

引江济太水源地水质及河势可靠性分析

吴挺峰¹, 潘彩英², 崔广柏³, 陆剑峰⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 太湖流域管理局, 上海 200434;
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 上海勘测设计研究院, 上海 200424)

摘要 为了模拟计算研究区长江沿岸污染带的污染负荷量, 应用有限体积法及通量向量分裂方法(FVS)建立了考虑非点源影响的平面二维水环境数学模型, 同时对水源地河床演变和岸线开发利用情况进行了分析. 结果表明, 研究区岸线污染负荷总量超标, 水源地受岸源污染较重, 水源地近期萎缩较快, 河床处于淤积阶段.

关键词 引江济太 水源地 水质 河势

中图分类号 X143

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2007)04-0369-05

引江济太长江取水口(望虞河口)位于澄通河段下游的狼山沙水道中的福山倒套内. 望虞河口的北京 54 坐标位置为($x = 3\ 518\ 100\text{ m}$, $y = 5\ 78\ 300\text{ m}$) (图 1).

福山倒套右岸为常熟市, 左侧为铁黄沙. 与铁黄沙并列的沙洲有狼山沙和新开沙, 该段长江水道呈多汊形, 自左至右分别为新开沙夹槽、狼山沙东水道、狼山沙西水道和福山倒套, 水域水面最宽为 15 km 左右. 福山倒套呈喇叭形, 沿长江涨潮流方向, 自上而下逐渐萎缩. 涨落潮流是成套的主要动力因素. 福山倒套目前处于淤积期, 河床稳定性较差. 此外, 水源地地处经济发达的苏南地区, 其水质受潮流及沿江污染负荷影响较大.

本文根据有限体积法建模原理^[1-2], 运用通量向量分裂方法(FVS)^[3]建立了考虑非点源及点源影响的二维水环境数学模型, 并借助该模型以及大量的水下地形资料, 对引江济太水源地水质以及河势进行了分析.

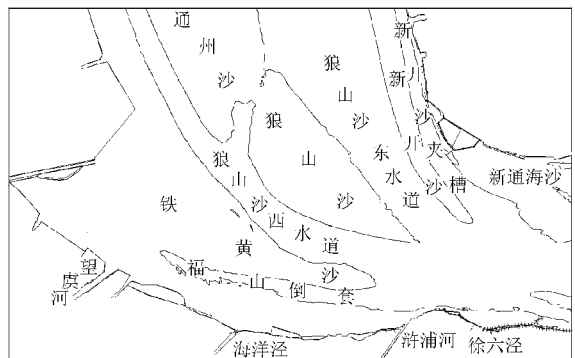


图 1 研究区域

Fig.1 Location of studied area

1 水源地的水环境

依据研究区长江干流段现有水质资料, 采用 5 项主要的污染指标对水源地附近长江干流上游至下游的 3 个断面进行了水质综合指数评价^[4], 得出了望虞河口、常熟三水厂和张家港四水厂 3 个断面的水质综合指数, 分别为 8.13, 3.17 和 1.85, 其中望虞河口断面污染负荷量占参评 3 个断面污染负荷总量的 62%. 按污染物分担率排序, 各种污染物质对研究区长江干流水质的影响 K 大小为: $K_{\text{NH}_3\text{-N}} > K_{\text{高锰酸盐指数}} > K_{\text{BOD}_5} > K_{\text{DO}} > K_{\text{挥发酚}}$. 由此可知, 研究区长江干流主要污染因子为氨氮和高锰酸盐指数, 水源地水质背景值较好, 导致局部水域水质恶化的主要原因是长江沿岸污染负荷排放. 根据评价结果, 水源地汛期水质劣于非汛期水质, 而面源污染是造成水源地水质恶化的主要原因之一^[5-6].

由于长江堤防较高, 陆域上点源和面源污染负荷主要通过各条通江河道汇入长江水体. 本文根据当地 2003 ~ 2004 年的月实测资料, 应用单因子评价方法对研究区主要通江排水河道水质进行了评价. 结果表明, 研究区 25 个支流水质监测断面, 除浒浦闸监测断面为 V 类水之外, 其余断面均为劣 V 类水, 水质较差, 主要

污染因子为氨氮质量浓度,各个断面均超标且超标幅度较大.此外,望虞河各项参评指标汛期质量浓度大于非汛期,即望虞河汛期水质劣于非汛期.由此可知,研究区长江沿岸各条支流所排放的污染物负荷是造成水源地水质恶化的关键.

