

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.014

郑婷婷, 徐明德, 景胜元, 等. 汾河水库水动力及水质数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 105-113. (ZHENG Ting-ting, XU Ming-de, JING Sheng-yuan, et al. Simulation of hydrodynamics and water quality for Fenhe reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 105-113.)

汾河水库水动力及水质数值模拟

郑婷婷, 徐明德, 景胜元, 李 静, 张学慧

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 汾河水库是万家寨引黄工程的调节水库和山西省最大的地表水饮用水源地, 其上游河段的 COD 和 TN 有超标现象, 故确定库区污染物的输移扩散规律并提出相应的保护措施对保证水库水质安全至关重要。以工程技术资料、DEM 模型、遥感及 GPS 实测信息为基础, 采用 GIS 技术将汾河水库边界和地形进行数字化处理; 通过实测数据进行参数率定与模型验证, 确定汾河水库的水动力模型和水质模型; 将模型进行耦合联用, 以汾河水库的水动力为基础, 选取 COD 和 TN 进行数值模拟, 计算污染物在不同进水浓度时库区污染物超标面积, 以库区污染物超标面积百分比来表征水库受污染程度。模拟结果表明: 风场是影响水库水动力的主要因素; 在静风和主导风力作用下污染物分别沿地形和沿下风向向堤岸扩散; 污染物超标面积百分比与进水污染物浓度限值呈二次函数关系。

关 键 词: 水动力模拟; 水质模拟; 污染控制; 汾河水库

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)03-0105-09

汾河水库为典型的北方干旱地区水库, 由于自然补给小, 污染负荷大, 受水质和水量的双重威胁。且作为山西省最大的地表水饮用水源地, 其水质关系到太原市人民的用水安全。因此, 对库区水动力与水质问题进行模拟, 以认识污染物的输移扩散规律显得十分必要。

水库水动力及水质数值模拟的研究正趋于成熟, 但研究区域大多集中在南方湖泊^[1-3]与大型水库^[4-5], 对北方干旱地区中小型水库研究较少。研究所用数值计算方法^[6-7]从简单的线性计算发展到针对完整方程组的显式、隐式离散计算方法。所用模型由简单的氧平衡模型到复杂的水动力-水质综合模型^[8-10]。本文以汾河水库为载体, 在一定的边界和初始条件下, 建立了汾河水库水动力-水质耦合数值模型, 对其水流动和污染物迁移转化过程进行数值模拟。在分析模拟结果的基础上确定污染物超标面积百分比与进水污染物浓度限值之间的关系。

1 研究区域

1.1 区域概况

汾河水库库区呈峡谷型, 南北长 15 km, 东西宽 5 km, 总面积约 32 km²。水库控制流域包括宁武、静乐、岚县、娄烦 4 个县大部分区域, 总面积 5 268 km²。其设计总容量为 7.22×10⁸ m³, 但由于多年的淤积, 截至 2008 年, 水库库容已减少至 3.6×10⁸ m³。入库河流主要为水库北部的汾河和水库西部的涧河。

1.2 水质现状

(1) 监测点位。考虑汾河水库库区特点及水流特性, 于涧河入库口、汾河入库口、水库坝址处、水库尾

收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2012011033-1)

作者简介: 郑婷婷(1990—), 女, 山西洪洞人, 硕士研究生, 主要从事污染控制系统工程研究。E-mail: 903500673@qq.com

部、水库中部分别设 1#~5# 取样点(见图 1)。本文坐标系采用 1980 年西安坐标,单位为 km。

(2) 监测因子及方法。汾河水库水质评价选取 COD, BOD₅, 氨氮(NH₃-N), 总氮(TN), 总磷(TP)作为监测因子, 监测方法选用《水和废水监测分析方法》^[11]中重铬酸盐法、稀释与接种法、纳氏试剂分光光度法、过硫酸钾氧化紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法。

(3) 监测时间与频率。为全面分析汾河水库枯水期、平水期、丰水期水质情况, 于 2013 年 3 月、5 月、7 月各取样一次进行监测。

(4) 监测结果及评价。汾河水库作为饮用水源地, 执行地表水Ⅲ类水标准。采用单因子法对监测结果进行分析可知: 各点 BOD₅, NH₃-N, TP 均达标; 1# 点各月 COD 均超标, 最大超标倍数为 1.105; 1#, 2#, 5# 点 TN 超标, 最大超标倍数为 3.61。可见汾河水库上游河流已受到污染。各点 COD, TN 监测结果见图 2。

