

生态清淤对于桥水库水质影响的数值模拟

程扬^{1,2}, 赖锡军¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以天津于桥水库为例, 建立了考虑沉积物-水界面物质交换的二维水动力和营养物质输移模型, 基于率定的参数模拟了不同水质背景条件下, 水库库周清淤和全库清淤两种方案对水库中的氮、磷营养盐时空分布的影响。结果表明: 模型能够可靠地模拟水库底泥氮、磷营养盐的动态释放及其与外界污染输入共同作用下水库的氮、磷营养盐的含量; 底泥是于桥水库水体营养盐的重要来源, 底泥清除后水库氮、磷营养盐含量均有所下降, 但是不同方案的清淤效果存在差异。库周清淤对沿岸带的浅水区水体氮、磷有很好的改善作用, 但对库区的整体改善效果不佳 (<2%); 而全库清淤后, 整个库区水体的氮、磷含量均大幅下降 (26%~48%), 治理效果相对明显。

关键词: 生态清淤; 水动力-营养物质输移模型; 富营养化; 于桥水库

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0058-08

Numerical simulation of the effects of the ecological dredging on water quality in Yuqiao Reservoir

CHENG Yang^{1,2}, LAI Xijun¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Yuqiao Reservoir in Tianjin City was taken as an example in this paper, a two-dimensional hydrodynamic and nutrient transport model considering substance exchange across the sediment-water interface was developed. The effects of two different scopes of dredging on the temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in the reservoir under different water quality background were simulated based on calibrated parameters. The results demonstrated that: the established model could reliably simulate the dynamic release of nitrogen and phosphorus nutrient from lake sediment and its content under the combined influence from sediment release and external pollutant input; sediment was an important source of nutrients in Yuqiao Reservoir. The content of nitrogen and phosphorus nutrient in the reservoir would decreased after dredging, but different dredging schemes varied markedly. Dredging around the reservoir contributed much to water quality of shallow coastal waters but had little effect (<2%) on the whole reservoir. Dredging the whole reservoir resulted in a significant decrease (26%~48%) of nitrogen and phosphorus nutrients in the reservoir which showed a relatively obvious improvement on water quality.

Key words: ecological dredging; hydrodynamic and nutrient transport model; eutrophication; Yuqiao reservoir

1 研究背景

湖泊水库流域是人类社会经济发展的重要区

域。流域内频繁的人类活动对湖泊水库的生态环境形成了很大的压力, 水体日趋严重的富营养化现象就是其表现出来的突出问题之一^[1]。水体富营养

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2019-01-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603); 中国科学院“一三五”重大突破项目 (NIGLAS2018GH02)

作者简介: 程扬 (1994-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文与水资源。

通讯作者: 赖锡军 (1977-), 男, 浙江遂昌人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为环境水力学。

化威胁流域内的供水安全和生态系统健康,严重制约了流域经济社会的可持续发展^[2]。内源污染是研究湖库富营养化问题不可忽略的因素。即使外源污染逐渐得到有效控制,湖泊底泥的氮磷释放仍有可能使水体保持在富营养化状态^[3]。生态清淤将污染底泥从湖底清除,从根本上控制内源性污染,被广泛应用于国内外的湖泊水库治理中^[4]。然而,不同湖泊实施清淤后对营养盐释放的控制效果不同,对生态清淤是否能从根本上改善富营养化状态,国内外仍存在争议^[5-6]。准确认识动态变化环境下沉积物-水界面营养盐交换过程及其影响下水体水质的变化是评估生态清淤工程能否实施的关键。目前,国内对清淤效果的评价多为清淤后评估验证^[7-8],而在清淤工程开展前缺乏必要的研究和论证,不仅为湖泊治理工作带来隐患,同时也造成了资源资金的浪费。在生态清淤工程实施前利用模型模拟和预测清淤效果,可为生态清淤工程的决策提供重要支撑。

于桥水库是天津市主要的饮用水源地。作为引滦入津工程的重点调蓄水库,其在天津市供水系统中发挥着极其重要的作用。目前,于桥水库整体水质呈中营养-轻富营养状态,且富营养化有加重的趋势^[9]。水库水生态系统已遭到破坏,底泥对污染物的截留(自净)能力已趋于饱和,底泥污染初显。在不断推进水库上游污染治理且取得一定效果的形势下,对于桥水库进行清淤是进一步改善水质的重要备选手段。

本研究以于桥水库生态清淤为例,基于二维浅水方程和对流-扩散-反应方程构建了考虑底泥释放的水动力-营养物质输移模型,分别模拟了不同工况、不同清淤范围条件下清淤工程开展前后地表水环境的时间和空间变化情况,以期对清淤工程的设计和和实施提供数据支撑和合理建议。