基于以上分析并结合当地实测结果,综合考虑研究区长江沿岸工业布局及支流河道的污染物排放情况,概化得到 11 个排污口.基于概化排污口二维污染混合带数值模拟结果,对水源地岸线污染负荷达标情况进行分析.

2 二维水环境数学模型

2.1 基本方程

文献[3,7]将二维浅水方程与水质对流-扩散方程进行了耦合,并利用浅水方程的一系列求解方法和数值技巧,对耦合后的方程组进行了数值求解.为了能充分反映研究区点源及面源污染对水源地水质的影响,本文分别将净雨和面污染负荷作为浅水方程和水质方程的源汇项,按浅水方程的求解方法导出了基于 FVS 格式的方程数值解.

以边长为 dx 及 dy 的水平矩形面积上的水柱为控制体,将降雨计入旁侧入流,忽略风和地球自转的影响,水面大气压力近似地取为 0,则得到二维浅水方程和水质-对流扩散方程的矢量表达式

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{q})}{\partial y} = \mathbf{b}(\mathbf{q}) \tag{1}$$

$\mathbf{q} = (h, hu, hv, h\rho_i)^T$ $\mathbf{f}(\mathbf{q}) = (hu, hu^2 + gh^2/2, huv, hu\rho_i)^T$ $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = (hv, huv, hv^2 + gh^2/2, hv\rho_i)^T$
 $\mathbf{b}(\mathbf{q}) = (q_p, gh(S_{0x} - S_{fx}) + q_p u, gh(S_{0y} - S_{fy}) + q_p v, \nabla(D\nabla(h\rho_i)) - \mu_i h\rho_i + \mu_{i-1} h\rho_{i-1} + \mu_{i-2} h\rho_{i-2} + S_i)^T$
式中: h ——水深; $q_x = hu$; u ——纵向(x 方向)流速; $q_y = hv$; v ——横向(y 方向)流速; g ——重力加速度; t ——时间; S_{0x} , S_{fx} —— x 方向的河底坡降和摩阻比降; S_{0y} , S_{fy} —— y 方向的河底坡降和摩阻比降(用曼宁公式估计); q_p ——净雨(其他外应力,如风应力或涡旋应力可作为源汇项加以考虑,但这里忽略不计); ρ_i —— i 种污染物质量浓度; D ——离散系数; ∇ ——拉普拉斯算子; μ_i —— i 种污染物综合降解系数; S_i —— i 种污染物的源汇项; ρ_{i-1} , ρ_{i-2} ——CBOD, NBOD 的质量浓度; μ_{i-1} , μ_{i-2} ——CBOD, NBOD 的氧化系数.

2.2 方程的离散

对于控制体 i ,采用有限体积法离散方程,得到离散后的 FVM 表达式

$$A_i(q_i^{n+1} - q_i^n) = \Delta t \left[- \sum_{j=1}^m T(\varphi)^{-1} f(\bar{q}) s_j^i + b_{*i}(q) \right] \tag{2}$$

式中: A ——控制体 i 的面积; m ——控制体 i 的边总数; s_j ——控制体 i 的第 j 边边长; $T(\varphi)^{-1}$ ——坐标旋转逆变换矩阵; $f(\bar{q})$ ——法向通量,可通过解局部一维黎曼初值问题的外法向数值通量 f_{LR} 得到,本文采用 FVS 格式计算该跨越控制体界面的法向数值通量.

2.3 模型的率定及验证

对水量模型进行了率定,得到的计算区域长江糙率为 0.025,纵向扩散系数 E_x 为 $60.0 \text{ m}^2/\text{s}$,横向扩散系数 E_y 为 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$.水质模型 COD_{Mn} 的降解系数为 $0.2/\text{d}$ [8].

由率定结果可知,水位率定误差小于 0.10 m 的超过 85%,最大误差为 0.15 m.流速率定误差小于 0.15 m/s 的占 78%,仅个别误差超过 0.20 m/s.计算流速过程与实测流速过程的相位基本一致,计算的涨潮时间较实测的短 1 h 左右.验证结果表明,流速误差小于 0.20 m/s 的占 80%、小于 0.25 m/s 的则占 87.5%.水质指标 COD_{Mn} 的质量浓度计算值与实测值的验证结果见表 1.图 2,3 给出了部分水位、流速及水质的率定和验证结果.可见,模型误差较小,曲线拟合较好,潮位涨落规则.

