

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.011

基于 EFDC 模型的人工湖水质保障最佳运行方式研究

郭鹏程¹, 轩晓博^{1,2}, 闫大鹏¹

(1. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以石家庄市正定湖为例, 基于 EFDC 水环境数学模型确定引水规模, 分析风场因素对人工湖调水置换效果的影响, 并根据不同风向、风速的风场叠加后湖区水龄模拟结果, 探明最有利于调水的外部环境条件: 正定湖最佳引水风向为偏北风, 风速为 5 m/s 时, 实现 80% 水体交换需要 2~3 d。
关键词:水质保障; 人工湖; 引水; 水龄; EFDC 模型
中图分类号:TV2147 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)01-0053-04

Optimal scheme of water quality assurance in artificial lakes based on EFDC model

GUO Pengcheng¹, XUAN Xiaobo^{1,2}, YAN Dapeng¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking Zhengding Lake in Shijiazhuang City as a case study, the EFDC model was used to determine the scale of water diversion, and the influence of the wind field on the water exchange of the artificial lakes was analyzed. According to the simulation results of the water age of the lake with different wind directions and at different wind velocities, the most favorable environmental conditions for water diversion were found as follows: when the wind direction that was most favorable for water diversion was slightly northerly and the wind velocity was 5 m/s, the exchange of 80% water took two to three days.

Key words: water quality assurance; artificial lake; water diversion; water age; EFDC model

正定湖位于河北省石家庄市, 为滹沱河上规划建设的大型人工湖泊, 占地面积 4.7 km², 设计正常蓄水量 1 352 万 m³。湖中分布有太阳岛、月亮岛、金星岛、木星岛、水星岛、火星岛和土星岛 7 座岛屿, 如图 1 所示。正定湖主要由黄壁庄水库退水形成, 经长期运行, 水质恶化至设定标准后, 需从黄壁庄水库引水进行换水, 以改善湖区水环境质量。为节约引水资源量, 开展正定湖水质保障最佳运行方式的研究十分必要。

目前, 应用于湖泊、河流水质水动力研究中较为成熟的数值模型主要有 EFDC、MIKE 和 WASP 等。采用相关模型来辅助具体河湖工程生产设计的研究较多, 如李一平等^[1-7] 分别应用 EFDC 和 WASP 模型

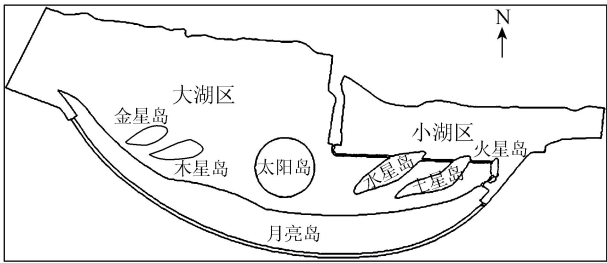


图1 正定湖大、小湖区及岛屿分布示意图

对湖泊和河流进行数值模拟, 为完善相关河湖的综合治理提供科学参考, 取得了较好的实际应用效果。

本研究主要采用 EFDC 水动力数学模型的水龄模拟功能, 确定正定湖引水时较优的外部环境条件, 为制定最佳的水质保障方案提供技术参考。水龄可

作者简介: 郭鹏程 (1981—), 男, 工程师, 主要从事河湖水环境保护及规划设计工作。E-mail: guopch@yrec.cn

定义为颗粒物从入口处传输到指定点的时间(入口的水龄通常设为零)^[8],其计算公式见参考文献[9]。水龄越大,说明水体运动越慢,水体被交换程度也越弱。

1 数学模型的构建和模拟方案的制定

1.1 EFDC 模型基本原理

EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好地拟和近岸复杂岸线和地形。采用修正的 Mellor-Yamada 2.5 阶湍封闭模式较客观地提供垂向混合系数,避免人为选取造成的误差。以下为动量方程、连续方程及状态方程。

动量方程:

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y Hu) + \partial_x(m_y Huu) + \partial_y(m_x Hvu) + \\ &\partial_z(m_x m_y wu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv = \\ &-m_y H\partial_x(g\xi + p) + m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \\ &\partial_z\left(m_x m_y \frac{A_v}{H}\partial_z u\right) + Q_u \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y Hu) + \partial_x(m_y Huv) + \partial_y(m_x Hvv) + \\ &\partial_z(m_x m_y wv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu = \\ &-m_x H\partial_y(g\xi + p) + m_x(\partial_y h + z\partial_y H)\partial_z p + \\ &\partial_z\left(m_x m_y \frac{A_v}{H}\partial_z v\right) + Q_v \end{aligned} \tag{2}$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \tag{3}$$