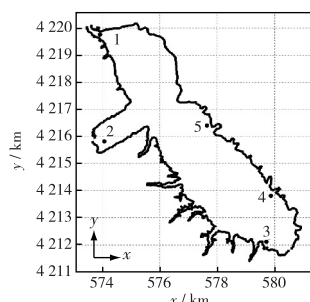


图 1 汾河水库水质监测点位

Fig. 1 Monitoring points of Fenhe reservoir

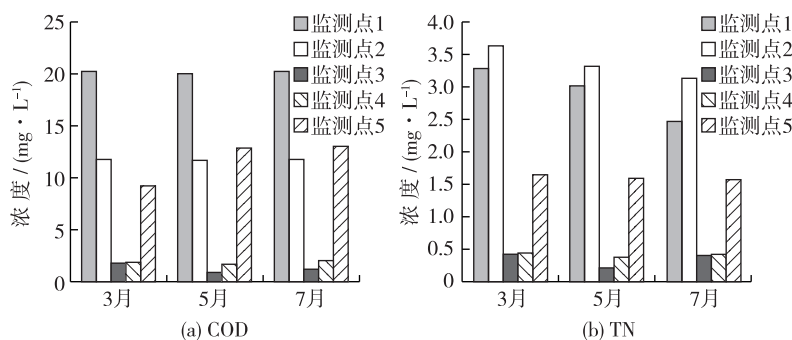


图 2 监测结果

Fig. 2 Monitoring results

2 汾河水库水动力数值模拟研究

2.1 基本原理

汾河水库平均水深相对浅, 浓度、流速、水深等在垂向变化较小, 故水动力模拟研究采用浅水流动的平面二维模型。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \frac{1}{p} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - fv - f_w |W| W_x = 0 \quad (2)$$

Y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \frac{1}{p} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - fu - f_w |W| W_y = 0 \quad (3)$$

式中: ζ 为自由水面水位; H 为水深, $H = h + \zeta$, h 为基准面到河床面的高程; u, v 为 x, y 方向上的速度分量; C 为谢才系数; f 为科氏力系数; f_w 为风阻力系数; μ 为黏性系数; W, W_x, W_y 分别为风速及其在 x, y 方向上的分速度; p 为静压强; t 为时间; g 为重力加速度; $\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{xy}$ 为剪切应力。

本文采用的数值解法为单元中心的有限体积法^[12], 利用 MIKE21FM 非结构网格——三角形网格模型^[13-14]进行求解。

2.2 汾河水库水动力模拟

水库水动力主要与进出水、风力、地形、水库的岸线形态、库内水工构筑物等有关。汾河水库的地形及岸

线形态等属于相对稳定的因素,进出水量和风力成为影响汾河水库水动力的主要因素。

2.2.1 模拟范围 以工程技术资料、DEM模型、遥感及GPS实测信息为基础,采用GIS技术对汾河水库边缘点位及汾河水库底床地形进行数字化处理,确定点位坐标,形成数字化的汾河水库水陆模拟边界及地形,见图3。以汾河水库自然特点为基础,将该库区概化为疏密不等的3160个三角形网格,见图4。

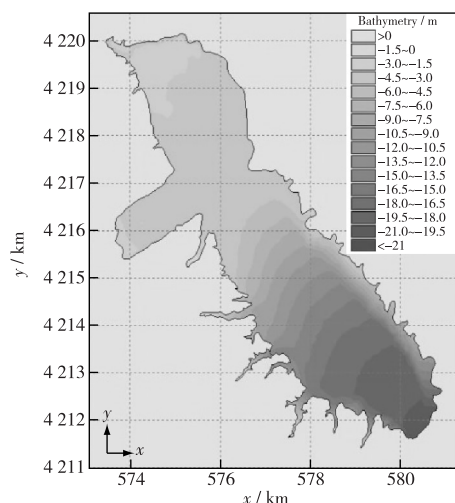


图3 汾河水库模拟边界与地形

Fig. 3 Simulated boundaries and bathymetric map of Fenhe reservoir

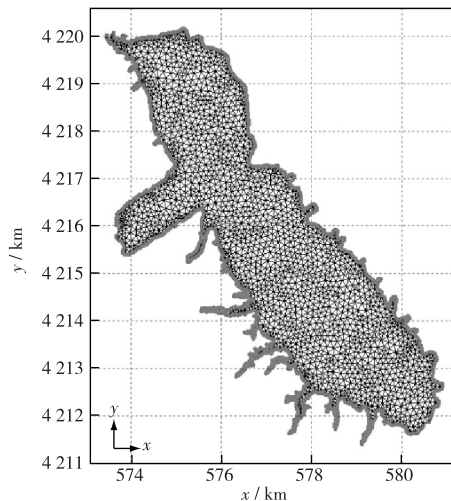


图4 汾河水库网格系统

Fig. 4 Plane grid system map of Fenhe reservoir

2.2.2 定解条件

(1)初始条件。假设模拟区域以静止状态开始,即 $t=0$ 时,流速初始值为零; $u=v=0$;水位初始值为边界水位的平均值,即 $\zeta=1\,126.2\text{ m}$ 。

