

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.007

库区面源氮、磷污染对于桥水库水质的影响

葛宁¹, 冯平¹, 孙冬梅¹, 张彬², 李发文¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津市水文水资源勘测管理中心, 天津 300061)

摘要: 于桥水库作为天津市唯一的饮用水供水水源地, 研究于桥水库周边面源污染对其水质的影响, 有助于改善水库水环境, 保障供水质量。在分析水库周边面源污染负荷的基础上, 运用基于二维浅水方程和对流扩散方程组构建的于桥水库二维水动力和水质耦合模拟模型对 2008 年雨季(6月-9月)水库 TN、TP 浓度的空间分布及随时间变化特征进行了模拟分析。结果表明, 受果河入库流量和汛期主导风的影响, 总体上 TN、TP 随水流主要沿水库南岸和西北岸向坝前方向扩散, 并在库区东形成顺时针大环流和在库区西形成逆时针环流。受环流影响, 库心水质受污染影响较小。TP 在空间上呈现出东高西低的趋势, TP 平均浓度最高值出现在 8 月份为 1.56 mg/L; 刘相营及五百户镇是 TN 的主要入库口, TN 平均浓度最高值出现在 9 月份为 3.74 mg/L。

关键词: 总氮; 总磷; 时空分布; 数值模拟; 于桥水库

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0427-07

Effects of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus on water quality of the Yuqiao Reservoir

GE Ning¹, FENG Ping¹, SUN Dong mei¹, ZHANG Bin², LI Fa wen¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Survey and Management Center of Hydrology and Water Resources, Tianjin 300061, China)

Abstract: Yuqiao Reservoir is the unique water source for the water supply of Tianjin City. It's important to study the effects of the non-point pollution around Yuqiao Reservoir on the water quality in order to improve the water environment and guarantee quality of water supply. Based on the analysis of non-point pollution load, a coupled two-dimensional hydrodynamic and pollutant transport model was developed using the two-dimensional shallow water and pollutant transport equations. The two-dimensional model was used to simulate the temporal and spatial distribution characteristics of TN and TP in the reservoir water from June to September in 2008. The simulation results showed that (1) under the effects of inflow of Guo River and dominant wind direction in the wet period, TN and TP concentrations diffuse towards the dam site along the south and northwest coastlines, and form the clockwise circumfluence in the east area and the counterclockwise circumfluence in the west area of the reservoir; (2) due to circulation, the water quality in the reservoir center is less affected by the pollution; (3) TP concentration in the east is higher than that in the west of the reservoir, and the average concentration of TP in August is the highest (1.56 mg/L); and (4) Liuxiangying and Wubaihu are the main pollution ports of TN, and the average concentration of the TN in September is the highest (3.74 mg/L).

Key words: total nitrogen; total phosphorus; spatial and temporal distribution; numerical simulation; Yuqiao Reservoir

近年来, 农业面源污染对饮用水供水水源地水质影响日益凸显, 特别是水体污染严重的流域, 农田、农村畜禽养殖和城乡结合部地带的生活排污造成了流域水体氮、磷富营养化, 其贡献大大超过来自城市地区的生活点源污染和工业点源污染^[1]。面源污染对水库水质的影响总是伴随着降雨径流的产生, 对水库水质的响应是一个动态过程^[5], 因此运用

数值模拟对水库这一过程进行分析可以为水库水环境的管理以及面源污染的预报和治理提供一定的依据。

目前国内已有部分学者研究了面源污染入库对水库水质的影响情况。唐天均等^[6]于 EFDC 模型构建了深圳水库三维水动力和富营养化定量模拟模型, 确认了入库营养盐负荷高, 存在较大的富营养化风险; 孙杨等^[9]利用建立的三维

收稿日期: 2014-10-11 修回日期: 2015-04-15 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1517.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179117); 天津市应用基础及前沿技术研究计划青年基金项目(12JCQNJC05200)

作者简介: 葛宁(1987-), 男, 山东德州人, 主要从事水文学水资源与水环境方面研究。E-mail: gening_q@163.com

水质模型模拟了典型暴雨农业面源总磷入库对大伙房水库水质的影响;阐明了总磷在水库中的迁移分布情况。卢士强等⁷¹利用平面三维水动力、水质耦合模型对长江口区域排污对水源地水质影响过程做了模拟分析,结果显示污染对青草沙水源地和陈行水源地的水质有贡献。

于桥水库作为天津市最重要的供水水源地,其水质好坏严重影响下游城市供水安全及城市经济发展。由于近来水库上游流域及库区周边经济迅猛发展,污染负荷相应骤增,对水库水质威胁日益严重。为了保障下游供水安全及水库安全运行,本文以天津于桥水库为背景,通过建立并运用水动力水质二维耦合模型,对雨季面源污染入库后对水库水质的影响,以及污染的时空分布规律和随时间变化的特征进行了模拟分析。