2 考虑沉积物-水界面物质交换的二维水动力和营养物质输移模型

2.1 二维对流-扩散-反应方程

采用二维对流-扩散-反应方程模拟氮、磷营养物质在湖泊水库内部的输移降解过程^[10-11]。其方程为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(hC)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial(hC)}{\partial y} \right) - KhC + S \quad (1)$$

式中: h 为水深, m ; C 为水体中氮、磷的浓度, mg/L ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量, m/s ; D_x 、 D_y 分别为氮、磷在水体中 x 、 y 方向的扩散系数, m^2/s ; K 为氮、磷在水体中的综合降解系数, s^{-1} ; S 为氮、磷的源汇项。

为了考虑底泥释放和吸收等内部源汇项,源项 S 需增加考虑沉积物底泥与表层水之间氮磷的交换。令 F_{ex} 为底沉积物-水界面氮、磷交换通量,其紊动扩散理论^[12] 为:

$$F_{ex} = \frac{(c_{0+}^p - c_{0-}^p)}{\delta} = \kappa(c_p - c) \quad (2)$$

式中: δ 为泥-水界面的厚度, cm ; c_{0+}^p 和 c_{0-}^p 分别为泥-水界面近泥侧和近水侧的间隙水中氮、磷浓度, mg/L , 计算中将 c_{0+}^p 近似等同于水体氮、磷浓度 c , mg/L , 将 c_{0-}^p 近似等同于表层底泥间隙水氮、磷浓度 c_p , mg/L ; κ 为传质系数, $\kappa = \varphi_0 D_p$, φ_0 为沉积物上表层的平均孔隙度, D_p 为分子扩散系数, m^2/s , $D_p = \varphi^m D_0$, φ 为底泥底层沉积物的平均孔隙度; m 为经验系数, 当 $\varphi < 0.7$ 时, $m = 2.0$; 当 $\varphi \geq 0.7$ 时, $m = 2.5 \sim 3.0$; D_0 为污染物在无限稀释溶液中的理想扩散系数, m^2/s 。

考虑沉积物-水界面的氮磷交换通量,则由公式(1)可得垂向平均平面二维氮、磷营养物质输移方程,其表达式为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(hC)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial(hC)}{\partial y} \right) - KhC - F_{ex} + S \quad (3)$$

2.2 水动力-水质耦合的守恒型方程

将二维浅水方程与二维氮、磷营养物质运输方程耦合,形成的方程组可以写成以下守恒形式^[13]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S \quad (4)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \\ hC \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_x = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \\ huC \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_y = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \\ hvC \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) + \nabla^2 \frac{\varepsilon}{\rho} hu + c_\omega \frac{\rho_a}{\rho} \omega^2 \sin\alpha + fvh \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) + \nabla^2 \frac{\varepsilon}{\rho} hv + c_\omega \frac{\rho_a}{\rho} \omega^2 \cos\alpha - fuh \\ \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C}{\partial y}) - F_{ex} - KhC + S \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： U 为守恒物理向量； F_x, F_y 分别为 x, y 方向的通量向量； S 为源汇项向量； S_{0x}, S_{0y} 分别为 x, y 方向的床底坡降； S_{fx}, S_{fy} 分别为 x, y 方向的摩阻坡降； g 为重力加速度， m/s^2 ； c_ω 为风的阻力系数； ρ_a 为空气的密度， kg/m^3 ； ω 为风速， m/s ； α 为风速与 y 轴的夹角。

2.3 数值方法

采用非结构网格有限体积法求解该二维水动力-氮磷营养盐输移的控制方程组^[13-14]。首先对方程在任意控制体积做体积分，后根据高斯定理将体积分化成面积分，再进行空间离散，时间导数项采用一阶显格式离散，离散后方程的法向通量采用 HLLC 算法^[13] 计算。

2.4 边界条件

以上数值方法可用于计算域内部单元界面的求解，而对于计算域的边界单元，其左状态为已知状态，而右状态为未知状态，此时的数值通量求解就变成了边界黎曼问题^[15]。一般可以通过根据局部流态适当选定的输出特征的相容关系和指定边界条件来确定未知状态，常见的边界条件可以为水位、单宽流量和水位-流量关系。

对于污染物的扩散输移，存在三类边界：水流入入口处可给定边界浓度过程或污染负荷过程；水流出口处可给定自由输出的 Neumann 边界条件；面域上，可给定污染负荷，加入源项中计算。

