

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01078

宽浅型水库水体更新时间数值模拟

张少雄¹, 李昊²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要: 水体中污染物的迁移、扩散与水体更新时间密切相关。基于 EFDC 建立了宽浅型水库水动力三维数学模型, 并用水库实测资料对模型精确性进行了验证。首先利用验证后的数学模型模拟了宽浅型水库 365 d 流速场和水体更新时间, 得到了其水动力特性; 然后模拟了无风工况下的水体更新时间, 通过对比得到了风对宽浅型水库水体更新时间的影 响。研究成果可为宽浅型水库的生态调度提供理论依据。

关键词: 水体更新时间; 宽浅型水库; 流速场; EFDC; 数值模拟

中图分类号: TV 697 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 01-0078-04

Numerical Simulation of Water Renewal Time of Wide-shallow Reservoir

ZHANG Shaoxiong¹, LI Hao²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. The Third Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: The transportation and diffusion of pollutants in water body are closely related to the water renewal time, so knowledge of the water renewal time of reservoir is useful for understanding the temporal and spatial distribution of pollutants. In this paper, a three dimensional numerical model of hydrodynamics in the wide shallow reservoir was developed based on EFDC, and then the model was validated using the field data. First, the validated model was used to simulate the flow velocity field at 365 days and water renewal time of wide shallow reservoir in order to obtain the hydrodynamics characteristics. Then, the water renewal time of reservoir was simulated under the conditions of no wind in order to obtain the impacts of wind on the water renewal time of wide shallow reservoir. The results can provide theoretical reference for the ecological regulation of wide shallow reservoir.

Key words: water renewal time; wide shallow reservoir; flow velocity field; EFDC; numerical simulation

由于水库承担着灌溉、生活用水、航运等多重功能, 水库水质污染问题逐渐受到了人们的广泛关注。水体中污染物的迁移扩散与水体的水动力特性有着密切的联系。所以了解水体的运动特性对于研究水中污染物的迁移扩散具有重要意义。前人提出了若干概念来反映水体的水动力特性, 如水体更新时间、水龄和水体滞留时间等^[1-2]。水体更新时间定义为当地水体与其他水体交换率达到 63% 时所需的时间, 交换率常用水体某种物质的含量来表征^[3-4]。水体更新时间对于了解水体的运动和物质交换具有重要的作用。

水体更新时间在提出时是用于评估海洋水体输运和交换能力的, 后来逐渐引入到对湖泊、河流水体运动的描述。Tartinville 等^[5]对 Mururoa 泻湖的水体更新时间做了敏感性分析, 研究了潮流、风和出入流对于泻湖水体更新时间的影

响, 发现风对于泻湖水体更新时间的影响最为明显。Eric 等^[6]提出了用于数值模拟水体更新时间的欧拉理论, 并据此研究了英吉利海峡和北海的水动力特性, 随后许多学者^[7-9]使用水体更新时间对海洋的水动力特性进行了研究。在湖泊、河流研究方面, Liu 等^[10]根据长系列资料分析了黄河的水体更新时间和变化趋势; Shen 等^[11]利用数值模拟方法研究了大伙房水库垂向的水体更新时间, 解释了水体更新时间的变化趋势。总体而言, 前人对于水体更新时间的研究大多集中于海洋方面, 而对于湖泊和水库(尤其是宽浅型水库)的水体更新时间研究较少。

本文利用三维数值模型 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code), 以水体更新时间为指标, 对我国某宽浅型水库的水动力特性进行研究。通过数值模拟水体更新时间, 探讨

收稿日期: 2013-06-14 修回日期: 2013-11-14 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01082.html>

基金项目: 河北省教育厅资助项目(QN20131021)

作者简介: 张少雄(1984), 男, 河北定州人, 讲师, 博士, 主要从事环境水力学和工程水力学方面的研究。E-mail: zhangsx@stdu.edu.cn

宽浅型水库水体交换能力和风况对水体更新时间的影响。

1 水库概况

某水库位于山东省胶东半岛,水库总库容 16.1 亿 m³,流域面积 178 km²,水库水面面积 16 km²,水库设水温、水位监测点见图 1。近年来随着水库周边工业农业的迅速发展,流入水库中的污染物逐年增多,水库的富营养化水平已经超过了国家标准,水库水质严重恶化。为此,需要掌握水库的水动力特性,了解水库各处的水体交换能力,为利用水库调度缓解水质恶化提供理论依据。

