

寒冷地区水库水环境数值模拟研究

毛祥明¹, 武国正^{2,3*}, 任春涛⁴

(1.攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000; 2.西华师范大学 地理科学学院,
四川 南充 637009; 3.国科创(北京)信息技术有限公司, 北京 100070;
4.呼和浩特市丰泽水利勘测设计有限公司, 呼和浩特 010000)

摘要:【目的】揭示寒冷地区季节性冰封水库明水期和冰封期的水动力与水质变化规律。【方法】以中国北方寒冷地区平原型水库—新立城水库为研究对象, 基于水环境流体动力学, 构建三维水动力水质模型, 对一个完整水期(包括明水期和冰封期)的水温和总磷(TP)浓度进行模拟, 对模型参数进行率定和验证。【结果】水库水位模拟值与实测值之间的平均相对误差(MRE)为 4.47%, 水温的 MRE 为 12.5%, TP 浓度在 3 个采样点的 MRE 均小于 20%。【结论】三维水动力水质模拟结果能够客观反映新立城水库水动力、水温和 TP 浓度在明水期和冰封期的变化过程, 可为水库水环境管理提供参考依据。

关键词: 寒冷地区; 水库; 水环境; 数值模拟

中图分类号: TV91

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023270

OSID:



毛祥明, 武国正, 任春涛. 寒冷地区水库水环境数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 157-164.

MAO Xiangming, WU Guozheng, REN Chuntao. Numerical Simulation of Reservoir Water Environment in Cold Regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 157-164.

0 引言

【研究意义】寒冷或高海拔地区的河流、水库、湖泊通常会经历季节性冰封期。受冰面覆盖影响, 这些水体在冰封期的水动力和水环境变化过程与明水期存在显著差异。构建水动力水质模型, 研究寒冷或高海拔地区在冰封期的水库水动力和水环境变化特征, 对于指导寒冷或高海拔地区的水环境管理具有重要意义。【研究进展】受冰封期水样采集困难的限制, 冰封期水动力和水环境变化研究的相对较少。Terry 等^[1-2]采用 CE-QUAL-W2 模型对加拿大 Buffalo Pound 湖的水体富营养化过程和溶解氧浓度进行了模拟。Shakibaenia 等^[3]分别采用 MIKE11 和 EFDC 模型对加拿大 Athabasca 河的水动力和营养物浓度进行了模拟。Stefanovic 等^[4]构建了美国明尼苏达州 Ryan 湖的二维水动力与水质模型, 模拟了水温和溶解氧浓度的变化过程。Oveisy 等^[5]采用 ELCOM-CAEDYM 模型对北美洲 Erie 湖冰封期的水动力、水温分层和水质变化过程进行了研究。闫慧荣等^[6]构建了冰封期水温数

值模型, 探讨了冰水热力学特性。孙少晨等^[7]利用水动力水质耦合模型对 2005 年松花江污染事件进行了模拟, 还原了污染水质变化过程。王志刚^[8]根据冰封河流的阻力特征和水流特性建立了冰封河流高精度水流-水质模型, 并应用于牡丹江城市段冰封期的水质特征和混合特性研究。【切入点】当前, 我国已建成各类水库约 10 万座, 其中相当一部分水库位于北方寒冷地区, 每年约 3~5 个月的时间为冰封期。对于这类型水库, 以往研究多集中于水质评价^[9]、生态健康评价^[10]、污染物特征研究^[11]等方面, 而对于冰封期水库水动力水质过程的模拟研究较少。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以中国东北地区的典型平原型水库—新立城水库为研究对象, 通过构建三维水动力水质模型来模拟明水期和冰封期的水库水动力、水温和 TP 浓度变化过程, 揭示其变化规律, 为寒冷或高海拔地区的水库水环境管理和调度运行提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