(2)边界条件。自由表面边界条件主要考虑风对水面的剪切应力;底床边界条件重点考虑底床摩擦应力;闭边界采取岸壁法,法线方向上浓度及速度均为零;开边界分别为汾河水库北部汾河入库口、西部涧河入库口与南部水库坝址出水口;对于移动边界,采用可避免过强浅水效应的“干湿点判别法”,增水水深大于 0.1 m 时视为“湿点”,按水域处理;退水水深小于 0.005 m 时,视为“干点”,按陆域处理。

2.2.3 模拟参数及率定

(1)模拟时间步长。模拟时间为2013-02-01/2013-12-01。模拟最大时间步长根据线性方程显式差分计算的CFL条件决定,取时间步长 $3\,600\text{ s}$ 。

(2)涡黏系数。涡黏系数的计算采用Smagorinsky公式,取 0.4 。

(3)摩擦力。风场摩擦力取 1.255×10^{-3} ;底床摩擦力选取曼宁系数,取 $32\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 。

(4)降雨量与蒸发量。依据汾河水库现有数据资料,生成相应的降雨量和蒸发量时间序列。

(5)源与汇。将汾河水库进出水流作为源汇项,进水口为西部涧河入水口和北部汾河入水口;出水口在汾河水库坝址处。水库全年可分为丰水期(7—8月),平水期(1,5,6,9—12月),枯水期(2—4月)。入库流量丰水期最大 $60\text{ m}^3/\text{s}$,枯水期最小 $4\text{ m}^3/\text{s}$;汾河水库使用功能是为下游灌溉区灌溉及太原市人民生活提供用水,一般3月15日至4月10日,8月15日至9月1日下游需要灌溉,进行开闸放水,出库流量为 $20\sim 40\text{ m}^3/\text{s}$,其余时段水库提供古交矿区和太原市日常生活用水,出库流量约为 $3.07\text{ m}^3/\text{s}$ 。根据各源汇项的水量随时间的变化关系,生成相应的时间序列。

(6)参数率定与模型验证。采用汾河水库的表面水位值进行参数率定和模型验证,模拟输出了2013年2—4月的水库表面水位值时间序列,与《山西省水文月报》中汾河水库实际水位进行对比。2月1日,3月1日,4月1日的入库流量均为 $4\text{ m}^3/\text{s}$;出库流量分别为 $3.07, 3.07$ 和 $40\text{ m}^3/\text{s}$;实际水位分别为 $1\,126.61$,

1 126.75 和 1 123.61 m,模拟水位分别为 1 126.0,1 126.70 和 1 123.60 m。可见,模型模拟出的表面水位值与水位实际测量值绝对误差不超过 0.61,相对误差不超过 0.05%,且水位的升降走势保持一致。因此参数设置合理,模型具有可行性。

2.2.4 汾河水库水动力模拟及结果分析 根据确定的模型进行模拟,并选取监测点位 1#~5#作为特征点,以反映汾河水库流速及流场特点,各特征点位置见图 1。

(1)模拟方案。不考虑风速和风向影响,对水库各期不同进出水工况的水动力进行模拟。通过对汾河水库所在的娄烦地区气象资料的统计分析,月平均风速为 1.2~2.1 m/s,全年静风频率最大(占 29.06%),主导风向为 SW(占 16.81%)。选取枯水期并在入库流量和出库流量相同情况下模拟静风和西南风(风速 1.63 m/s)不同风向对水库水动力的影响,工况设计见表 1。

表 1 工况设置

Tab. 1 Classifications of working conditions for Fenhe reservoir

工况	进 出 水						风 场	
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
入库流量(m ³ /s)	5	5	15~20	5~15	20~25	25~60	4	4
出库流量(m ³ /s)	3.07~40	3.07	3.07~35	3.07	20	3.07	4	4
日期	03-15—04-10	02-01—03-15; 05-11—06-14; 05-04—05-11; 04-10—05-01 09-01—12-01 06-14—07-16			08-15— 09-01	07-16— 08-15	02-01— 11-22	02-01— 11-22