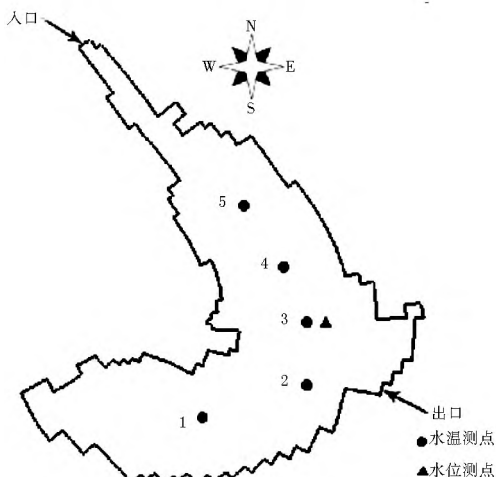


图 1 水库地理位置图

Fig. 1 Geographic location of the reservoir

2 数值模型

2.1 EFDC 数学模型

EFDC(Enviromental Fluid Dynamics Code) 是由 John M. Hamrick 开发的三维计算模型^[12],是美国水环境模拟与评价的主要研究工具,在美国应用已有一百多例。该计算模型包括水动力模块、水质模块、泥沙及重金属模块,可对河流、湖泊、海湾、河口、湿地等不同空间尺度的水流、水温、泥沙、水质进行一维、二维、三维模拟。

EFDC 模型的三维水动力学方程组(连续方程、动量方程、温度输运方程)如下:

$$Z = (Z' + h) / (\xi + h) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(m\xi)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w)}{\partial z} = Q_H \quad (2)$$

$$\frac{\partial(m H u)}{\partial t} + \frac{\partial(m_x H u u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v u)}{\partial y} + \frac{\partial(m w u)}{\partial z} - (m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}) H v = -m_y H \frac{\partial(g \xi + p)}{\partial x} - m_y (\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x}) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z}) + Q_u \quad (3)$$

$$\frac{\partial(m H v)}{\partial t} + \frac{\partial(m_x H u v)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w v)}{\partial z} - (m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}) H u = -m_x H \frac{\partial(g \xi + p)}{\partial y} - m_x (\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y}) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z}) + Q_v \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g H (\rho - \rho_0) \rho_0^{-1} = -g H b \quad (5)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (6)$$

$$\frac{\partial(m \xi)}{\partial t} + \frac{\partial(m_x H \int_0^1 u dz)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H \int_0^1 v dz)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(m H T)}{\partial t} + \frac{\partial(m_x H u T)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v T)}{\partial y} + \frac{\partial(m w T)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_T \quad (8)$$

式中: u 和 v 是曲线正交坐标 x 和 y 方向的水平速度分量; w 是垂向速度分量; m_x 、 m_y 、 m 是 Jacobian 曲线正交坐标转换因子, $m = m_x m_y$; Q_H 为体积源汇项; p 为相对静水压力, $p = \rho_0 g H (1 - z)$; b 为相对浮力, $b = (\rho - \rho_0) / \rho_0$; f 为柯氏力; A_v 为垂向紊动黏性系数; A_b 为垂向紊动扩散系数; Q_u 和 Q_v 为动量源汇项; Q_T 为温度源汇项; ρ 为水体密度; ρ_0 为参考密度; S 为盐度。

方程(1) - (7) 确定了 8 个变量 u 、 v 、 w 、 p 、 ξ 、 ρ 、 S 和 T 。垂向紊动黏性系数 A_v 和垂向紊动扩散系数 A_b 应用 Galperin 改进的模式求解^[13]。EFDC 模型将垂向紊动黏性系数 A_v 和垂向紊动扩散系数 A_b 与紊动能 q^2 、紊动尺度以及里查森数 R_q 结合起来, 关系式如下:

$$A_v = \varphi_v q l = 0.4 (1 + 36 R_q)^{-1} (1 + 6 R_q)^{-1} (1 + 8 R_q) q l \quad (9)$$

$$A_b = \varphi_b q l = 0.5 (1 + 36 R_q)^{-1} q l \quad (10)$$

$$R_q = \frac{g H \partial_z b l^2}{q^2 H^2} \quad (11)$$

稳定性函数 φ_v 和 φ_b 分别反映在稳定与非稳定垂向密度分层环境中垂向混合的减弱和增强。紊动能和紊动尺度由以下输运方程确定:

$$\begin{aligned} \partial_t(m H q^2) + \partial_x(m_y H u q^2) + \partial_y(m_x H v q^2) + \partial_z(m w q^2) = \\ \partial_z(m H^{-1} A_q \partial_z q^2) + Q_q + 2 m H^{-1} A ((\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2) + \\ 2 m g A_b \partial_z b - 2 m H (B_1 l)^{-1} q^3 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \partial_t(m H q^2 l) + \partial_x(m_y H u q^2 l) + \partial_y(m_x H v q^2 l) + \\ \partial_z(m w q^2 l) = \partial_z(m H^{-1} A_q \partial_z q^2 l) + Q_l + m H^{-1} E_1 l A_q ((\partial_z u)^2 + \\ (\partial_z v)^2) + m g E_1 E_3 l A_b \partial_z b - m H b B_1^{-1} q^3 (1 + E_2 (K L)^{-2} l^2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$L^{-1} = H^{-1} (z^{-1} + (1 - z)^{-1}) \quad (14)$$

式中: B_1 、 E_1 、 E_2 和 E_3 为经验常数, Q_q 和 Q_l 为附加的源汇项。垂向扩散系数 A_q 通常与垂向紊动黏性系数 A_v 取同样的值。

2.2 模型建立

为模拟库区复杂的地形边界, 数值模型采用 σ 坐标系。利用曲线正交网格对计算区域进行划分, 网格总数 848 个, 网格大小介于 70~ 240 m 之间, 在垂向均匀分为 4 层。入流、出流给定流量边界条件。网格划分见图 2。

2.3 模型验证

采用 2010 年水位实测资料对数值模型进行验证。水位实测值与计算值对比见图 3。由图可知, 水位计算值与实测值吻合较好, 最大误差为 0.23 m。本数学模型可以准确反映水库水位的变化规律, 可用于对水库水动力特性的研究。

3 数值模拟结果与分析

3.1 水动力特性

在有风工况下(图 4), 利用 EFDC 数值模型模拟了 2010 年某宽浅型水库全年的流速场, 计算起始日期为 5 月 1 日。图 5 和图 6 分别给出了夏季和冬季水库的流速场。由图 5 可知, 夏季在东风的作用下, 水库内形成了三个主要的环流:

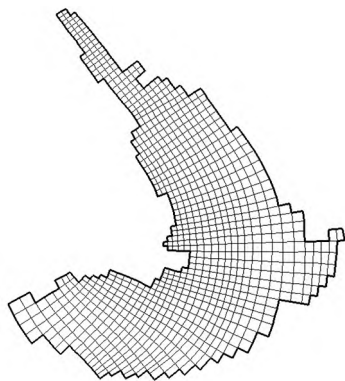


图 2 网格划分图

Fig. 2 Mesh grid of the model

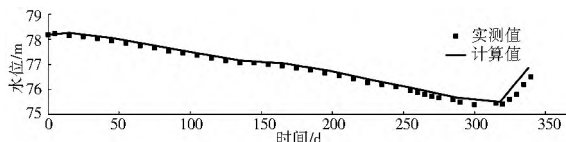


图 3 计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured data

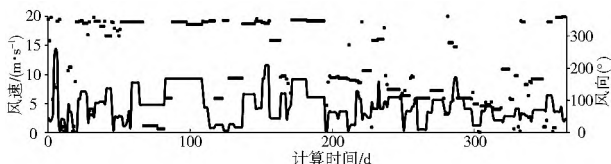


图 4 计算风速资料

Fig. 4 Wind speed data for simulation

水库中心处和西南处为顺时针环流、水库东侧为逆时针环流,环流的最大流速约为 0.11 m/s。由图 6 可知,冬季在西北风的作用下,水库内也形成三个主要的环流,但位置与夏季的环流相比更偏于北侧:水库中心处为顺时针环流、水库北侧和东侧为逆时针环流,环流的最大流速约为 0.06 m/s。

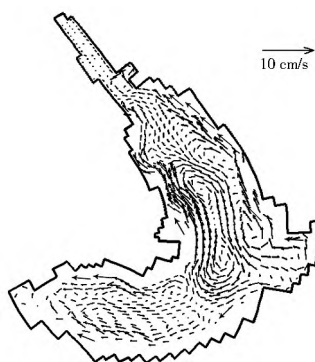


图 5 夏季流速场(第 64 d)