1 研究区域概况

于桥水库位于天津市北部蓟县城东 4 km 的州河上,坝址地理坐标位于 117°25'E, 40°02'N。库区位于燕山山脉边缘,是一座山谷与平原过渡盆地水库,地势自东北向西南倾斜,海拔高程在 10~1 200 m 之间,水库以上控制流域面积 2 060 km²,见图 1。水库最大回水长东西约为 30 km,南北宽 8 km,最大淹没面积 250 km²(正常蓄水位时淹没面积 86.82 km²),沙河、黎河和淋河为流域内三大主要汇水河流。于桥水库流域属于暖温带半湿润大陆性季风型气候区。蓟县的多年平均气温为 11.5℃,气温年较差可达 31.5℃;多年平均年降水量为 750 mm,多年平均年蒸发量为 1 000 mm,北部山区为 900 mm;年平均无霜期天数 194 d。

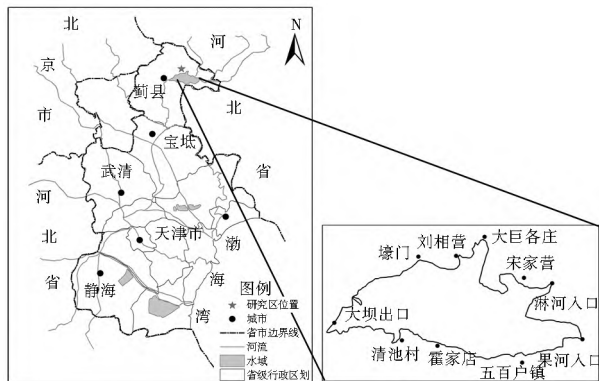


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Location of research area

于桥水库流域内农田、林地、草地覆盖率分别为 39%、35%、19%,农田主要种植作物为小麦、玉米,施肥主要以有机肥和尿素为主。库区总人口 13.8 万人,村落 160 余个,农家乐旅游近年愈渐繁荣。

水库夏季主要接纳本流域的径流汇水,其它季节则主要接纳来自大黑汀水库的滦河水。于桥水库是天津市唯一的水源地,于桥水库水质直接影响着天津市供水水质的好坏,也是关系天津人民身心健康、社会稳定和国民经济发展的重大事。

2 氮、磷污染源分析

于桥水库的氮、磷输入主要来源于上游沙河、淋河、黎河汇水,引滦水,库区农业面源污染以及库区周边村镇生活、畜

禽养殖污水等,农业面源污染主要随降雨径流流失¹⁸⁻²¹。根据 2008 年天津市对于桥水库库区的调查结果(表 1),于桥水库总氮年均入库量达 2 014.6 t,其中库区周边农田肥料总氮入库量 136.5 t,占总量的 6.8%;库区居民粪污及禽畜养殖粪污总氮入库量 54.7 t,占 2.7%;来自上游引水总氮入库量 873.8 t,占 43.4%,库区周边饭店、农家乐产生的餐饮污水中总氮入库量 173.1 t,占 8.6%;库区周边居民生活污水总氮入库量 94.5 t,占 4.7%;其他来源,包括流域中游产氮量和库区周边林地、草地的产氮量有 682.1 t,占 33.9%。由此可见,除去上游引滦水中总氮污染的贡献,库区周边面源污染为于桥水库中总氮污染的重要来源,严重影响非引水期水库水质状况。

调查结果还表明,于桥水库总磷年均入库量达 152.8 t,其中库区周边农田肥料总磷入库量 13.3 t,占总量的 8.7%;库区居民粪污及禽畜养殖粪污总磷入库量 37.96 t,占 24.6%;上游引水总磷入库量 26.7 t,占 17.8%,库区周边餐饮污水总磷入库量 22.3 t,占 14.6%;库区周边居民生活污水总磷入库量 12.3 t,占 8.1%;其他来源总磷入库量 40.6 t,占 26.6%。由此可见,农田径流、畜禽养殖、农村生活、鱼塘和库周餐馆是于桥水库周边面源氮、磷污染主要来源。

表 1 于桥水库氮、磷污染负荷比例

Tab. 1 Nitrogen and phosphorus pollution load ratios in the Yuqiao Reservoir

污染来源	总氮/t	污染负荷比例(%)	总磷/t	污染负荷比例(%)
库区周边农田	136.5	6.8	13.3	8.7
居民粪污及禽畜养殖	54.7	2.7	37.6	24.6
上游引水	873.8	43.4	26.7	17.5
库区周边餐饮污水	173.1	8.6	22.3	14.6
库区周边居民生活污水	94.5	4.7	12.3	8.1
其他	682.1	33.9	40.6	26.6

将以上各污染物的量根据库区人口用水量、月降雨量和农田施肥比例按月份分配¹⁰⁻¹¹,并通过 Arc SWAT 模型运算,便可生成二维水质模型所需的水质数据,见图 2、图 3。