3 于桥水库模型构建

3.1 于桥水库库区及计算网格

于桥水库位于天津市蓟州区北部的州河上，是国家重点大型水库（图 1）。正常蓄水水位 21.16 m，平均水深 4.3 m，东西长约 30 km，南北宽约 8

km，总库容 $15.59 \times 10^8 m^3$ ，控制流域面积 2 060 km^2 。于桥水库流域四面环山，流域内小河流众多，汇集成较大的 3 个水系——黎河、沙河与淋河。库区水下地形东高西低，在低水位时有滩地出露。为了保障于桥水库的饮用水供水安全，天津市在东侧河口建设了于桥水库入库河口湿地工程。该工程汇集了黎河、沙河和引滦入津的来水，经过净化处理后进入于桥水库。因此，本次计算中仅考虑水库的主库区，不纳入湿地区块。



图 1 于桥水库流域及水系

为了保证较高的计算效率，又能较好地反映于桥水库地形特征，采用非结构网格将计算区域共划分为 2 280 个计算单元（图 2）。其中以四边形网格为主，三角形网格为辅，各单元的边长从 40m 到 250m 不等，入库河道主槽单元较为精细，而在地形变化不大的滩地和地形变化较大却常年处于淹水状态的区域则采用了较大尺度的单元。

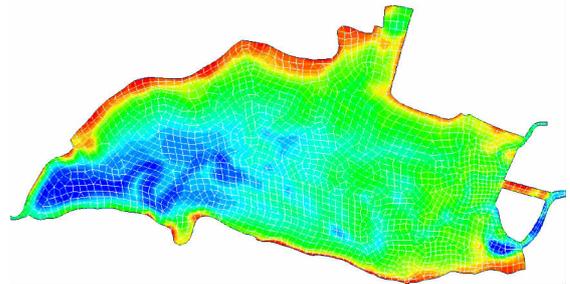


图 2 于桥水库计算网格

3.2 初始条件和边界条件

将在初始时刻的入库流量和出库水位驱动下计算 24 h 得到准恒定条件下的水流和水质条件作为计算的初始场。

于桥水库的主要入库水量和营养物质来自于果河（沙河、黎河）和淋河。计算时，以果河和淋河入库流量和营养物质浓度作为边界条件。在下游于桥水库的出口，给定水库出口的水位过程作为边界条件，水质的边界条件设为自由输出的无反射边界条件。

3.3 参数率定

选择 2015 年全年的水量和水质数据对建立的

于桥水库平面二维水动力-水质模型进行率定和检验。本次于桥水库清淤计算主要关注于总氮、总磷的指标变化。模型率定的参数主要包括水动力参数、底泥参数和水质参数。

水动力参数:于桥水库水动力较弱,且库区大部分区域多为常年淹没状态。计算时将曼宁糙率系数统一取为 0.021,风拖曳力系数为 0.0026。

底泥参数:沉积物上层平均孔隙度为 0.82,沉积物底层平均孔隙度为 0.8,总氮和总磷的理想扩散系数均为 $19.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$;沉积物中的氮、磷释放速率主要由沉积物间隙水和上覆水中氮、磷营养物质的浓度梯度决定,根据中国科学院南京地理与湖泊研究所开展的于桥水库底泥释放调查和实验数据^[16],设定在现状条件下底泥间隙水总氮和总磷浓度分别为 7 mg/L 和 0.8 mg/L,清淤后间隙水总氮和总磷浓度分别下降至 3.5 mg/L 和 0.01 mg/L。

水质参数:20℃时总氮和总磷的降解系数分别为 0.04 d^{-1} 和 0.02 d^{-1} ,考虑降解系数随温度变化,根据菲尔普斯公式^[17],不同水温条件下的降解系数与 20℃ 值的关系为:

$$K_T = K_{20}\beta^{(T-20)} \quad (9)$$

式中: β 为温度校正系数。对于总氮和总磷,分别取 1.07 和 1.04; K_T 和 K_{20} 分别为水温 T ℃ 和 20℃ 时的降解系数, d^{-1} 。

3.4 模型验证

3.4.1 水库水质 基于模型参数和 2015 年的边界条件,计算得到了于桥水库全年的水质动态变化过程,采用库中心和出库两监测点的总氮和总磷实测数据对模型计算结果进行验证(图 3)。结果表明,模型较好地反演了 2015 年总氮、总磷浓度的上下波动变化过程。总氮在库中心和出库两站的相对误差分别为 17% 和 24%;总磷的相对误差分别为 26% 和 32%。