3 现状排污污染混合带计算

根据概化排污口排污现状,运用已建立的二维水

表 1 水质验证结果			
Table 1 Validation of water quality			
验证点	实测 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	计算 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	相对误差/%
姚港	2.7	3.0	10.0
狼山水厂	3.0	3.0	0.0
芦泾港水厂	2.9	3.0	3.3
南通港水厂	3.0	3.0	0.0
望虞河口	2.8	3.2	12.5
常熟三水厂	2.8	2.9	3.4

注: $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 为 COD_{Mn} 的质量浓度.

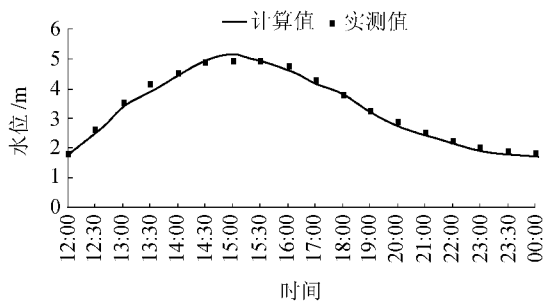


图 2 水山码头水位率定结果

Fig.2 Water level calibration for Shuishan dock

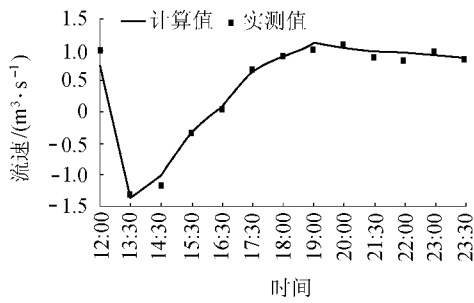


图 3 B1 测点流速率定结果

Fig.3 Flow velocity calibration at B1

环境数学模型,计算得到了研究区长江潮流涨急与落急时的沿岸污染混合带范围.水质模型输入:长江干流, COD_{Mn} 取Ⅱ类水标准,各个概化排污口,根据当地各通江河道引排记录及水质监测值给出年均质量浓度值.

计算区域岸线总长为 63 km,按照污染带长度不得超过岸线总长 8% ~ 10% 的原则,则其安全值范围在 5 048 ~ 6 310 m 之间,而模型计算得到的长江潮流涨急时的岸线二维污染混合带总长为 8 614 m,落急时的岸线二维污染混合带总长为 7 435 m,均超出岸线污染带总长安全范围.这说明计算区域在现状条件下沿岸污染物排放总量超标,该段岸线受污染较为严重.概化排污口在长江潮流落急时所形成的污染混合带小于涨急时所形成的污染混合带,表明落潮时长江沿岸水质优于涨潮时的水质.在所有概化排污口中,距望虞河口较近的福山塘(4.3 km)和崔浦塘(2.8 km)概化排污口污染混合带较长,崔浦塘涨落潮污染带平均长度为 1 483.2 m,福山塘涨落潮污染带平均长度为 950.3 m,排污量较大.

综上所述,计算区域长江岸线污染带总长超过其核定标准,区域工业污染严重、排污量大,且大部分污水通过通江河道汇入长江.因此,必须加强对区域排污的监控力度,才能保证望虞河长江岸线污染物排放总量达标.

4 水源地河床及岸线稳定性分析

4.1 水源地长江岸线分析

望虞河取水口位于长江福山倒套内.福山倒套滩地较宽,航道水深较浅.福山倒套上部(望虞河左侧)长江岸线已全部被占用,主要是氟化学工业园区和国际化工园区,其中芦福沙至崔浦塘口外侧为新形成的滩地,该段淤涨较快.1997 年以来,先后在福山塘、崔浦塘实施了延伸工程,使原有 260 多 hm^2 滩涂水域变为陆地.福山倒套中下段长江岸线位于福山倒套深槽右侧,包括铁黄沙在内,均处于未利用状态.该段岸线末端为常熟市第三水厂取水口所在地,为水源地保护区,沿岸工业企业少,已规划为生态湿地保护区.因此,福山倒套深槽中下段长江岸线保护较好,而上段长江岸线开发利用程度较高,且为化工企业所利用,水源地遭受突发性水污染事故的风险较大.