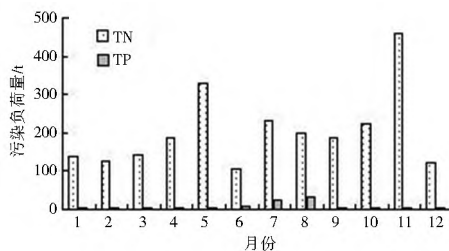


图 2 各月 TN、TP 污染负荷量

Fig. 2 Monthly pollution loads of TN and TP

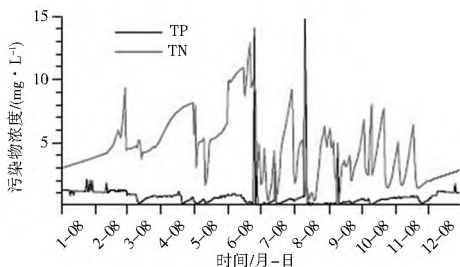


图 3 TN、TP 浓度趋势

Fig. 3 Monthly concentration trends of TN and TP

3 数学模型及求解

3.1 二维水动力控制方程^[14-18]

库区水动力模型是基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier Stokes 方程, 并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定。

二维非恒定浅水方程组如下。

连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(s_{ax} - s_{fx}) + s_{wx} \quad (2)$$

y 方向动量方程

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2gh^2/2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = gh(s_{ay} - s_{fy}) + s_{wy} \quad (3)$$

$$s_{wx} = \rho_a C_D |W_a| W_a \cos\alpha \quad (4)$$

$$s_{wy} = \rho_a C_D |W_a| W_a \sin\alpha \quad (5)$$

式中: h 为水深; u, v 分别为 x 和 y 方向沿垂线平均的水平流速分量; s_{ax} 和 s_{fx} 分别是 x 方向的水底底坡和摩阻坡度; s_{ay} 和 s_{fy} 分别是 y 方向的水底底坡和摩阻坡度; g 为重力加速度; ρ_a 为空气的密度; C_D 为风的拖曳系数; W_a 为水面以上 10 m 处的风速; s_{wx} 和 s_{wy} 分别为 x 和 y 方向的风应力。

3.2 对流-扩散方程^[14-18]

物质在水体中的基本对流-扩散方程的一般形式为

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C}{\partial y}) - K_c hC + S \quad (6)$$

式中: D_x 和 D_y 分别为 x 方向和 y 方向各污染物的扩散系数; K_c 为各污染物综合降阶系数; S 为各污染源的源汇项; C 为污染物(TN、TP)的垂线平均浓度。

综上式(1)、(2)、(3)、(6)可以将二维浅水方程和对流-扩散方程的守恒形式表达为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (7)$$

式中: $q = \{h, hu, hv, hC\}^T$ 为守恒物理量; $f(q) = \{hu, hu^2 + gh^2/2, huv, huC\}^T$ 为 x 方向通量; $g(q) = \{hv, hv^2 + gh^2/2, huv, hvC\}^T$ 为 y 方向通量; 源汇项 $b(q)$ 为 $b(q) = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$, 其中: $b_1 = 0$, $b_2 = gh\{s_{ax} - s_{fx}\}$, $b_3 = gh\{s_{ay} - s_{fy}\}$, $b_4 = [D_x(hC)]_x + S/A + KhC$ 。式中: $\frac{\partial}{\partial x}$ 为梯度算子, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 是 Laplace 算子。

3.3 模型求解

3.3.1 一阶精度格式^[14-18]

对于任意单元 Φ 其边界为 $\partial\Phi$ 通过积分方程(7)并利用散度定理可得到有限体积法(FVM)的基本方程:

$$\iint_{\partial\Phi} \frac{\partial q}{\partial t} d\Phi = - \int_{\partial\Phi} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Phi} b(q) d\Phi \quad (8)$$

式中: q 为守恒物理量; n 为单元边界的外法向单位向量; $d\Phi$ 和 dL 分别为面积分微元和线积分微元, $F(q) = \{f(q), g(q)\}^T$, $F(q) \cdot n$ 为法向数值通量。

对于一阶精度方程中除扩散通量项外, 双重积分可表示为 $A \frac{\Delta q}{\Delta t}$ 及 $b \cdot q$ 的形式, A 为单元 Φ 的面积。利用散度定理后, 扩散通量项可以表达成 $\sum_{\Delta} D(\frac{hC}{\Delta})_n$, 其中 $(\frac{hC}{\Delta})_n$ 为相邻单元的法向 hC 的梯度。最终 FVM 基本方程形式表示为

$$A = \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T^{-1}(\Phi) f(\bar{q}) L^j + b \cdot (q) \quad (9)$$

式中: $\bar{q} = T(\Phi) \cdot q$; $T^{-1}(\Phi)$ 和 $T(\Phi)$ 为坐标旋转变换和逆变换矩阵; L^j 为第 j 单元的长度; m 为单元边总数; $b(q) = \{A b_1, A b_2, A b_3, \sum_{\Delta} D(\frac{hC}{\Delta})_n L + S + A \cdot K hC\}^T$ 。

本模型的时间离散采用显格式, 由方程(9)可见, 问题归结为如何确定法向通量 $f(\bar{q})$, 而 $f(\bar{q})$ 可通过解局部一维黎曼问题求得。本文采用 FVS 格式计算该数值通量, 一维黎曼初值问题可表达为

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial f(\bar{q})}{\partial x} = 0, \bar{q} = \bar{q}_L (\bar{x} < 0, t = 0), \bar{q} = \bar{q}_R (\bar{x} > 0, t = 0) \quad (10)$$