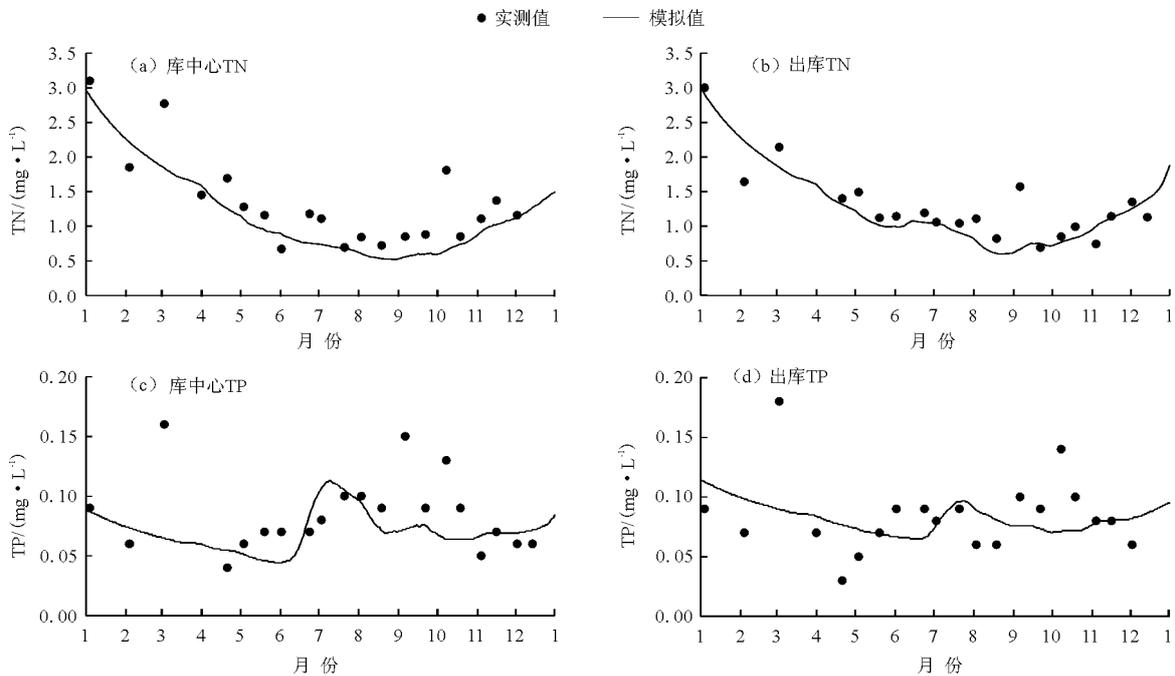


图 3 2015 年于桥水库总氮和总磷浓度实测值与模拟值对比

3.4.2 底泥释放通量 由于实验数据的限制,选择氨氮进行底泥释放通量的验证。对于模型参数,水温为 20℃ 时氨氮的降解系数取 0.1 d^{-1} ,理想扩散系数和温度校正系数与总氮取值相同,其他水动力参数、底泥参数及水质参数与 3.3 节一致,沉积物间隙水中氨氮的浓度为 6.0 mg/L。利用模型求得于桥水库 2015 年 8 月库区底泥的氨氮释放通量 $155.60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,与文帅龙等^[16]对于桥水库沉积物-水界面交换通量的实验研究结果 $129.55 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 基本一致,相对误差 20.11%,能够反

映底泥向水体释放氨氮的水平。

3.4.3 实验设计 水库的水动力、水质背景状况和清淤方案的选择都会影响分析结果。综合考虑于桥水库实施清淤工程的开展条件和环境背景,分别设计了两种工况和两种方案。

根据天津市水利科学研究院与中国科学院南京地理与湖泊研究所承担的“于桥水库环境现状诊断及其对上游调水的响应研究”成果,于桥水库底泥总磷分布较为平均,但总氮含量在坝前、北岸峰山至宋家营大堤段、刘相营段两侧以及南岸东部等区域较高,因此在综

合考虑施工便利条件、资源资金的合理利用和清淤工程效果的前提下,设计了库周清淤和全库清淤两个方案:(1)库周清淤:清淤范围以常水位以下、高程 17.8 m 以上的库周区域(图 4),具体包括北岸、东岸和南岸东部,水库北岸富营养底泥清除厚度为 30 cm,水库东部及南岸为 40 cm。富营养底泥清除总面积 13.00 km²,共计清除底泥 488 × 10⁴ m³。(2)库区完全清淤:全库清除表层底泥,清除深度为 35 cm。



图 4 库周清淤范围

2014 年于桥水库入库河口湿地工程开工建设,

建成后上游来水排入水库前需先经过库前区域的湿地生态系统的净化,入库水体所含营养盐等污染物得到一定程度的削减。基于此背景,本研究针对河口湿地启用前后两种工况分别进行模拟和分析:(1)2015 年实际水流和水质(下文简称“现状”):采用 2015 年实际观测数据验证计算后的水动力-物质输移参数,给定清淤后清淤位置的沉积物间隙水氮、磷浓度;(2)未来河口湿地正常运行(下文简称“未来”):采用湿地设计的引滦入津水量 54 m³/s 作为入库水量,库水位保持在 20.6m;入库水质总氮和总磷浓度分别为 3.14 mg/L 和 0.11 mg/L。