4.2 水源地河床演变分析

福山倒套在 20 世纪 20 年代常阴沙并入南岸后形成.目前,福山倒套全长约 12 km,现状河势大致分成 3 段:上段为福山港至望虞河口,长约 3 km;中段为望虞河口至海洋泾,长约 5.5 km;下段为海洋泾至深槽口门,长约 3.5 km.福山倒套造套的主要水动力因素为涨落潮流.涨潮时,来自徐六泾节点深槽的水流经下部串沟流入倒套,最后通过上部串沟汇入通州沙西水道(图 1);落潮时,情况相反.因此,福山倒套的上部串沟及下部串沟是维持倒套稳定的关键.

由图 4(a)可知:1998 年福山倒套上部串沟水深较 2003 年为深,铁黄沙头部 1998 年 0 m 等深线包围的面积远小于 2003 年 0 m 等深线所包围的面积,上部串沟淤积速度较快.2003 年,倒套底部 -1 m 等深线后退幅度较大,这与上部串沟淤积有关.上部串沟的淤积,必然导致长江涨落潮时进入倒套水流的流速减小,加速倒套淤积.

由图 4(b)可知:1958 年 -5 m 等深线头部在福山港的上游,1987 年下退至望虞河下游侧,下退 6 km;但在 1987 ~ 2003 年的 16 a 内 -5 m 等深线不再下退,稳定在望虞河口附近.1958 ~ 2001 年,深槽左岸 -5 m 等深线位置非常稳定.深槽右岸 -10 m 等深线位置基本稳定,变化幅度在 200 m 之内.深槽右岸 -5 m 等深线变化

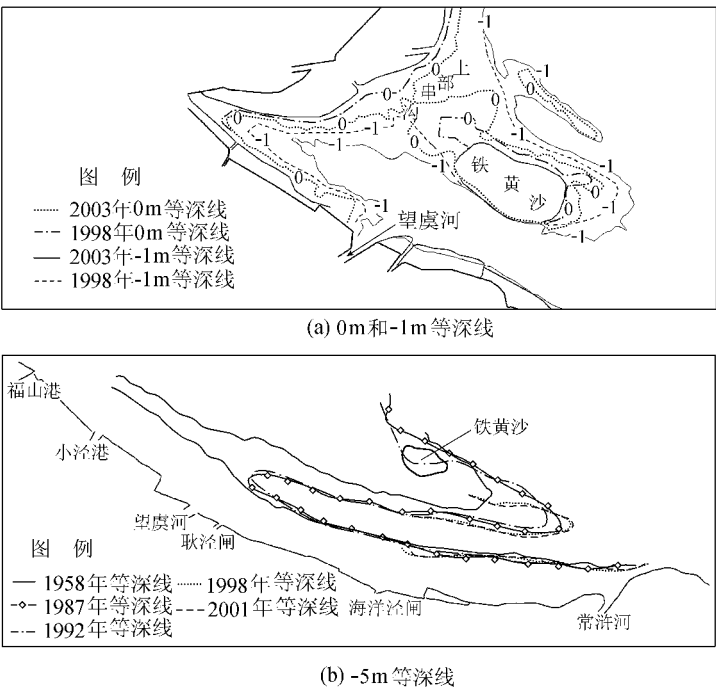


图 4 福山倒套等深线变化趋势

Fig.4 Depth contour for Fushan watercourse

趋势为:1958~1987 年下延 2 km,年均下延 60~70 m;1987~2001 年下延 300 m,年均下延约 20 m,下延趋势放缓.在福山倒套的下段,-5 m 等深线宽度,1958 年为 1 km 左右,1987 年为 800 m 左右,1998~2001 年为 600 m 左右.这说明左岸沙滩在向福山倒套深槽缓慢侵蚀.

为了比较福山倒套内不利条件下流场与现状流场的差别,假设铁黄沙上部串沟河底高程淤积至洪季高潮位以上,倒套与狼山沙西水道之间无水力联系(即不利条件),利用本文所建二维水环境数学模型中的水量模块模拟了倒套内的流场,模型边界条件取 2003 年实测潮位,模拟结果如图 5 所示.图中 A,B,C 分别表示福山倒套深槽底部到口门的上段、中段和下段 3 个断面.