式中: 变换后向量 $\bar{q} = (h, hu, hv, hC)^T$; \bar{q}_L 和 \bar{q}_R 分别为向量 \bar{q} 在单元界面左右的状态。

改造方程组(10)使其满足齐次性, 应用特征理论及根据特征值的符号将新方程组的法向通量分裂成为得缓流、急流状态下 Steger Warming 型 FVS 格式法向数值通量 F^+ 和 F^- , $F = F^+ + F^-$ 。

缓流

$$F^+ = \frac{h}{4} \begin{bmatrix} 3\bar{u} + c \\ 2\bar{u}^2 + (\bar{u} + c)^2 \\ 2\bar{u}\bar{v} + (\bar{u} + c)\bar{v} \\ 2\bar{u}C_i + (\bar{u} + c)C_i \end{bmatrix}, F^- = \frac{h}{4} \begin{bmatrix} \bar{u} - c \\ (\bar{u} - c)^2 \\ (\bar{u} - c)\bar{v} \\ (\bar{u} - c)C_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

急流

$$F^+ = h \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{u}^2 + \frac{1}{2}c^2 \\ \bar{u}\bar{v} \\ \bar{u}C_i \end{bmatrix}, F^- = 0 \quad (12)$$

式中: h 为水深; \bar{u}, \bar{v} 分别为法向和切向流速; $c = \sqrt{gh}$; C_i 为污染物(TN、TP)的垂线平均浓度。

3.3.2 二阶无震荡格式

当柯朗(Courant)数小于 1 时, 大多数对流-扩散方程一阶格式的数值弥散比较严重, 当空间浓度梯度比较大时更甚。为此本模型采用具有 TVD(全变差缩小)特性的 Roe Superbee 限制函数^[12-13]使污染物输移-扩散方程的解达到二阶精度且没有数值振荡发生。其二阶法向数值通量 $f_{LR}^{(2)}$ 的表达式为^[14-18]

$$f_{LR}^{(2)} = f_{LR} + \frac{1}{2} [\Phi(r_{\bar{L}}) \cdot \alpha_{\bar{L}} \cdot \delta f_{LR} - \Phi(r_{\bar{R}}) \cdot \alpha_{\bar{R}} \cdot \delta f_{LR}] \quad (13)$$

$$\text{式中: } r_{\bar{L}} = \frac{\alpha_{LR}^+ \delta f_{LR}^+}{\alpha_{LR}^- \delta f_{LR}^-}; \alpha_{LR}^+ = 1 - \frac{\delta f_{LR}^+}{\delta q_{LR}} \sigma; r_{\bar{R}} = \frac{\alpha_{LR}^- \delta f_{LR}^-}{\alpha_{LR}^+ \delta f_{LR}^+};$$

$$\alpha_{LR}^- = 1 + \frac{\delta f_{LR}^-}{\delta q_{LR}} \sigma; \delta f_{LR} = f_{R-} - f_{L-} = \delta f_{LR}^+ + \delta f_{LR}^-; \delta q_{LR} = q_R - q_L。$$

式中: f_{LR} 为一阶法向数值通量; $\sigma = \Delta t / \Delta x$; Φ 为限制函数, 用以保证二阶项的 TVD 特性, Φ 常表示为压缩参数 β 的函数: $\Phi(r) = \max(0, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta))$ ^[13]; β 值的变化范围为

1~2, Roe Super bee 限制函数的 β 值为 $2^{[12]}$ 。

4 模型的验证

出入流和风力都能引起水库中水体的运动,于桥水库最大回水长东西约为 30 km,南北宽 8 km,平均水深 4 m,属于浅宽型水库;风动力对其库流影响明显^[17]。本文根据于桥水库入库口分布和水动力特征,将于桥水库区域采用非结构三角形网格进行离散,网格剖分见图 4,网格结点分布均匀,疏密度控制合理,计算网格可以很好地拟合边界。地形资料为 1997 年的实测地形图,地形图选用北京 1954 坐标系及 1985 国家高程基准,建模时将国家高程基准转化为大沽高程基准。内插值后,得到图 5,从图中可以看出水库在坝前水位较深。整个区域共 14 242 个计算单元,7 463 个计算结点。

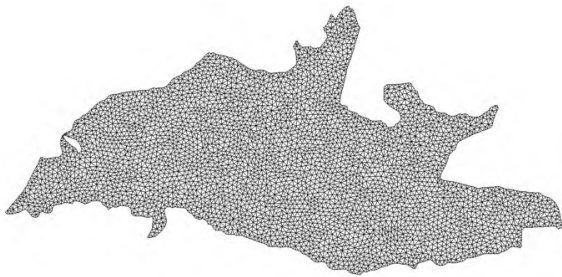


图 4 于桥水库区域网格剖分

Fig. 4 Unstructured grid subdivision of the Yuqiao Reservoir



图 5 于桥水库库底高程

Fig. 5 The bottom elevation of the Yuqiao Reservoir

淋河、沙河和黎河的逐日入库流量、出库流量过程及于桥水库库区的气象采用 2008 年资料,根据水深的不同选用不同的糙率,范围在 0.016~0.030 之间,根据水库水流流速的实际情况,扩散系数取为 $0.015 \text{ m}^2/\text{s}$,涡黏系数采用 Smagorinsky 公式计算。水质资料由根据 2008 年库区总调查计算得出的 TN、TP 浓度趋势图(图 4)提取,根据水温的不同, TN 衰减系数为 $0.0075 \sim 0.0155 \text{ d}^{-1}$, TP 衰减系数为 $0.0085 \sim 0.0195 \text{ d}^{-1}$,并对建立的模型进行验证。