4 生态清淤的影响分析

4.1 总体影响特征

在水库外源不变的情况下,生态清淤可降低水库氮、磷营养盐浓度(表 1),改善库区水环境富营养化状况。

表 1 清淤前后水体 TN、TP 年平均浓度

污染物	工况	清淤前		库周清淤		全库清淤	
		浓度/(mg · L ⁻¹)	浓度/(mg · L ⁻¹)	效果/%	浓度/(mg · L ⁻¹)	效果/%	
TN	现状	1.273(±0.57)	1.270(±0.57)	0.23(±0.16)	0.908(±0.63)	28.70(±14.09)	
	未来	1.144(±0.57)	1.139(±0.35)	0.48(±0.32)	0.775(±0.38)	32.29(±13.10)	
TP	现状	0.066(±0.02)	0.065(±0.02)	0.52(±0.84)	0.049(±0.02)	26.06(±16.80)	
	未来	0.036(±0.01)	0.035(±0.01)	1.64(±1.63)	0.019(±0.01)	48.05(±21.28)	

对于 TN,若入库水质维持现状,库周清淤和全库清淤两种方案可使库中心年平均浓度从 1.273 降至 1.270 和 0.908 mg/L,分别下降 0.23% 和 28.70%;若未来河口湿地正常运行,入库水质改善,两种方案可分别使 TN 年平均浓度从 1.144 降至 1.139 和 0.775 mg/L,分别下降 0.48% 和 32.29%。无论是在现状或未来的水质背景条件下,库周或全库清淤方案下,库区水体中 TN 浓度均有所下降。但是,库周清淤方案效果有限,即使清除了库岸区域的高浓度底泥,库区水体 TN 浓度减少并不明显,而全库清淤治理效果显著,现状和未来背景下,TN 浓度均大幅下降。

对于 TP,现状工况下,清淤前库中心年平均浓度为 0.066 mg/L,库周和全库清淤实施后,年平均浓度降至 0.065 和 0.049 mg/L,分别下降 0.52% 和 26.06%;未来工况下,TP 年平均浓度为 0.036 mg/L,库周和全库清淤实施后,年平均浓度降至 0.035 和 0.019 mg/L,分别下降 1.64% 和 48.05%。总体变化规律与 TN 相似,除现状背景下全库清淤

的效果比 TN 略低外,其他工况和清淤方案下的治理效果均优于 TN。

虽然清淤后于桥水库水体中 TN、TP 均有所减少,但是值得注意的是,这种改善并不能简单地认为是长效的,沉积物底泥和水体中的营养盐存在一个再平衡的过程,上覆水浓度变化后,底泥中的营养盐含量也会随之变化。底泥清除后,水库来水营养盐含量和本底若仍维持较高的水平,营养盐仍然会在底泥累积使得底泥再次成为内部释放源^[18]。如我国杭州西湖几十年来经历了 3 次大规模的库周和全湖清淤,清淤后富营养化状态有所改善,但维持的时间不长^[19-20]。因此,水库的清淤工程仅是富营养化治理的一个方面,以改善水库富营养化状况为目的的水污染防治应该综合外部营养输入的控制、内部生物的营养利用等措施共同开展。

从 TN、TP 浓度的年内变化情况(图 5)看,生态清淤工程实施前后变化趋势基本不变,清淤并不能改变水库营养盐的变化过程,库区水体营养盐的变化主要取决于外部的输入。

4.2 水质分布空间变化

根据上文分析,以清淤对水环境改善效果较好的 2015 年 5 月 1 日为例,对比分析不同工况、不同范围的清淤工程实施前后库区总氮和总磷的空间分布情况。

现状水质背景条件下(图 6),清淤前 TN 空间分布总体表现为库周较高而中心范围较低,东部入库口向西部出库口逐渐降低,这与徐媛等^[8]对于桥水库富营养化空间分布的调查研究结果一致,表明库区水体 TN 浓度受水流影响较大,上游来水导致入库口 TN 浓度居