(2)模拟结果分析。主导风向条件下典型流场分布见图 5,可见,不同的进出水工况下库区各特征点流速变化幅度不大;同一工况下各特征点流速变化相差较大,进出水口 1#,2#,3#附近区域水流速度较大,靠近岸边 5#附近区域水流速度居中,水库中南部深水区流速最低。进出水量的改变对环流影响较小,进出水量的改变会影响水库中水流流速,对靠近进出口位置的区域影响较大,对远离进出水口的区域影响很小。

在风的作用下,汾河水库中出现了环流,风向决定了水库中环流方向,风速决定了风对汾河水库流场的影响程度。风对水流的作用比较明显,西南风条件下比静风条件下流速要大。同一风向对不同区域的水流作用也不同,水面宽广区(1#,3#,5#所在区)可形成大区域的风生环流,流速较大,而在狭窄区(2#,4#所在区)环流较弱,流速较小。

因此,风场是影响汾河水库水动力的主要因素。

3 汾河水库水质模拟

3.1 模型建立

浅水水流中污染物在垂向混合均匀,污染物浓度只在水平面上变化,故水质模型选取二维水质模型,模型如下:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HuC)}{\partial x} + \frac{\partial(HvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(HD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(HD_y \frac{\partial C}{\partial y}) - Hk_p C + HC_s S \tag{4}$$

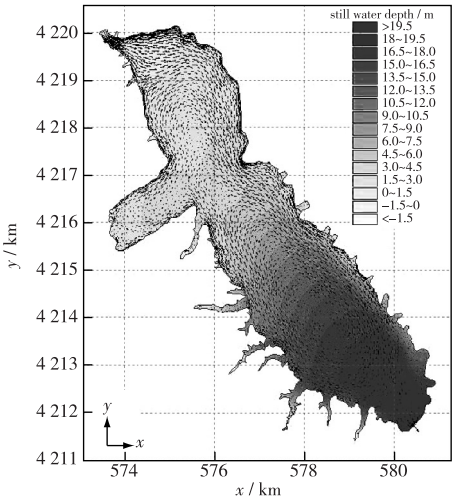


图 5 西南风下典型流场分布

Fig. 5 Typical flow field distribution under southwest wind conditions

式中: C 为垂向平均浓度 (mg/L); H 为水深 (m); D_x, D_y 分别为 x, y 方向的扩散系数; k_p 为呈线性的衰减率; C_s 为源浓度值 (mg/L); S 为点源排放量。

水质模拟中 COD 用于模拟有机质含量, 降解符合一级动力学反应规律, 即

$$C_t = C_0 \exp(-k_c t) \quad (5)$$

式中: t 为反应时间; C_t 为 t 时刻水体污染物浓度 (mg/L); C_0 为初始时刻水体中污染物浓度 (mg/L); k_c 为污染物的降解系数 (d^{-1})。

在库水质模型中, 考虑以下 5 种形态的氮, 即有机氮 N_1 , 氨氮 N_2 , 亚硝酸盐氮 N_3 , 硝酸盐氮 N_4 , 沉淀态氮 N_5 :

$$\frac{dN_1}{dt} = -J_4 N_1 + \rho_A C_A A_{NP} + \rho_Z Z A_{NE} + \rho_Z Z A_{NE} - J_6 N_1 \quad (6)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -J_1 N_2 - \mu C_A A_{NP} \frac{N_2}{N_2 + N_4} + J_4 N_1 + J_5 N_5 \quad (7)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = J_1 N_2 - J_2 N_3 \quad (8)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = J_2 N_3 - \mu C_A A_{NP} \frac{N_4}{N_2 + N_4} - J_3 N_4 \quad (9)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = -J_4 N_5 + J_6 N_1 \quad (10)$$

式中: J_1 为氨氮硝化速率; J_2 为亚硝酸盐氮硝化速率; J_3 为硝酸盐氮反硝化速率; J_4 为沉淀态氮释放速率; J_5 为有机氮分解速率; J_6 为底泥对有机氮的吸收速率; ρ_A 为藻类的比死亡率; μ 为藻类的比增长率; C_A 为藻类生物量 (mg/L); A_{NP} 为藻类中氮的含量 (mg/mg); A_{NE} 为浮游动物中氮的含量 (mg/mg)。