图 6 为 2008 年全年计算结果与实测数据的比较,经误差分析最大绝对误差为 2.14%,模拟水位与实测水位吻合较好。图 7 显示了于桥水库 2008 年 6 月 25 日的模拟结果,风生流是水库内的主要水流形式。受水下地形以及库岸曲折的轮廓影响,在夏季常风向以及入流影响下,水库中的流场出现了很多环流流场,在库体东侧形成了顺时针大环流,而在库西侧则相应形成了逆时针环流,同时在两个环流中间还存在着几个较小的插花式补偿小环流。在风生流和吞吐流的共同影响下,水库水流以东西方向流动为主,在南岸和西北岸形成沿岸流,流速较大,流速约为 2.4 cm/s ,而库中水流流速较小约为 1.3 cm/s 。

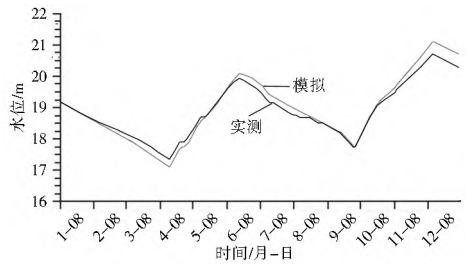


图 6 2008 年于桥水库实测水位与计算水位

Fig. 6 Measured and calculated water levels of the Yuqiao Reservoir in 2008

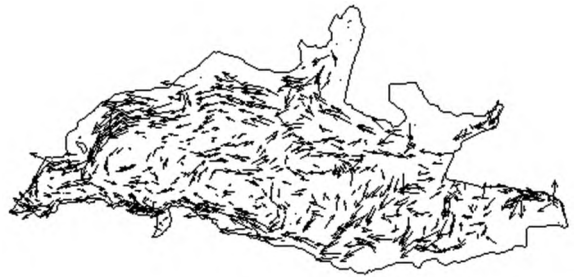


图 7 2008 年 6 月 25 日水库流场

Fig. 7 Flow field of the Yuqiao Reservoir on June 25, 2008

模型选用最具有代表性的库心监测点作为水质的验证点,库心 TN、TP 浓度随时间变化与实测值变化趋势对比图见图 8、图 9。表 2、表 3 给出了两种污染物的相对误差分析。

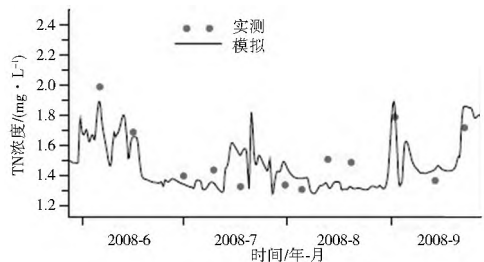


图 8 库心 TN 浓度模拟值与实测值对比

Fig. 8 Comparison of the simulated and measured TN concentrations at the reservoir center

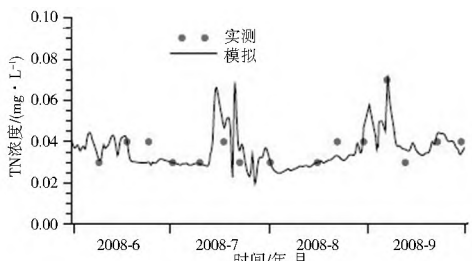


图 9 库心 TP 浓度模拟值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of the simulated and measured TP concentrations at the reservoir center

由图 8、图 9 及表 2 可见,本研究模型的模拟结果与实测值拟合比较理想。从趋势图上我们可以看出模拟值与实测值在随时间变化上表现出一致性。TN 最大相对误差为 14.29%,最小误差为 1.78%,平均误差为 5.50%;TP 相对误差较大一些,最大相对误差为 20.67%,最小为 0.33%,平均误差为 9.52%,都在一般可接受的 30% 误差范围内。

表2 库心 TN 浓度模拟值与实测值相对误差分析

Tab. 2 Relative errors of simulated and measured concentration values of TN at the reservoir center

时间 / 月日	TN 实测值 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN 模拟值 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	相对误差 (%)
06 06	1.99	1.88	5.53
06 16	1.69	1.66	1.78
06 24	-	-	-
07 01	1.40	1.35	3.57
07 10	1.44	1.36	5.56
07 18	1.33	1.52	14.29
07 22	-	-	-
07 31	1.34	1.51	12.69
08 05	1.31	1.42	8.40
08 13	1.51	1.36	9.93
08 20	1.49	1.31	12.08
09 02	1.79	1.69	5.59
09 14	1.37	1.26	8.03
09 22	1.72	1.56	9.30
09 30	-	-	-
平均值			5.50