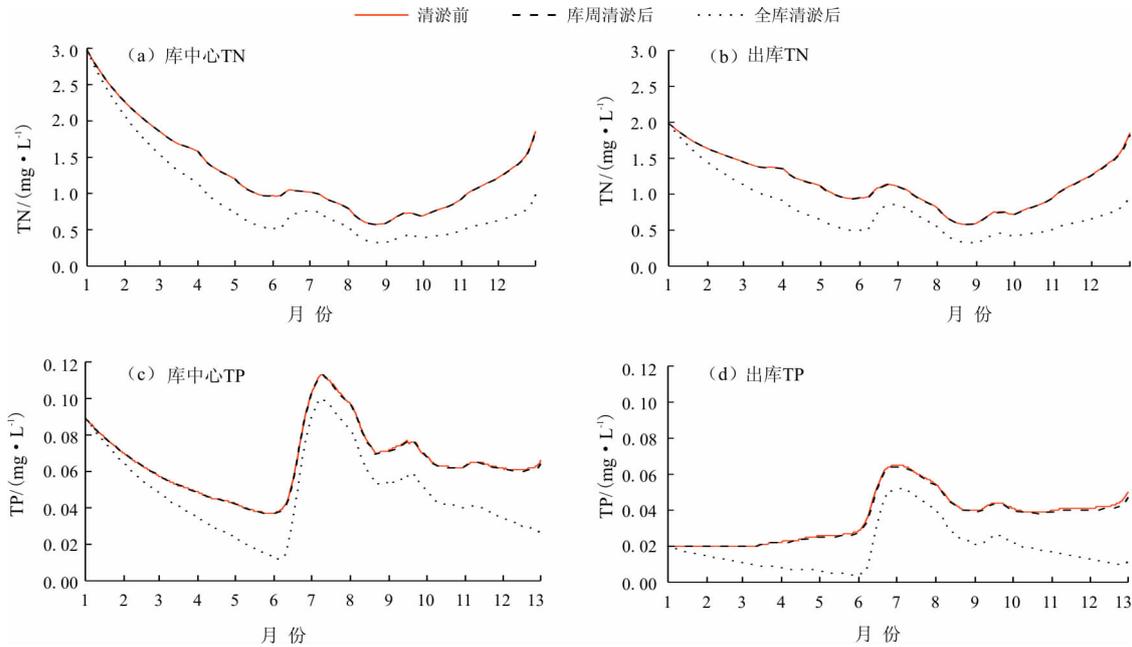


图 5 清淤前后水体 TN、TP 浓度年变化过程

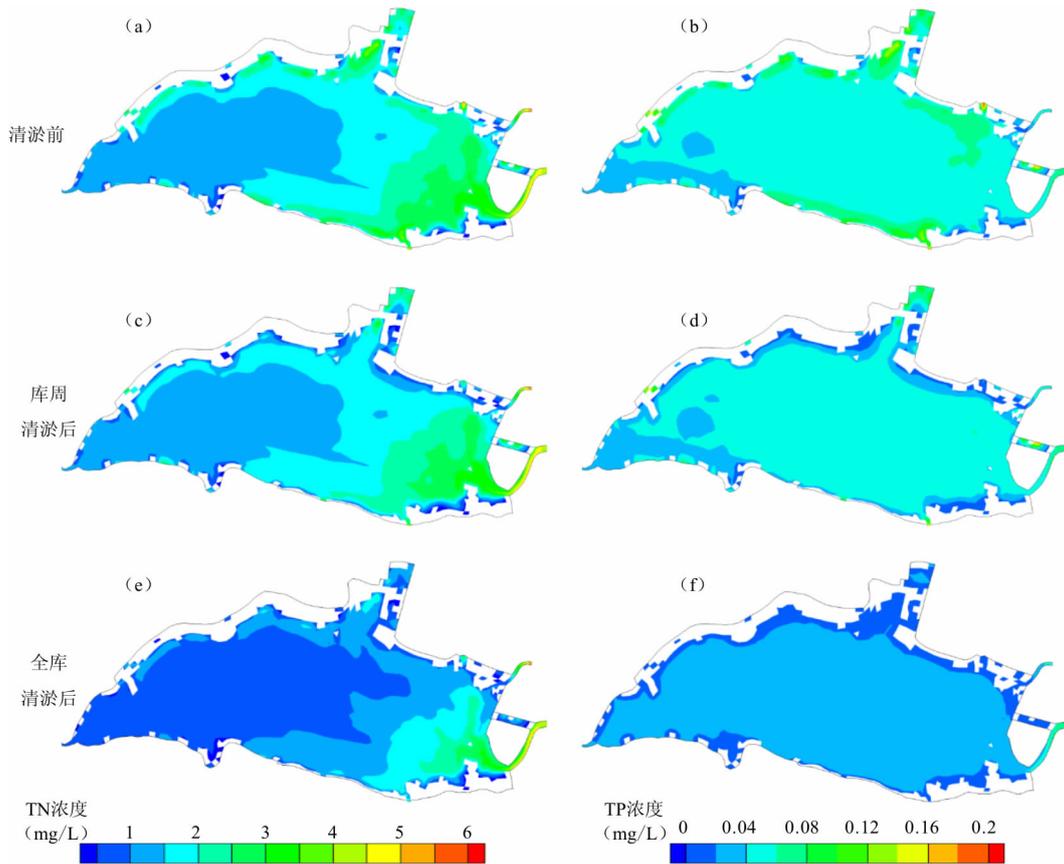


图 6 现状水质背景下清淤前后水体 TN、TP 空间分布的变化

高不下^[21]。库周清淤方案实施后,可以明显看到库周浅水区的 TN 浓度下降明显,但库中心区域底泥向库区水体中释放的营养盐含量依然很高,库区水体 TN 浓度下降不明显。全库清淤后,整个库区水体中 TN 含量都明显降低,其中,东部水域 TN 下降较西部地区更加明显,可能的原因是库区西部水域本底值较低,TN 浓度下降值要比东部低。