连续方程:

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(mw) = 0 \tag{4}$$

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x\left(m_y H\int_0^1 u dz\right) + \partial_y\left(m_x H\int_0^1 v dz\right) = 0 \tag{5}$$

状态方程:

$$\rho = \rho(p, S, T) \tag{6}$$

式中: m_x 和 m_y 分别为度量张量对角元素的平方根; H 为总水深; u 、 v 、 w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; $m = m_x m_y$, 为度量张量行列式的平方根; f 为科里奥利系数; g 为重力加速度; ξ 为自由水深; p 为压力; h 为相对于湖底的垂向坐标; A_v 为垂向紊动黏滞系数; Q_u 、 Q_v 分别为 x 、 y 方向上的动量源汇项; ρ 为混合密度; ρ_0 为参考密度; b 为浮力; S 为盐度; T 为温度。

本研究中盐度 $S = 0$, 并假设水为不可压缩流体,密度 ρ 和水温 T 为常量。

1.2 模型构建

根据正定湖湖区实测地形数据,提取正定湖岸线和地形坐标,划分计算网格。将正定湖橡胶坝西

侧的大湖区和东侧的小湖区分开计算(大湖区与小湖区相对位置见图 1。换水时,黄壁庄水库下泄水首先进入大湖区,后经由橡胶坝再进入小湖区。由于小湖区面积较小,形态较为简单,因此,本文分析的重点为正定湖大湖区,结论仅针对大湖区的模拟成果)。大湖区和小湖区网格数分别为 40 105 和 11 353 个,水平方向和垂直方向网格间距均为 10 m。垂向利用 σ 坐标,均匀分表、中、底 3 层,每层平均水深约 1 m。

1.3 模拟方案的制定

根据石家庄市水文气象资料、正定湖工程设计方案,以及正定湖上游各水利工程的调度运行情况,确定正定湖较优的调水流量为 50 m³/s。为研究该调水流量条件下外界环境中的风场因素对湖区水体置换效果的影响,特制定 5 套运行方案,见表 1。

表 1 研究风场因素对正定湖水体置换影响的 5 套方案

方案	调水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	风速/(m ³ ·s ⁻¹)	风向
1	50	0.0	无风向
2	50	1.8	东南风
3	50	5.0	东南风
4	50	10.0	东南风
5	50	5.0	偏北风

注:石家庄常年风速为 1.8 m/s,盛行风向为东南风和偏北风。

2 风场对大湖区水龄空间分布的影响

根据模型的运算结果,正定湖的水龄一般在 6 d 后达到稳定。为确保计算结果的稳定性和代表性,选取模型模拟最后 1 d 的结果进行分析(图 2)。

根据图 2 的模拟结果,在不同风场条件下,小于某一水龄值的分布面积占总面积的百分比(该值主要反映水体交换的程度)见表 2。

由表 2 方案 1~5 的水龄分布面积比值可知,调水流量为 50 m³/s,东南风,风速分别为 0.0、1.8、5.0 和 10.0 m/s 时,如果使正定湖 80% 的湖区水体被交换,调水时间分别需要 3~4 d、3~4 d、2~3 d 和 2~3 d。说明随着外界风速的增大,水体的交换效果变好。当风向为偏北风,风速为 5 m/s 时,实现 80% 的水体被交换需要 2~3 d,与东南风、风速 5 m/s 时相比,水龄较小的区域所占面积明显较大,这表明偏北风时更有利于水体的交换。这主要与偏北风所形成的风生流场可以增强正常引水时的流场对流扩散效果,促进水体的交换,进而缩短水龄;而东南风向所形成的风生流场会减弱正常引水时的水体交换效果,增加水龄。