表3 库心 TP 浓度模拟值与实测值相对误差分析

Tab. 3 Relative errors of simulated and measured concentration values of TP at the reservoir center

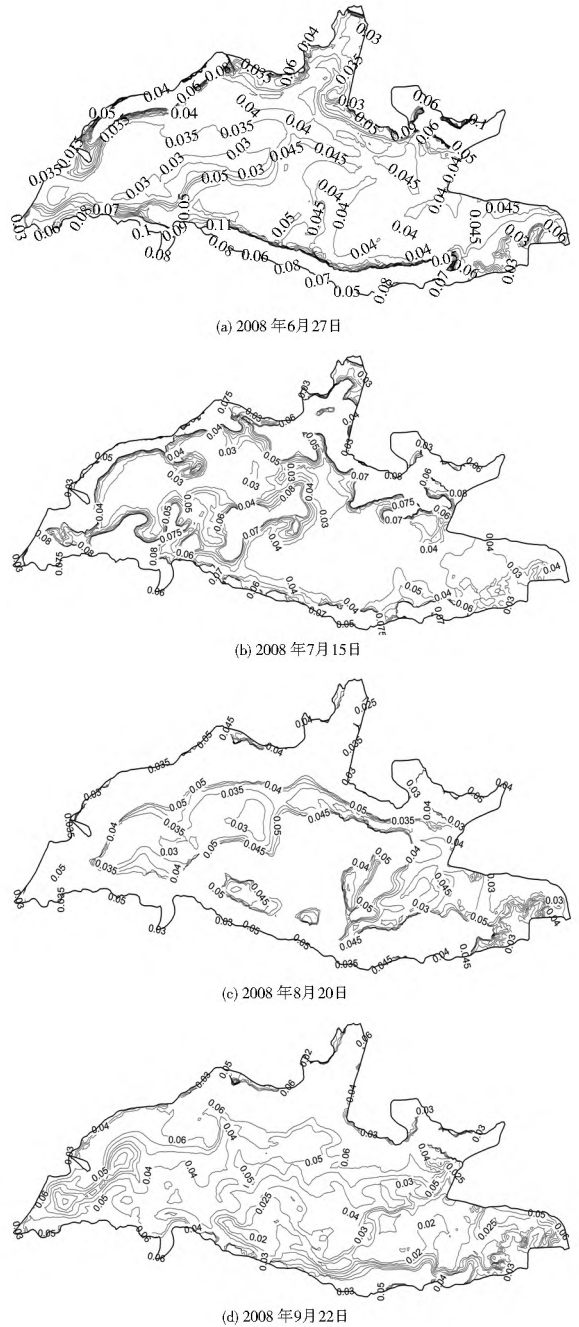
时间 / 月日	TP 实测值 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP 模拟值 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	相对误差 (%)
06 08	0.03	0.031 5	5.00
06 17	0.04	0.042 2	5.50
06 24	0.03	0.029 9	0.33
07 01	0.03	0.029 3	2.33
07 10	0.04	0.047 4	18.50
07 17	0.03	0.035 7	19.00
07 22	0.03	0.030 5	1.67
08 01	0.03	0.030 5	1.67
08 16	0.03	0.029 9	0.33
08 22	0.04	0.033 3	16.75
08 30	0.04	0.047 0	17.50
09 06	0.07	0.063 1	9.86
09 12	0.03	0.036 2	20.67
09 22	0.04	0.043 9	9.75
09 30	0.04	0.034 4	14.00
平均值			9.52

5 模拟结果分析

5.1 磷的时空分布

于桥水库总磷 (TP) 模拟结果见图 10。从于桥水库总的雨季分布上看,7 月份总磷的平均浓度要高于其他月份,达到了 0.049 mg/L ; 8 月份总磷平均浓度要略高于 6 月份的总磷平均浓度,但二者总磷浓度都在 0.03 mg/L 上下波动; 而 9 月份的总磷浓度在整个雨季最低,平均浓度为 0.0275 mg/L 。这是由于在 6 月下旬降雨增多,形成的降雨径流比较大,从

而冲刷地表,携带高浓度的面源污染产生的含磷污染物入库。污染物入库后通过水体对流扩散作用逐渐向库心迁移,使得 7 月份全库总磷浓度较高; 8 月份由于降雨集中,降雨量明显增大,产流入库量增多,对水体的稀释作用明显,另外由于前期降雨径流冲刷导致后期污染物减少也是造成 8 月份总磷浓度较低的原因; 而 9 月 7 日至 24 日由于引滦水的入库而造成水体总磷含量整体下降。

图 10 6月-9月于桥水库 TP 浓度平面分布 (mg/L)Fig. 10 Spatial distribution of TP concentration from June to September in 2008 (mg/L)

从于桥水库的空间分布上看,于桥水库总磷的空间分布具有明显的差异性。空间整体分布呈现东高西低的趋势,这主要是因为库体东侧水位较浅,水体交换速度较快,而库体西侧处于库心位置,水位较深造使得水环境容量较大,而且水体交换速度也慢。此外由于受到风动力产生的环流影响,