新立城水库位于吉林省长春市上游 16 km 处, 位于伊通河流域境内。水库上游来水主要有伊通河和伊丹河, 控制流域面积 1 970 km², 水库长 16 km, 宽 6 km, 平均水深 5 m, 最大水深 10 m, 总库容 5.92×10⁸

收稿日期: 2023-06-16

修回日期: 2023-08-30

作者简介: 毛祥明(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事水土资源保护与水环境治理研究。E-mail: maoliangming@pzhz.edu.cn

通信作者: 武国正(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事水环境综合治理研究。E-mail: wgz08@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

m^3 , 属于典型的平原宽浅型水库^[12-14]。水库冰封期较长, 初冰期一般发生在 10 月中旬, 11 月中旬封冰, 4 月中旬开始解冻, 4 月下旬冰封期结束, 冰期约为 6 个月。最大冰厚约为 0.9 m, 通常出现在 1 月末—2 月初^[15]。新立城水库存在库底淤积、水体富营养化等问题。以往研究对新立城水库的水质进行了评价^[16-20], 指出其主要水体污染物为氮、磷。

将 2012 年 4 月 1 日—2013 年 4 月 15 日作为一个完整水期 (包括明水期和冰封期), 对该时段内的水库水动力、水温及 TP 浓度变化过程进行了模拟。模拟期内水库的入库流量、大坝泄水流量、引水工程取水流量、水位及水质监测数据均来源于当地的水库管理部门。在库区内设置 3 处水质采样点 (图 1), 分别位于河道入库口 (F#)、库心 (T#) 和坝前 (L#), 分别代表水库的河流区、过渡区和湖泊区。采样深度为水面以下 0.5 m 处, 采样频次为每月 1 次。研究期内的气象数据由长春市气象局提供。

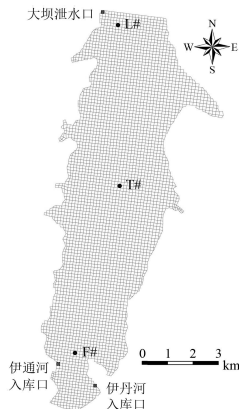


图 1 新立城水库水质采样点及网格划分

Fig.1 Water quality sampling sites and grid division of Xinlicheng reservoir

1.2 水动力水质模型

水环境数值模拟是地表水的水动力和水质变化规律研究的重要手段。截至目前, 国外已开发了众多水动力水质模型, 每种模型的原理、算法和适用范围各有侧重^[12]。在这些模型中, EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code) 是一种应用较广的多参数有限差分模型, 适用于河流、湖泊、水库、湿地、河口、海湾、海洋等水体的一维、二维和三维水动力水质模拟。该模型由水动力、水质、有毒物质、底质、风浪和沉积物 6 个模块组成, 可模拟流场、物质输移以及水体富营养化过程^[13]。

EFDC 模型中的流体动力学方程基于三维不可压缩、梯度密度湍流边界层方程组, 包括动量方程、连续方程和物质输移方程。为了便于处理由于密度差而引起的浮升力项, 该模型采用了 Boussinesq 假设。在水平方向上采用曲线正交坐标变换, 在垂直方向上采

用 sigma 坐标变换。其算法及求解过程详见文献^[13]。

1.3 网格划分

基于 EFDC 模型对水库水体进行网格划分, 共划分为 3 822 个网格, 在垂直方向上将水体平均分为 3 层。网格面积介于 $7\,047 \sim 42\,637 \text{ m}^2$ (图 1)。由于新立城水库属宽浅型水库, 其水位变动对面积的影响较大, 因此模型启用“干湿”网格功能, 即当水位下降时, 库底出露的网格由“湿网格”变为“干网格”, 此时的“干网格”不再参与模型计算。当“干网格”被水淹没时, 则重新变为“湿网格”参与计算。

根据水库实测水深, 对网格底部高程进行插值处理 (图 2), 绘制其水位—面积、水位—库容关系曲线, 并与实测的关系曲线^[21]进行对比。由图 3 的拟合曲线可知, 模型所反映的水库特征与实际特征能够较好地吻合, 可为水质模拟提供水动力学基础。