对于 TP,清淤前其分布状况与 TN 总体一致,但浓度差距较小,整体水质相对稳定。库周清淤后对沿岸高浓度地带治理效果较好,全库清淤后整个库区水体东西分布均匀,较清淤前明显降低,清淤工程

实施效果显著。

河口湿地正常运行后的未来水质背景下(图7),上游来水污染物浓度大幅降低,外源污染的减少使水库水质较现状背景得到有效改善。空间分布上,上游来水 TN 浓度的降低导致入库口 TN 浓度大幅降低,上下游 TN 污染空间差异减小。TP 空间分布与 TN 总体一致。

上述结果表明,库周清淤仍只能使库周浅水区和东部范围的 N、P 浓度下降,全库清淤效果明显,东西部 N、P 浓度差进一步降低,库周浅水区和中心水体的 N、P 浓度基本一致。

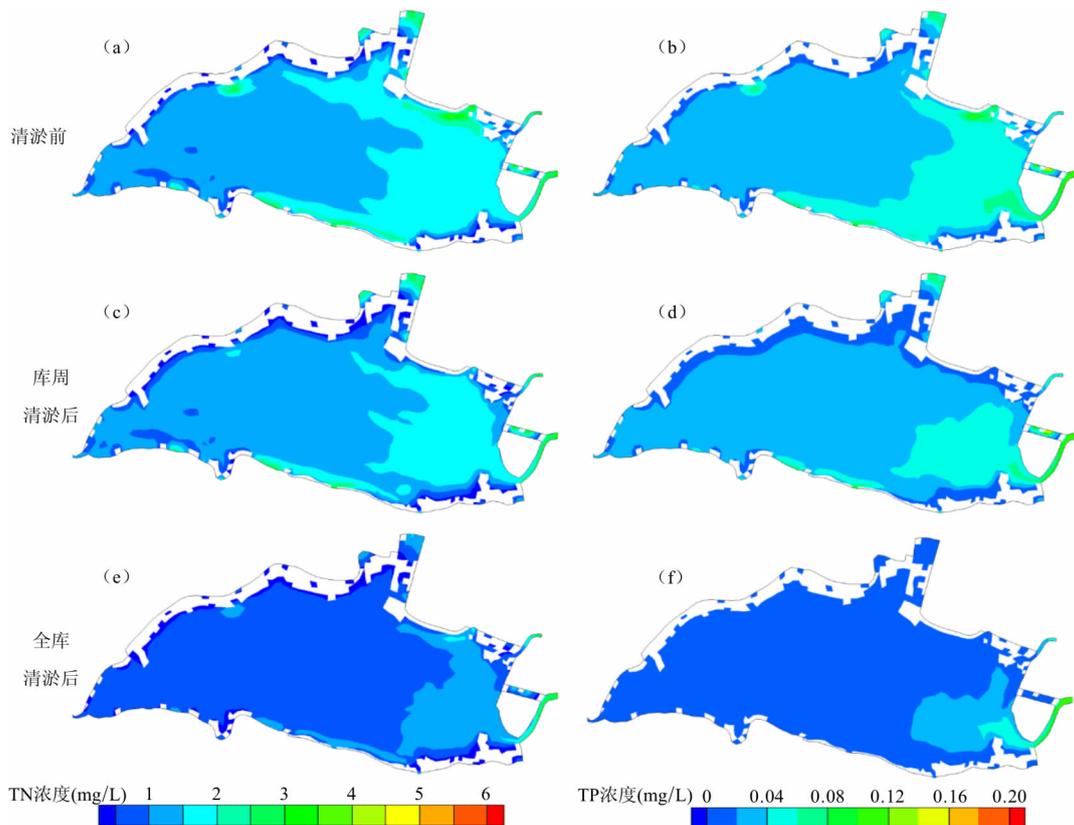


图7 未来水质背景下清淤前后水体 TN、TP 空间分布的变化

5 结论和讨论

(1) 本文基于二维浅水方程和对流-扩散-反应方程,建立了考虑沉积物-水界面物质交换的二维水动力和营养物质输移模型。结果表明,模型能够有效地模拟水库底泥氮、磷营养盐的动态释放及其与外界污染输入共同作用下水库的氮、磷营养盐的时空分布特征,可用于生态清淤工程实施效果的预测。