本研究将水质模型与水动力模型耦合得到汾河水库污染物输移扩散规律。

3.1.1 定解条件

(1) 初始条件。设 $t=0$ 时, $C=C_0$, 采用 2013 年 3 月监测数据, 其他条件同水动力计算。

(2) 边界条件。闭边界法线方向上流速与浓度均为零; 设模拟区外无污染源, 开边界上只有沿其法向的输运。

3.1.2 模型参数

(1) 扩散系数。扩散系数与各个网格的速度分量成线性比例关系, 确定各方向的扩散系数取值的上下限。

(2) 降解系数。水质模拟主要降解参数: 化学需氧量降解系数 $0.25 d^{-1}$, 硝态氮降解系数 $0.05 d^{-1}$, 氨氮降解系数 $2.5 d^{-1}$ 。

(3) 参数率定。选取 3 月份 1# 与 5# 的 COD, TN 浓度实测值作为率定与验证资料, 经过模型参数调整, 确定最终计算参数。1# 点位 TN 浓度的实测值和模拟值分别为 3.29 和 3.46 mg/L, 相对误差为 5.16%; COD 浓度的实测值和模拟值分别为 20.3 和 18.8 mg/L, 相对误差为 7.39%; 5# 点位 TN 浓度的实测值和模拟值分别为 1.64 和 1.69 mg/L, 相对误差为 3.05%; 5# 点位 COD 浓度的实测值和模拟值分别为 9.3 和 9.17 mg/L, 相对误差为 1.4%。以 COD 为例, 模拟值接近实测值, 拟合程度较好。最大绝对值偏差为 1.5 mg/L, 相对误差为 7.39%, 因此, 应用本文所构建的水动力-水质耦合模型对汾河水库的水质模拟是可行的。

3.2 汾河水库物质输移扩散数值模拟

3.2.1 模拟时间范围及情景设置 模型范围及网格系统与二维水动力模型一致, 模拟时间为 2013 年 3 月 1 日至 11 月 22 日。影响汾河水库水动力的主要因素为风力, 所以选择静风及西南风 (风速取 1.63 m/s) 两种不同情景进行汾河水库水质模拟分析。

3.2.2 模拟结果及分析

(1) 模拟结果。本文模拟各情景下水库 COD 和 TN 总氮在不同时间段的浓度分布情况。静风条件下各污染物模拟末期分布图见图 6, 西南风条件下各污染物模拟末期分布见图 7。

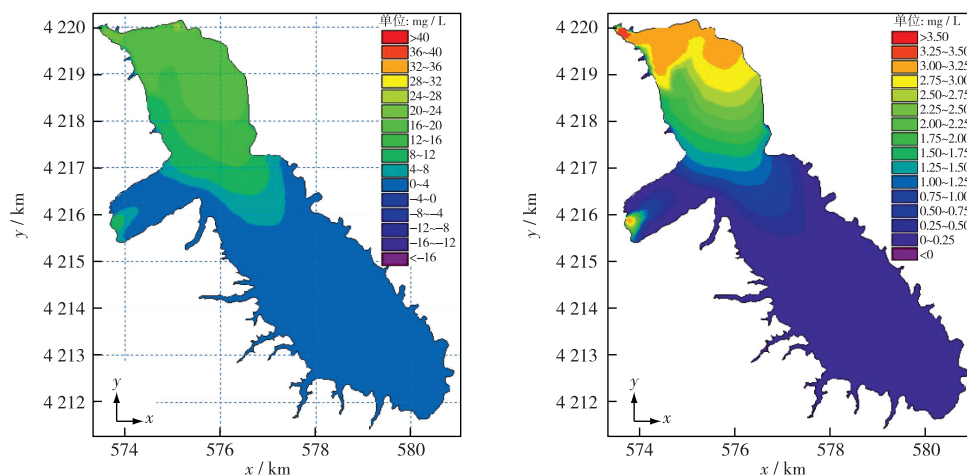


图 6 静风条件下 COD 和 TN 浓度分布

Fig. 6 COD and TN concentration distribution of pollution influx in Fenhe reservoir under calm conditions