Fig. 5 Flow velocity field in summer (64 d)

3.2 水体更新时间

在初始时刻设定水库内物质浓度为单位 1,不考虑转化降解等因素,只考虑物质的对流扩散。在入流处给定入流浓度为 0,当水体的物质浓度减小到 0.37 的时间即为该点的水体更新时间。图 7 为水库的水体更新时间分布图。由于水流直接经水库北侧入口向南流动,于东侧的出口流出水库,因此水库北半部分水体流速较大,南半部分流速较小,水库南半部分水体的交换能力较弱。由图可知,在水库入口处水体更新时间较小,在水库南半部分水体更新时间较大,最大值为 203 d。

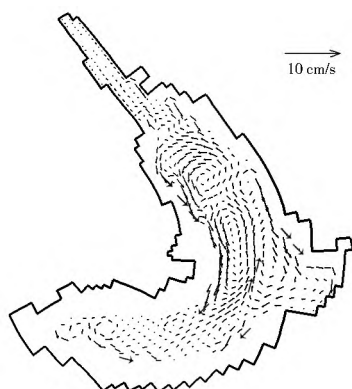


图 6 冬季流速场(第 220 d)

Fig. 6 Flow velocity field in winter (220 d)



图 7 水体更新时间分布

Fig. 7 Distribution of water renewal time

3.3 无风工况水体更新时间

为了研究风况对水体更新时间的影响,本文模拟了没有风速场时宽浅型水库的水体更新时间(图 8)。由图 8 可知,宽浅型水库在无风工况下水体更新时间最大为 358 d,远大于有风工况下的水体更新时间。可见,风速场的存在可加速水体的掺混,促进水体中污染物质的转移和扩散,对于宽浅型水库,风速场对水体更新时间的影响起着非常重要的作用。

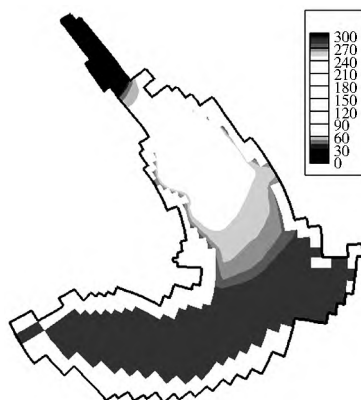


图 8 水体更新时间分布图(无风)

Fig. 8 Distribution of water renewal time (no wind)

4 结论

为了解宽浅型水库水动力特性和水体交换能力,本文研究了某宽浅型水库的水体更新时间,主要结论如下。

(1) 基于 EFDC 建立的宽浅型水库三维水动力数值模型,经验证,水库水位计算值和实测值吻合良好,表明了数值

模型的实用性和有效性。

(2) 有风工况下,宽浅型水库水体最大更新时间为 203 d。在流速较大的区域,水体更新时间短;反之水体更新时间长。

(3) 无风工况下,宽浅型水库水体最大更新时间为 358 d。无风工况下水体更新时间明显长于有风工况,表明风速场对水库水体更新时间的影响较大,有助于促进水体中污染物的迁移扩散。

参考文献(References):

[1] Zimmerman J T F. Mixing and Flushing of Tidal Embayments in the Western Dutch Wadden Sea: Part I. Distribution of Salinity and Calculation of Mixing Time Scales [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1976, 10(2): 149-191.

[2] Bolin B, Rodhe H. A Note on the Concepts of Age Distribution and Transit Time in Natural Reservoirs [J]. *Tellus*, 1973, 25: 58-62.

[3] Ranasinghe R, C Ppttiarathi. Flushing Characteristics of a Seasonally open Tidal Inlet: A Numerical Study [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14: 1405-1421.

[4] Arneborg L. Turnover Times for the Water above Sill Level in Gullmar Fjord [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 443-460.

[5] Tartinville B, Deleersnijder E, Rancher J. The Water Residence Time in the Mururoa Atoll Lagoon: Sensitivity Analysis of a Three-dimensional Model [J]. *Coral Reefs*, 1997, 17: 193-203.

[6] Eric D, Jean M C, Eric J M D. The Concept of Age in Marine Modelling I. Theory and Preliminary Model Results [J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 28, 229-267.

[7] Guyondet T, Koutitonsky V G, Roy S. Effects of Water Renewal Estimates on the Oyster Aquaculture Potential of an Inshore area [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 58: 35-51.