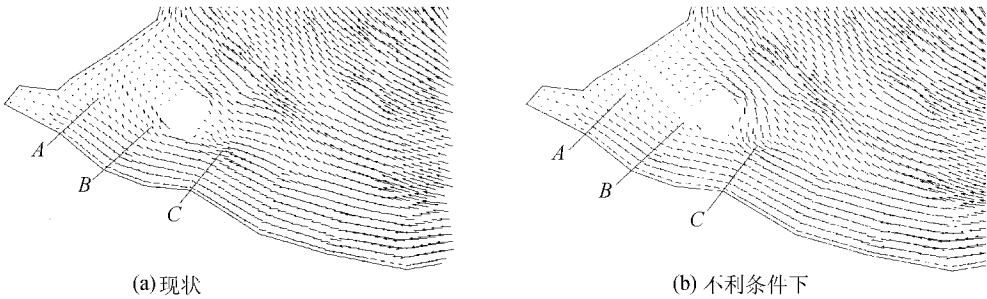


图 5 福山倒套流场

Fig.5 Flow field for Fushan watercourse

水流数值模拟结果表明,福山倒套上部串沟淤积时的流速比现状小,流速减小幅度不超过 0.1 m/s,水位较现状高 0.15 m 左右(图 5).倒套内部流速的减小,将导致泥沙大量沉降,加快福山倒套淤积速度.如果常熟市福山倒套促淤工程实施,将导致福山倒套快速淤积,严重影响望虞河水源地的安全.此外,流速减小,倒套内水体水力停留时间就会增加,从而会降低对污染物的稀释自净能力,进而导致倒套水质恶化.因此,适时疏导上部串沟,禁止在倒套内修建任何促淤工程,是保证引江济太长江水源地安全的关键.

5 结论及建议

望虞河口水质远劣于长江干流本底水质.二维水质模拟结果表明,岸线污染混合带超过规定标准,岸源污染物排放总量超标.因此,必须加强对区域污染排放的监控力度,优化农业管理措施,削减岸源污染负荷排

放总量.福山倒套作为水源地所在地,其底部长江岸线已完全被工业园区所利用,水源地应加强对突发性水污染事故的防范能力.此外,随着倒套底部的不断淤积,滩地不断被围垦,一旦实施促淤成滩工程,将严重降低水源地的使用寿命.因此,应加强对水源地的管理,严禁建设任何形式的围垦或促淤成滩工程,以保证水源地的安全.由于倒套受到长江河势的影响,其地理位置距长江主槽较远,倒套内水体流速滞缓,造成铁黄沙以及上部串沟不断淤积.而水量模拟结果表明,上部串沟对维持倒套河势稳定具有重要的作用.因此,必须适时对倒套上部串沟进行疏导,加强倒套与狼山沙西水道的水力联系,以延缓倒套淤积速度.

参考文献：

[1] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社,1998 63-64.
[2] ANASTASION K. Solution of the two-dimensional shallow water equations using the FVM on unstructured triangular meshes[J]. International Journal of Numeric Methods in Engineering,1997,24(11) 263-293.
[3] 赵棣华,姚琪,蒋艳,等. 通量向量分裂格式的二维水流-水质模拟[J]. 水科学进展,2002,13(6) 701-706.
[4] 薛巧英,刘建明. 水污染综合指数评价方法与应用分析[J]. 环境工程,2004,22(1) 64-69.
[5] 张立争,王南江,李卫东,等. 淮河流域非点源污染综合治理研究[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(4) 65-70.
[6] MATTHEWS R C,BAO Y. The texas method of preliminary instream flow determination [J]. Rivers,1991,2(4) 295-310.
[7] 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.
[8] HUBER W C. Containment transport in surface water[M]. New York: McGraw-Hill,1993 28-29.

Reliability analysis of water quality and river regime for
water source site of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake

WU Ting-feng¹, PAN Cai-ying², CUI Guang-bai³, LU Jian-feng⁴

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China ;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
4. Shanghai Investigation & Research Institute, Shanghai 200424, China)

Abstract A 2D water environment numerical model, considering the non-point source pollution, was set up to simulate pollution loads along the Yangtze River in the studied area by use of the finite volume method and flux vector splitting (FVS) method, and the river bed evolution and river bank exploitation at the water source site were analyzed. The result shows that the total amount of pollutants along the bank is over-standard, the water source site is seriously polluted and shrinks fast, and the river bed is in the silting state.

Key words water diversion from Yangtze River to Taihu Lake ; water source site ; water quality ; river regime