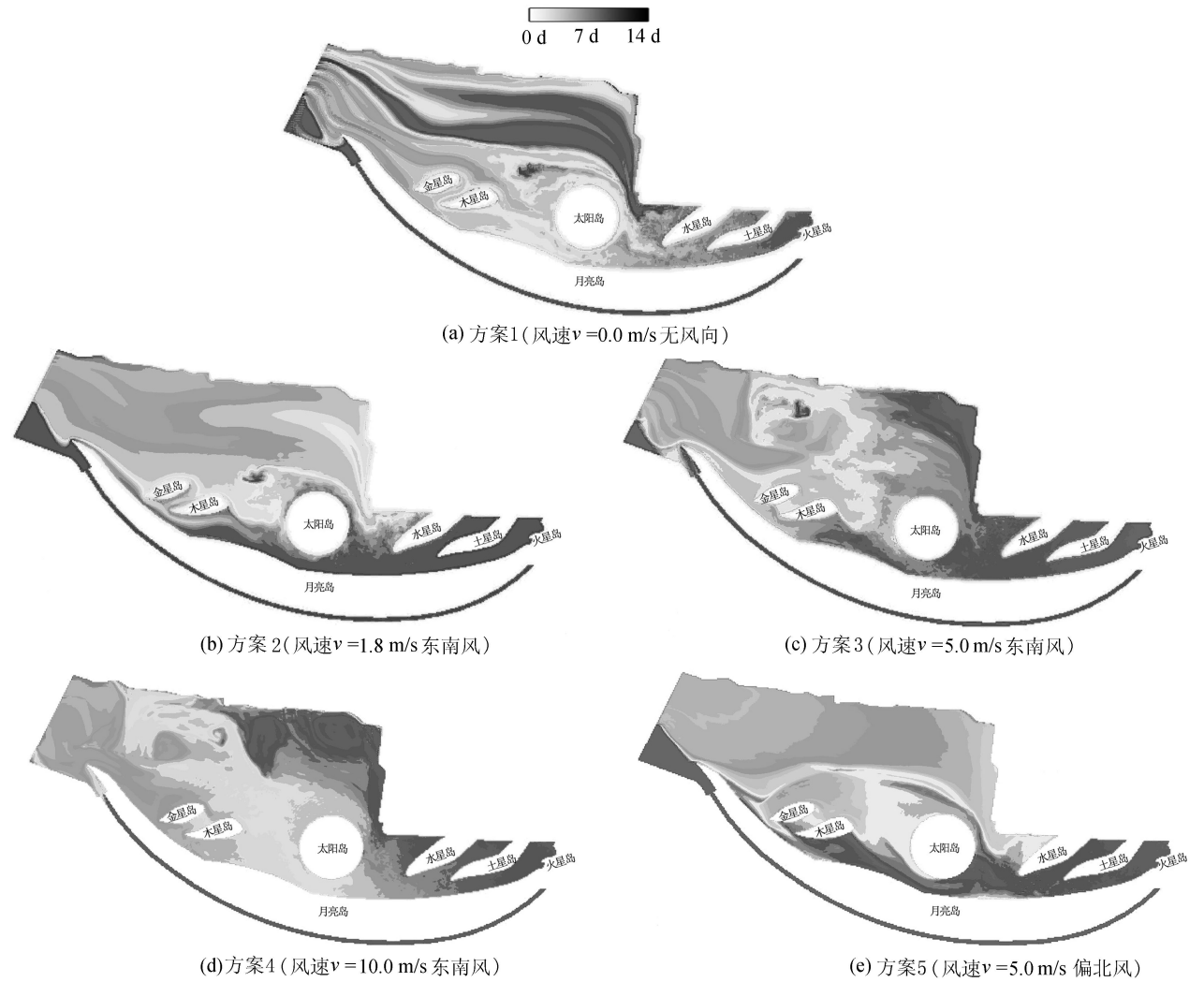


图 2 设计方案下湖体水龄的空间分布

表 2 各方案水龄分布的面积比值

%

方案	小于某一水龄值的分布面积占总面积的百分比										
	<0.5 d	<1 d	<2 d	<3 d	<4 d	<5 d	<6 d	<8 d	<10 d	<12 d	<14 d
1	0.8	3.5	24.0	62.5	88.2	95.2	95.4	95.6	95.8	96.0	96.1
2	0.6	3.8	40.2	69.7	86.6	93.8	94.2	95.4	95.9	96.3	96.5
3	6.8	15.9	59.8	93.1	95.7	96.2	96.4	96.5	96.6	96.7	96.8
4	3.2	14.4	60.4	95.6	96.4	96.5	96.6	96.7	96.7	96.8	97.0
5	24.4	45.1	74.6	92.6	93.2	93.8	94.3	95.3	95.8	96.3	97.3

3 结 语

利用 EFDC 水环境数学模型,确定风场因素是影响湖区水体交换能力的一个重要因素,正定湖最佳引水风向为偏北风。

利用 EFDC 数学模型的水龄模拟技术,为湖泊引水规模和外部引水环境条件的确定提供技术支撑,也可为人工湖泊水质保障最佳运行方案的制定提供依据。

参考文献:

[1] 李一平,唐春燕,余钟波. 大型浅水湖泊水动力模型不

确定性和敏感性分析[J]. 水科学进展,2012,23(2): 271-276. (LI Yiping, TANG Chunyan, YU Zhongbo. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models [J]. Advances in Water Science, 2012,23(2):271-276. (in Chinese))

[2] SEO D,SIGDEL R,KWON K H,et al. 3-D hydrodynamic modeling of Yongdam Lake, Korea using EFDC [J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 19 (1/3): 42-48.