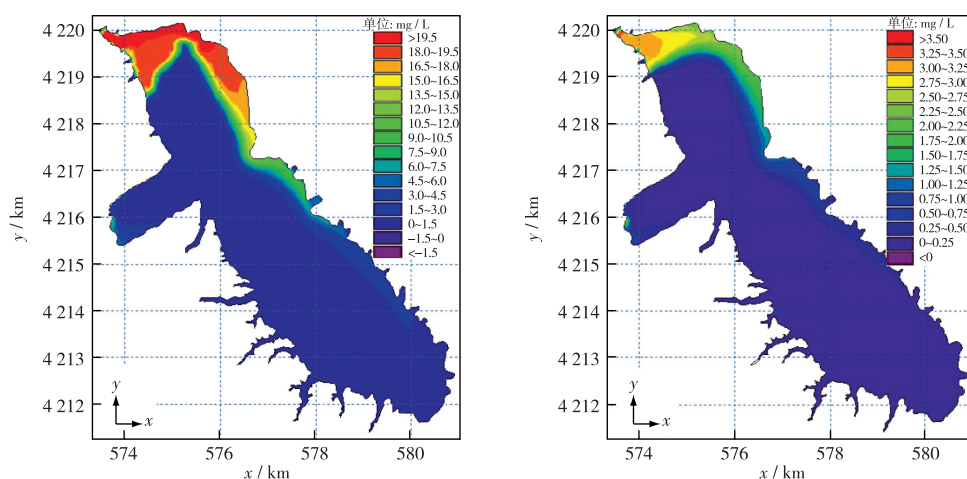


图 7 西南风条件下 COD 和 TN 浓度分布

Fig. 7 COD and TN concentration distribution of pollution influx in Fenhe reservoir under southwest wind conditions

(2) 结果分析。静风下污染物从入口由西北向东南方向扩散。西南风下污染物从东北岸扩散至水库大坝处, 由于大坝阻流, 又沿着西南岸向西北方向扩散, 在大坝中心处形成环流, 在西侧与涧河入库口来水混合时形成小环流, 形成死水区, 可造成局部污染物浓度过高的现象。

不同风向下, 各特征点污染物浓度与距其污染扩散到该点的时间成反比; 而污染物扩散时间与入库流量和流场分布有关。流量较大时, 流速快, 扩散到特征点的时间较短; 静风条件下污染物扩散到特征点的时间顺序是 1-2-5-4-3, 西南风条件下污染物扩散时间顺序是 1-5-2-4-3。同一风向下, 各特征点的 COD 和 TN 浓度变化趋势较为相似, 如模拟开始时, 1#测点的 COD 和 TN 浓度均先降后升, 并且随着入库流量的变化而发生波动。可得 5#特征点 COD 和 TN 的水质变化时间序列, 西南风条件下变化见图 8。

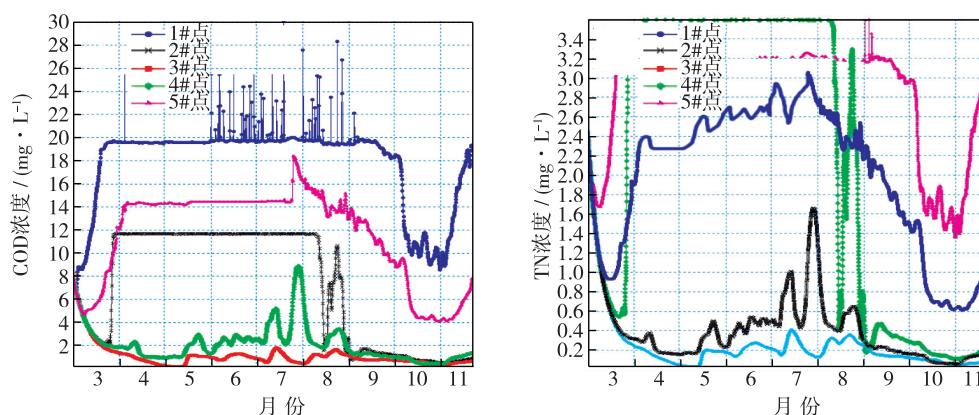
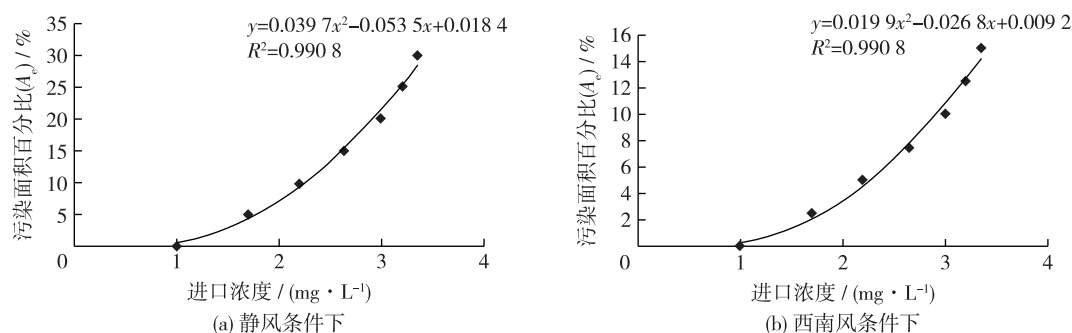