在库体中央出现一条浓度较高的污染带。库体南岸总磷浓度较北岸总磷浓度高,这是由于南岸地势坡度较大,降雨径流冲刷明显,此外,该区域畜禽养殖产污也较大;由于沿岸流的作用,在库体西北岸和南岸下,总磷浓度扩散较快并沿岸向下游递减。

从以上模拟结果分析上看,于桥水库总磷的时空分布主要受周边面源污染影响,由于晴天积累,雨天排放使得降雨成为主要因素。从 9 月份引滦水入库的影响来看,引滦水并非于桥水库的输入来源。

5.2 氮的时空分布

于桥水库总氮(TN)的模拟结果见图 11。从时间分布来看,于桥水库总氮浓度在 8 月份达到最低,平均总氮浓度为 1.56 mg/L,总氮浓度最高出现在 9 月份,平均浓度为 3.74 mg/L,

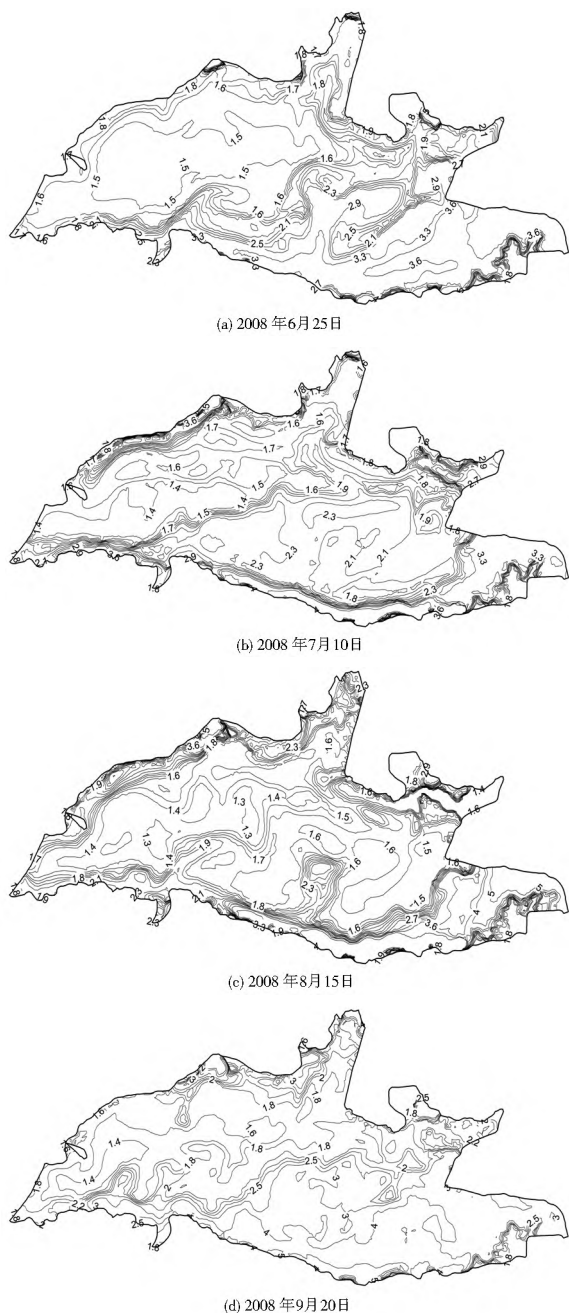


图 11 6月-9月于桥水库 TN 浓度平面分布(mg/L)

Fig. 11 Spatial distribution of TN concentration from June to September in 2008 (mg/L)

6、7 月份总氮平均浓度相对持平,平均浓度在 2.23~2.47 mg/L 之间。造成这种时间分布的原因主要是 9 月份的引滦水总氮含量在 3.0~5.6 mg/L 之间,对水库水质影响很大。8 月份由于降雨次数增多,雨量增大,产汇流加大,水库水位升高,水体浓度降低。

从于桥水库总氮的空间分布看,总氮浓度由东南到西北呈现出高-低-高-低-高的分布趋势。这主要是受水库污染源入口分布以及风生环流的影响,在库体西北岸面源污染汇流主要经由刘相营和壕门村入库,而在库体南岸污染物汇流主要经由五百户镇和霍家店入库,风动力产生的东、西两个大环流中间形成一条较明显的高浓度污染带。在库体西北岸和南岸总氮浓度分布与总磷浓度分布相一致,沿库岸向坝址处递减。此外由于西岸人工岛的阻挡作用,总氮浓度在坝前分布受到一定程度影响。

综合上述模拟结果和分析,于桥水库氮的时空分布主要受降雨带来的面源污染和上游引滦水影响。由降雨径流携带的面源污染主要影响库体周边水质,对库心水质影响较小,由于风生环流影响,库边污染会在短时间内影响出水口水质,给城市供水带来影响。

6 结论

(1) 通过建立于桥水库水动力水质二维耦合模型,综合分析于桥水库周边面源污染随降雨径流的入库负荷以及水文、气象条件的影响,模拟了雨季于桥水库氮、磷营养盐的时空分布情况。模拟结果与实测值误差在可接受范围内。可以用来反应于桥水库水体氮、磷营养盐的实际分布情况。