(2) 于桥水库底泥是重要的污染来源,底泥的清除对水库氮、磷营养盐含量有较大影响。无论是在现状或未来的入库污染负荷条件下,库周清淤或全库清

淤方案实施后,于桥水库水体的氮、磷营养物质含量均会有所下降,但年内变化过程基本不变。库周清淤对沿岸带浅水区水体氮、磷有很好的改善作用,但对库区的整体改善效果不佳(浓度降低率小于2%);而全库清淤后,整个库区水体的氮、磷浓度均明显下降(浓度降低率达到26%~48%),治理效果相对明显。清淤后底泥营养盐仍有可能随着上覆水中营养盐含量的上升而重复积累,使得新生底泥在较短时期内表现出污染“源”的特征。因此,全面的水库污染防治应该综合内源、外源污染控制、改善生态结构等措施共同开展。

(3)该模型的建立为生态清淤工程的效益评估提供了科学预测工具。在应用模型分析清淤的环境生态效应时,应充分开展沉积物-水界面物质交换实验获取准确的模型参数,提高模型预测分析的可靠性。

参考文献:

- [1] 沈颜奕,陈星. 城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):82-85+91.
- [2] 李子成,邓义祥,郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(S1):209-213.
- [3] Malecki L M, White J R, Reddy K R. Nitrogen and phosphorus flux rates from sediment in the lower St. Johns River estuary[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(4):15-45.
- [4] 薄涛,季民. 内源污染控制技术进展[J]. 生态环境学报,2017,26(3):514-521.
- [5] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学,2007,19(1):1-10.
- [6] 单玉书,沈爱春,刘畅. 太湖底泥清淤疏浚问题探讨[J]. 中国水利,2018(23):11-13.
- [7] 原居林,沈锦玉,尹文林,等. 应用浮游植物群落结构及富营养化指数评价南太湖底泥疏浚效果[J]. 水生态学杂志,2010,31(1):14-17.
- [8] 王栋,孔繁翔,刘爱菊,等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学,2005,17(3):263-268.
- [9] 徐媛,谢汝芹,卢蔚,等. 于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):1-6.
- [10] 龚春生,姚琪,范成新,等. 含内源污染平面二维水流-水质耦合模型[J]. 水利学报,2006,37(2):205-209+217.
- [11] 龚春生,姚琪,赵棣华,等. 浅水湖泊平面二维水流-水质-底泥污染模型研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):496-501.
- [12] 窦国仁. 紊流力学[M]. 北京:人民教育出版社,1981.
- [13] 赖锡军,姜加虎,黄群,等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟[J]. 湖泊科学,2011,23(6):893-902.
- [14] 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.
- [15] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G Q, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. 1994,120(7):863-0.
- [16] 文帅龙,龚婉晴,吴涛,等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量[J]. 环境科学,2018,39(5):2154-2164.
- [17] 姚重华. 废水处理计量学导论[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [18] 狄贞珍,张洪,单保庆. 太湖内源营养盐负荷状况及其对上覆水水质的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(12):3872-3882.
- [19] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕,等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学,2008,20(3):277-284.
- [20] 吴芝瑛,吴洁,虞左明. 杭州西湖水生高等植物的恢复与水生生态修复[J]. 环境污染与防治,2005,27(1):38-40+46+2.
- [21] 刘洪波,朱梦玲,王精志,等. 水库水动力对水体富营养化影响[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):19-21.
- [22] 刘洪波,朱梦玲,王精志,等. 水库水动力对水体富营养化影响[J]. Journal of Hydrology,2018,564:1022-1035.
- [23] 张明珠,麦叶鹏,孟庆强,等. 广州市东濠涌流域低影响开发措施雨洪控制效应评估[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):28-34.
- [24] 吴海春,黄国如. 基于PCSWMM模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(5):11-16.
- [25] 张继国,谢平,龚艳冰,等. 降雨信息空间插值研究评述与展望[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(1):6-9+13.
- [26] 袁定波,艾萍,洪敏,等. 基于地理空间要素的雅砻江流域雨量估算[J]. 水科学进展,2018,29(6):779-787.
- [27] ZHANG L, WANG Z. A block LU-SGS implicit dual time-stepping algorithm for hybrid dynamic meshes[J]. Computers & Fluids,2004,33(7):891-916.
- [28] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [29] 喻海军,黄国如,武传号. 双时间步法在二维浅水方程求解中的应用[J]. 水科学进展,2014,25(4):542-549.
- [30] CHEN Wenjie, HUANG Guoru, ZHANG Han, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: A case study in Haidian Island, Chi-

(上接第52页)