图8 各特征点 COD 和 TN 浓度随时间变化

Fig. 8 Variation in COD /TN concentration with time at different control points in the reservoir

库区污染物超标面积百分比(A_e)是指超标面积占整个水库水面面积的比例,用来表征水库受污染程度。汾河入库 COD 浓度 20.3 mg/L, 涧河进水 COD 浓度 11.7 mg/L, 静风模拟末期 $A_{e(\text{COD})} = 1.4\%$, 西南风模拟末期 $A_{e(\text{COD})} = 0.96\%$; 汾河入库 TN 浓度 2.29 mg/L, 涧河 TN 浓度 3.68 mg/L, 静风模拟末期 $A_{e(\text{TN})} = 27.6\%$, 西南风模拟末期 $A_{e(\text{TN})} = 13.48\%$ 。以此水质模型为基础, 对汾河进水 TN 不同浓度下库区污染物浓度分布分别进行模拟(涧河 TN 进水浓度按常量 1 mg/L 处理), 得到静风、西南风条件下各进水浓度下库区内的 TN 超标面积百分比, 将离散的计算结果进行拟合, 得到进水浓度与污染物超标面积百分比的相应曲线(见图 9), 将此方法应用在水质控制管理上, 能大大提高水质管理效率。该方法同样适用于其他水体的其他污染物超标面积的控制。

图9 静风与西南风条件下进口 TN 浓度与 A_e 对应曲线Fig. 9 Comparison between correspondence curves of influx TN concentrations and A_e under calm and southwest wind conditions

3.3 污染控制

(1) 外部输入的控制。图 9 可作为水质管理的依据, 通过污染物超标面积百分比确定进水浓度限值后, 为治理汾河干流、涧河干流提供目标值。

(2) 系统动力学改变。汾河水库中南部的深水区存在死水区, 易造成水质恶化。汾河水库的浅水区在风应力的作用下, 水流流速较大, 易冲刷水库库体, 携带泥沙及营养物质进入汾河水库。泥沙沉积使得汾河水库库容减少, 洪水的调蓄功能降低, 营养物质的进入会影响汾河水库的水质, 建议在汾河水库周边修建护坡, 以避免水体冲刷水库库体所造成的不利影响。

(3) 减少内源污染。疏浚库底底泥对库区修复工程来说非常有用, 但疏浚同时需要控制内源的汇入。

4 结 语

(1)汾河水库水动力模拟结果表明风是水库水流动的主要推动力,静风条件下,自西北向西南方向流动,西南风条件下,水从东北岸流至水库大坝处,由于大坝阻流,又沿着西南岸向西北方向,在汾河干流入库区域,涧河干流入库区域,水库中间区域形成环流。

(2)在静风和主导风力作用下 COD, TN 分别呈现沿地形和沿下风向堤岸扩散的输移扩散规律;汾河水库中南部的深水区存在死水区,易造成水质恶化。

(3)提出由污染物超标面积百分比来反推进水污染物浓度的库区水质控制方法,通过控制进水污染物浓度,改善水库水动力学以及减少水库内源等水污染控制措施来解决汾河水库水质问题。

参 考 文 献:

- [1] 许旭峰,刘青泉.太湖风生流特征的数值模拟研究[J].水动力学研究与进展,2009,24(4):512-518.(XU Xu-feng, LIU Qing-quan. Numerical study on the characteristics of wind-induced current in Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(4): 512-518. (in Chinese))
- [2] 陈毓龄,张宏保,陈捷.玄武湖水体富营养化水质预测模型的研究[J].东南大学学报,1992,22(2):28-32.(CHEN Yu-ling, ZHANG Hong-bao, CHEN Jie. A simulation model for eutrophication prediction of water quality in Xuanwu Lake[J]. Journal of Southeast University, 1992, 22(2): 28-32. (in Chinese))
- [3] 吴炳方,沈良标,朱光熙.东洞庭湖湖流及风力影响分析[J].地理学报,1996,51(1):51-58.(WU Bing-fang, SHEN Liang-biao, ZHU Guang-xi. Impact assessment of wind on lake's flow pagation in east Dongting Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(1): 51-58. (in Chinese))
- [4] 李哲,郭劲松,方芳,等.三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2012,35(5):143-150.(LI Zhe, GUO Jin-song, FANG Fang, et al. 1 D hydrodynamic model for Pengxi (Xiaojiang) River backwater area in the Three Gores reservoir[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2012, 35(5): 143-150. (in Chinese))
- [5] 郑海军,楼淑君.杭州市闲林水库水质模拟研究[J].浙江水利水电专科学校学报,2012,24(2):55-59.(ZHENG Hai-jun, LOU Shu-jun. Water quality simulation research of Xianlin reservoir[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2012, 24(2): 55-59. (in Chinese))
- [6] 李浩麟,易家豪.河口浅水方程的隐式和显式有限元解法[J].水利水运科学研究,1983(10):15-26.(LI Hao-lin, YI Jia-hao. Implicit and explicit finite element methods of shallow water equations in estuaries[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1983(10): 15-26. (in Chinese))
- [7] FRANCISCO J R. A three-dimensional hydrodynamic and transport model for lake environments[D]. Davis: University of California, 2001.
- [8] 高庆先,胡铭,杨新兴,等.湖泊流体动力学模型及其应用[J].环境科学研究,2001,14(6):29-32.(GAO Qing-xian, HU Ming, YANG Xin-xing, et al. Hydrodynamic model for lakes and its application[J]. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(6): 29-32. (in Chinese))
- [9] 黄玉新,张宁川.二、三维耦合水动力模型研究 I:模型的建立[J].水道港口,2013,34(4):304-310.(HUANG Yu-xin, ZHANG Ning-chuan. Research on a coupled 2D, 3D hydrodynamic model I: model establishment[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(4): 304-310. (in Chinese))
- [10] 徐祖信,廖振良.水质数学模型研究的发展阶段与空间层次[J].上海环境科学,2003,22(2):79-85.(XU Zu-xin, LIAO Zhen-liang. Developing stages and spatial levels of water quality modeling study[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(2): 79-85. (in Chinese))
- [11] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.(The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [12] 谭维炎.计算浅水动力学:有限体积法的应用[M].北京:清华大学出版社,1998.(TAN Wei-yan. Computational

- hydrodynamics of shallow water: finite volume method application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese))
- [13] 徐祖信, 尹海龙. 黄浦江二维有限元计算网格生成技术[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003, 18(3): 326-331. (XU Zu-xin, YIN Hai-long. Development of two-dimensional water quality model for Huangpu River's mainstream[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2003, 18(3): 326-331. (in Chinese))
- [14] 王长海, 李蓓. 二维不规则三角形网格的潮流数学模型[J]. 水道港口, 1988(2): 10-15. (WANG Chang-hai, LI Bei. Two dimensional tidal current mathematical model with irregular triangle grids[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1988(2): 10-15. (in Chinese))

Simulation of hydrodynamics and water quality for Fenhe reservoir

ZHENG Ting-ting, XU Ming-de, JING Sheng-yuan, LI Jing, ZHANG Xue-hui

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The Fenhe reservoir is the regulating reservoir of the Yellow River diversion project and the biggest surface drinking water sources project of Shanxi Province, and the COD (chemical oxygen demand) and TN (total nitrogen) in the upper reaches of the reservoir are beyond the standards. For ensuring the water quality safety of the reservoir, it's crucial to determine the law of pollutants' transport and diffusion and put forward relative protection measures. Based on the engineering data, the DEM model and the measured information obtained from the remote sensing (RS) and global position system (GPS), the digital processing of the boundary and terrain for Fenhe reservoir by geographic information system (GIS) has been finished; using the measured data to calibrate parameters and verify the model, the hydrodynamic model and a water quality model for Fenhe reservoir have been developed; and on the basis of the hydrodynamics of Fenhe reservoir, we couple the two models, select the characteristic values of COD and TN to numerically simulate and calculate the reservoir's area where the pollutants are over standards under different pollution concentrations during inflowing. The percentage of the area (A_e) where pollutants are over standards has been taken as a mark of the pollution degrees in the reservoir. It is found that the wind is the main factor influencing the reservoir's hydrodynamics. Under no-wind conditions, the COD and TN spread along the terrain; under wind conditions, the pollutants spread to the bank along the wind direction. There exists a quadratic function relationship between the A_e and the pollution concentration of influent. The research results will provide an important support for the water quality management of the reservoir. Through the control of the water pollutant concentration, the improvement of the reservoir dynamics and the reduction of the endogenous will be favorable to solving the problems of the water quality in the Fenhe reservoir.

Key words: hydrodynamics simulation; water quality simulation; pollution control; Fenhe reservoir