[3] GUO Z W,ZONG X X. Prediction of algal blooming using EFDC model: case study in the Daoxiang Lake [J]. Ecological Modelling, 2011, 222:1245-1252.

[4] FENG L, RUI J L. 3D water environment simulation for

North Jiangsu offshore sea based on EFDC [J]. Earth & Environmental Sciences,2009,1(1):42-47.

[5] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(6G): 136-140. (LIU Xiaming, LI Junqing, DOU Xiaomin, et al. The application and advance of environmental fluid dynamics code (EFDC) in estuarine water environment [J]. Environmental Science & Technology,2012,10(4):57-60. (in Chinese))

[6] 李林子,钱瑜,张玉超. 基于 EFDC 和 WASP 模型的突发水污染事故影响的预测预警[J]. 长江流域资源与环境,2011, 20 (8): 1010-1016. (LI Lingzi, QIAN Yu, ZHANG Yuchao. Forecasting and warning the accidental water pollution effect based on the EFDC and WASP [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011, 20(8):1010-1016. (in Chinese))

[7] 谢锐,吴德安,严以新,等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2010,25(2):165-174. (XIE Rui, WU Dean, YAN Yixin. Application and improvement of the EFDC in numerical simulating of Yangtze River Estuary and adjacent sea [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012,10(4):57-60. (in Chinese))

[8] 郝文彬,唐春燕,滑磊. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012, 40 (2): 129-133. (HAO Wenbin, TANG Chunyan, HUA Lei. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40 (2): 129-133. (in Chinese))

[9] LI Yiping, ACHARYA K, YU Zhongbo. Modeling impacts of Yangze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2010, 37 (2): 325-334.

(收稿日期:2013 - 05 - 16 编辑:彭桃英)

• 简讯 •

中央加大水利投资力度 支撑水资源可持续发展

2013 年中央水利投资 1408 亿元,带动全社会水利建设投资 4397 亿元,投入给力,建设提速,为“稳中有进”提供了有力的“水支撑”。

2013 年中央水利资金 72% 投向民生,重点小(2)型水库全部除险加固,2058 个县实施山洪灾害防治,消除威胁群众安全的防洪隐患;解决灌溉“最后一公里”问题,小农水重点县覆盖产粮大县和主要农业大县;加快解决农村人口饮水安全问题,让 6343 万农村居民喝上放心水;江河湖库水网体系加快建设,提高供水保障能力。大型灌区改善灌溉面积 1648000 hm²,小农水项目新增粮食生产能力 94 亿 kg,全国新增高效节水灌溉面积 3333.33 多 hm²,为实现粮食产量“十连增”提供了坚实的水利保障。全年减淹耕地 8666.66 多 hm²,避免 156 座县级以上城市受淹,因灾死亡人数大大降低,防洪减灾效益达 2361 亿元。加快推进城乡重点水源工程建设,实施引江济太、珠江调水、塔河调水等调度任务,全国供水能力超过 7000 亿 m³。

站在新起点,水利改革向纵深推进:从 2011 年起,中央提出土地出让收益的 10% 用于农田水利,给农田水利建设注入活力。中央财政资金“四两拨千斤”,2013 年全国农村水利投入超过 2000 亿元,形成公共财政投入为主、社会投资为补充的多元化投入增长机制。在全国,基层水利站恢复建立 2.9 万个,成立农民用水户协会 7.8 万个,各级抗旱服务队 14064 支,基层水利服务基本实现了全覆盖。在水乡江苏,1190 位“河长”管河护河,率先出台河湖健康评估报告,实施一河一策,昔日一条条黑臭河道清水复流。截至 2012 年底,全国万元 GDP 用水量下降到 225 m³,农业灌溉水有效利用率提高到 0.516。

今后将继续加大农田水利建设力度,全面推进东北节水增粮、西北节水增效等高效节水灌溉工程建设。严守水资源管理“三条红线”,控制指标已覆盖 95% 的地级行政区和 700 个县市。以水定需、量水而行,各地用水阀门越拧越紧;北京严控地下水,各区县一律不再批准新增机井,山东对超计划取水的累进加价,四川实行水资源论证一票否决。

全国开展了 100 个国家级和 200 个省级节水型社会建设试点,带动了节水型社会建设向深层次发展。水生态文明建设 46 个试点城市探索以江河湖库水系连通为途径,促进生态自然修复,推动节约集约利用水资源。科学谋划一批重大工程,加快实施重大引调水及河湖水系连通工程,提高水利支撑和保障能力。

(本刊编辑部转摘自 http://www.mwr.gov.cn/slxz/mtzs/rmrb/201401/t20140102_546576.html)