现状污染源、不同水文及库容条件下临淮岗水库的水质浓度场分布。水资源综合利用时水库水质浓度场计算方案见表1。

表1 水资源综合利用情况下水质浓度场计算方案

指标	质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	库容条件/ 亿 m^3		
		1.20	1.45	1.97
$\alpha(\text{COD})$	21.28	方案1	方案2	方案3
$\alpha(\text{NH}_3\text{-N})$	1.61			
$\alpha(\text{TP})$	0.20			

b. 计算结果与讨论。在计算初始条件为功能区水质时,临淮岗水库入库流量为90%保证率,库容为 1.20 亿 m^3 、 1.45 亿 m^3 、 1.97 亿 m^3 ,以及上游水质边界为枯水期水质,且库区北部进行农业灌溉用水取水时(最不利条件下)的临淮岗水质浓度场分布见图4~6。

计算结果表明:

a. 当上游来水边界为功能区水质时,临淮岗坝前COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP质量浓度都能达到Ⅲ类水标准;当边界条件为枯水期水质时,临淮岗坝前的

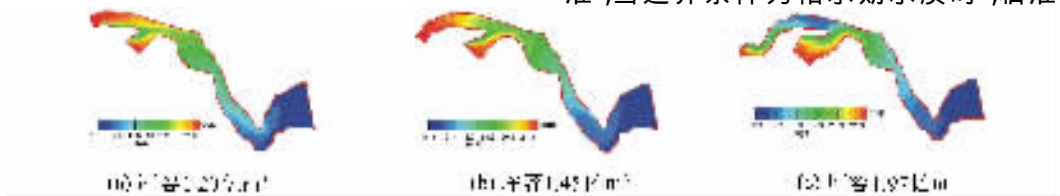


图4 COD 浓度分布

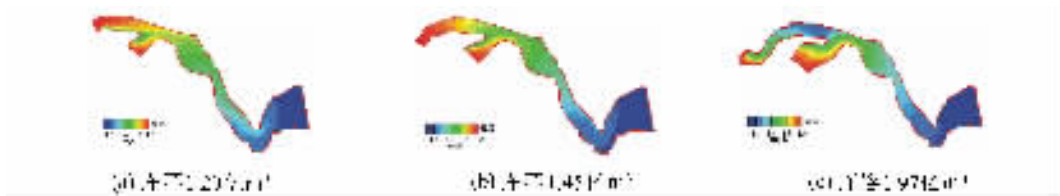


图5 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布

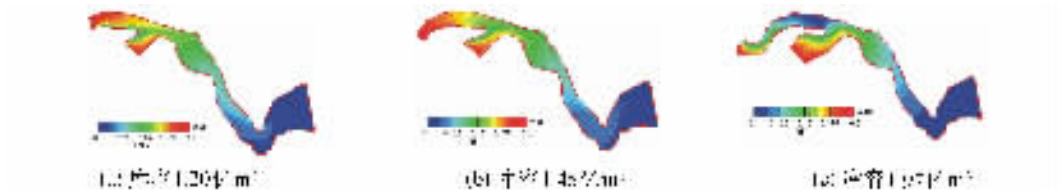


图6 TP 浓度分布

$\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超标,超标率为 28%,COD 及 TP 均能达标。

b. 在计算初始条件为功能区水质、计算上游边界条件为枯水期水质的最不利条件下,库区北部农业灌溉用水取水时的水质可满足农业用水的Ⅴ类水质要求。

c. 根据水质计算结果,库区北部不取水条件下(库容 1.2 亿 m^3 ,计算初始条件为功能区水质,计算边界为枯水期水质)杨圩、南照集、润河集、半岗 4 个取水口 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别为 1.58 mg/L、1.51 mg/L、1.40 mg/L、1.32 mg/L,对应库区北部取水条件下 4 个取水口 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别增加至 1.59 mg/L、1.54 mg/L、1.45 mg/L、1.37 mg/L,库区北部取水条件下取水口 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 较不取水条件下平均约增加了 2.42%。

4 结 论

本文建立了临淮岗工程淹没区二维非稳态 FVS 格式水流-水质模型,以 90% 保证率下的最小月平均流量作为水文设计条件,对水资源综合利用情况下研究区域水流水质进行了模拟计算,从而定量分析了临淮岗不同运行工况下淹没区水质情况。对初始条件为功能区水质,临淮岗水库入库流量为 90% 保证率,库容为 1.20 亿 m^3 、1.45 亿 m^3 、1.97 亿 m^3 ,以及不同上游水质边界条件下的临淮岗水质浓度场分布进行计算,结果表明:

a. 二维非稳态 FVS 格式水流-水质模型具有较高的计算精度,可用于水流水质过程模拟计算。

b. 只要上游来水满足功能区水质要求,临淮岗坝前 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 质量浓度都能达到Ⅲ类水标准。

c. 即使在最不利情况下(计算初始条件为功能区水质、计算上游边界条件为枯水期水质时),库区北部取水口水质也可满足农业用水的Ⅴ类水质要求,对农业灌溉不会造成影响。

d. 从库区整体水质浓度场分布态势来看,库区北部农业灌溉用水取水时的水质浓度场要劣于北部不取水时的水质浓度场,这主要是因为库区北部农业灌溉用水取水时流速增大,污染物容易向下游扩散所致。

综上所述,临淮岗工程建设运行后,只要上游来

水满足功能区水质要求并科学运用、合理调度,使该工程在中小洪水时期,不失时机地适度蓄洪蓄水,既可减少下游行蓄洪区的损失,还可带来不可估量的灌溉、航运、旅游、养殖、发电及生态等综合效益。

参考文献:

- [1] 赵棣华,戚晨,庾维德,等.平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J].水科学进展,2000,11(4):368-374.
- [2] 赵棣华,李来,陆家驹.长江江苏段二维水流-水质模拟[J].水利学报,2003(6):72-77.
- [3] 丁玲,吴建强,逢勇.长江泰州江段水环境模拟及水质可利用性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):24-28.
- [4] ZHAO D H, SHEN H W, LAI J S, et al. Approximate riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1996, 122(12):693-702.
- [5] 丁玲,逢勇,吴建强,等.模拟水质突跃问题的三种二阶高性能格式[J].水利学报,2004(9):50-55.
- [6] 胡四一,谭维炎.无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J].水科学进展,1995,1(1):1-9.
- [7] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS III G Q, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1994, 120(7):863-883.
- [8] 孙卫红,姚国金,逢勇.基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J].水资源保护,2001(2):25-26.
- [9] 徐贵泉,褚君达,吴祖扬,等.感潮河水环境容量数值计算[J].环境科学学报,2000,20(3):263-268.
- [10] 逢勇,唐洪武,王国祥,等.镇江水环境质量改善与生态修复技术研究及综合示范研究报告[R].南京:河海大学,2007.

(收稿日期:2009-04-09 编辑:高渭文)