(2) 于桥水库总氮含量最高值出现在 9 月份,8 月份为于桥水库总氮含量最低的月份。受风生流作用库体周边水质受污染影响明显。刘相营、五百户镇及霍家店为氮污染物主要汇流入库口。总磷含量最低出现在 9 月份,7 月份为总磷含量最高月份。在空间分布上表现出东高西低的趋势。库体南岸为总磷主要汇流入口。

参考文献(References):

- [1] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I—21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004(7): 1008-1017. (ZHANG Wei li, JI Hong jie, Kolbe H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I— Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004(7): 1008-1017. (in Chinese))
- [2] Orioli G, Sabbatini M, Marchena J, et al. The impact of agricultural land use on stream chemistry and inputs to an inland reservoir: Case of the Sauce Grande River, Argentina[J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(4): 834-843.
- [3] Jiao L, Zhao H, Wang S, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of phosphorus loading in Erhai Lake in 2010[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(5): 534-539.
- [4] Kauppi L. Contribution of Agricultural Loading to Eutrophica

- tion in Finnish Lakes[J]. *Water Science and Technology*, 1983, 17(6-7 pt 3): 1133-1140.
- [5] 孙杨, 韩龙喜. 典型暴雨农业面源总磷入库水质影响过程[J]. *水资源保护*, 2014(1): 18-22. (SUN Yang, HAN Long xi. Water quality effects of agricultural nonpoint source total phosphorus input into reservoir in a typical rainstorm[J]. *Water Resources Protection*, 2014(1): 18-22. (in Chinese))
- [6] 唐天均, 杨晟, 尹魁浩, 等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. *湖泊科学*, 2014(3): 393-400. (TANG Tianjun, YANG Sheng, YIN Kuihao, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen Reservoir based on EFDC model[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014(3): 393-400. (in Chinese))
- [7] 卢士强, 矫吉珍, 林卫青. 区域排污对长江口水源地水质影响的数值模拟[J]. *人民长江*, 2013(21): 112-116. (LU Shi-qiang, JIAO Ji-zhen, LIN Wei-qing. Numerical simulation on influences of regional pollution discharge on water quality of water sources at Yangtze Estuary[J]. *Yangtze River*, 2013(21): 112-116. (in Chinese))
- [8] 陆海明, 尹澄清, 王夏晖, 等. 于桥水库周边农业小流域氮素流失浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2008(2): 349-355. (LU Hai-ming, YIN Cheng-qing, WANG Xia-hui, et al. Nitrogen loss from agricultural catchments by drinking water sources: A Case Study of the Yuqiao Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008(2): 349-355. (in Chinese))
- [9] 陆海明, 尹澄清, 王夏晖, 等. 于桥水库周边农业小流域地表径流和亚表层流的磷素流失浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2007(10): 1702-1708. (LU Hai-ming, YIN Cheng-qing, WANG Xia-hui, et al. Phosphorus concentrations in surface runoff and subsurface flow from agricultural catchments by the Yuqiao Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007(10): 1702-1708. (in Chinese))
- [10] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较[J]. *湖泊科学*, 2006(4): 377-386. (LI Heng-peng, YANG Gui-shan, HUANG Wen-yu, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus concentration of runoff from different spatial scale watersheds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006(4): 377-386. (in Chinese))
- [11] 尹洁, 郑玉涛, 王晓燕. 密云水库水源保护区不同类型村庄生活污水排放特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1200-1207. (YIN Jie, ZHENG Yu-tao, WANG Xiao-yan. Discharge features of rural domestic wastewater from different types of villages in water source protection area, Miyun Reservoir, Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1200-1207. (in Chinese))
- [12] P. K. Sweby. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1984, 21(5): 995-1011.
- [13] P. L. Roe, M. J. Baunes. Algorithms for advection and shock problems[A]. *Proc. 4th GAMM Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics*[C]. H. V. Viand, ed., 1982, 281-290.
- [14] He C, Rochfort Q. Numerical Modelling Approaches for Assessing Improvements to the Flow Circulation in a Small Lake[J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2011, 2011: F21.
- [15] 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(4): 368-374. (ZHAO Di-hua, QI Chen, YU Wei-de, et al. Finite volume method and riemann solver for depth averaged two dimensional flow-pollutants coupled model[J]. *Advances in Water Science*, 2000(4): 368-374. (in Chinese))
- [16] 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(6): 701-706. (ZHAO Di-hua, YAO Qi, JIANG Yan, et al. FVS scheme in 2-D depth averaged flow-pollutants modeling[J]. *Advances in Water Science*, 2002(6): 701-706. (in Chinese))
- [17] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2011(3): 359-367. (YUE Zhi-yuan, CAO Zhi-xian, LI You-wei, et al. Unstructured grid finite volume model for two dimensional shallow water flows[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics A*, 2011(3): 359-367. (in Chinese))
- [18] Heniche M, Secretan Y, Boudreau P, et al. A two dimensional finite element drying wetting shallow water model for rivers and estuaries[J]. *Advances in Water Resources*, 2000, 23(4): 359-372.
- [19] LIU X, PENG W, HE G, et al. A Coupled Model of Hydrodynamics and Water Quality for Yuqiao Reservoir in Haihe River Basin[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(5): 574-582.