[8] Jin K R, Ji Z G, James R T. Three-dimensional Water Quality and SAV Modeling of a Large Shallow Lake [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33(1): 28-45.

[9] Dias J M, Sousa M C, Bertin X, et al. Numerical Modeling of the Impact of the Ancao Inlet Relocation (Ria Formosa, Portugal) [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24: 711-725.

[10] Liu Z, Wei H, Liu G, et al. Simulation of Water Exchange in Jiaozhou Bay by Average Residence Time Approach [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61: 25-35.

[11] Shen Y M, Wang J H, Zheng B H, et al. Modeling Study of Residence Time and Water Age in Dahufang Reservoir in China [J]. *Science China*, 2011, 54(1): 127-142.

[12] Zhang S X, Gao X P. Effects of Selective Withdrawal on Temperature of Water Released of Glen Canyon Dam [A]. *The International Conference on Environmental Pollution and Public Health [C]*. Chengdu, China, 2010, 1-4.

[13] Zhang B, Lv J, Huo P, et al. Application of EFDC to Density Stratified Flow [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 256: 2486-2489.

(上接第 49 页)

改善,但仍有缺口。可见,未来江苏省的水资源已不能满足本地的国民经济发展和社会需求。

由于本地节水措施实施不到位导致水资源大量浪费,因此要实现区域水资源平衡,江苏省最应做的是在全省加强节水工作。节水工作要从各方面同时入手,增强人们保护水资源和节水意识。节水是实现区域水资源平衡的一条重要途径,但不是唯一途径。比如,还可利用河、湖、塘蓄水,增加调蓄设施,配以提引水工程,以丰水年拦蓄的汛期降雨径流弥补枯水年的短缺;进行产业结构调整、农业种植结构调整和时空调度。另外,外调水同样也是实现区域水平衡的主要途径。

参考文献(References):

[1] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论 [J]. *水利水电技术*, 2002, 33(1): 15-19. (LIU Chang-ming. Discussion on Some Water Resources Problems in China in Twenty-first Century [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, 33(1): 15-19. (in Chinese))

[2] 周益,李援农. 石羊河流域水资源供需平衡分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(6): 86-89. (ZHOU Yi, LI Yuan-nong. Water Resources Supply and Demand Analysis in Shiyang River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, 19(6): 86-89. (in Chinese))

[3] 顾世祥,李俊德,谢波. 云南省水资源合理配置研究 [J]. *水利水电技术*, 2007, 38(12): 54-58. (GU Shi-xiang, LI Jun-de, Xie Bo. Study on Reasonable Allocation of Water Resources in Yunnan Province [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(12): 54-58. (in Chinese))

[4] 李彦红. 基于供需平衡的济宁市水资源优化配置研究 [R].

2011. (LI Yan-hong. The Optimal Allocation Research of Water Resources Based on Supply and Demand Balance in Jining City [R]. 2011. (in Chinese))

[5] 王振江. 系统动力学引论 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988. (WANG Zhen-jiang. Introduction to System Dynamics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988. (in Chinese))

[6] 江苏省人民政府办公厅. 江苏省水资源“十二五”综合规划 [R]. 2007. (The General Office of the People's Government of Jiangsu Province. The Water Resources “twelve fifth” Planning in Jiangsu Province [R]. 2007. (in Chinese))

[7] 江苏省水利厅. 江苏省水资源公报 [Z]. 2005-2010. (Water Resources Department of Jiangsu Province. Water Resources Bulletin of Jiangsu Province [Z]. 2005-2010. (in Chinese))

[8] 江苏省统计局. 2010 年江苏省统计年鉴 [M]. 江苏: 江苏统计出版社, 2010. (Statistics Bureau of Jiangsu Province. Statistical yearbook of Jiangsu Province [M]. Jiangsu: Jiangsu Statistical Press, 2010. (in Chinese))

[9] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术大纲 [R]. 2002: 35-36. (Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute of Ministry [R]. The National Integrated Water Resources Planning Technology. 2002: 35-36. (in Chinese))

[10] 张黎渊. 基于三次平衡原理的水资源供需平衡分析 [J]. *河南水利与南水北调*, 2008, (1): 19-20. (ZHANG Li-yuan. Water Supply and Demand Balance Analysis Based on the “three time” Balance Principle [J]. *Henan Water Conservancy and the South to North Water Diversion Project*, 2008, (1): 19-20. (in Chinese))