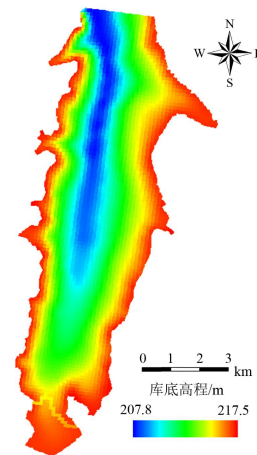


图 2 库底高程示意

Fig.2 Bottom elevation diagram of Xinlicheng reservoir

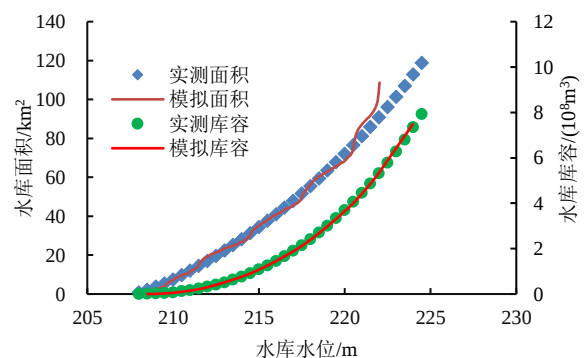


图 3 模拟与实测水位—面积、水位—库容关系曲线

Fig.3 Comparisons of simulated and measured values of water level, area and storage capacity

1.4 初始条件和边界条件的设置

求解水动力水质方程时, 首先需要设置初始条件和边界条件。初始条件指定为模拟开始时的水体状态, 如水位、水深、污染物浓度分布等。边界条件是模型模拟的驱动力, 包括出入库流量、入库水温、入库污染物浓度和气象条件。通常情况下, 初始条件对模型

的影响会很快消除^[22]，但为了确保模型计算精度，本研究以 1 个库容变化周期（预热期）的水动力水质计算结果作为模拟期的初始条件，将预热期最后 1 次计算得到的模拟结果作为模拟期的初始条件输入模型。以往研究表明，新立城水库平均水力停留时间约为 518 d^[14]，因此，本研究以 2010 年 11 月 1 日—2012 年 3 月 31 日作为模拟预热期，将预热期最后一次模拟结果作为模型的初始条件。

入库流量边界条件包括伊通河、伊丹河入库流量。其中，伊通河的入库流量是基于实测流量，时间范围为 2012 年 4 月 1 日—2013 年 4 月 15 日。伊丹河因缺少实测流量，因此参考伊通河实测流量，采用流域面积同倍比缩放法计算得到其入库流量。出库流量为实测大坝下泄流量和引水工程取水流量。入库水温边界条件包括伊通河、伊丹河入库水温。模拟期内，2 条河流的入库水温均每月监测 1 次。入库水质边界条件包括伊通河、伊丹河的入库 TP 浓度。其中，伊通河入库 TP 浓度的监测期为 2012 年 5—10 月和 2013 年 3—4 月，每月监测 1 次。伊丹河入库 TP 浓度仅在 2012 年 5 月 25 日进行了 1 次监测，因此伊丹河模拟期 TP 浓度设定为恒定值，即采用 2012 年 5 月 25 日的实测值。气象边界条件主要包括气温、相对湿度、降水量、风速、风向和太阳辐射量。研究区平均风速为 3.9 m/s，风速较小，对水库水体流动过程影响较小，故本模型未考虑风速的影响。

1.5 模型参数和率定方法

采用序贯试验法对模型参数进行率定，每次率定均在可行范围内修改所率定的参数，通过多次试验找到理想的参数组合。率定的参数结果如表 1 所示。选取最优参数组合的准则是模型输出结果与观测值之间的平均相对误差（*MRE*）达到期望范围，一般认为 *MRE* 在 20% 内即可接受。

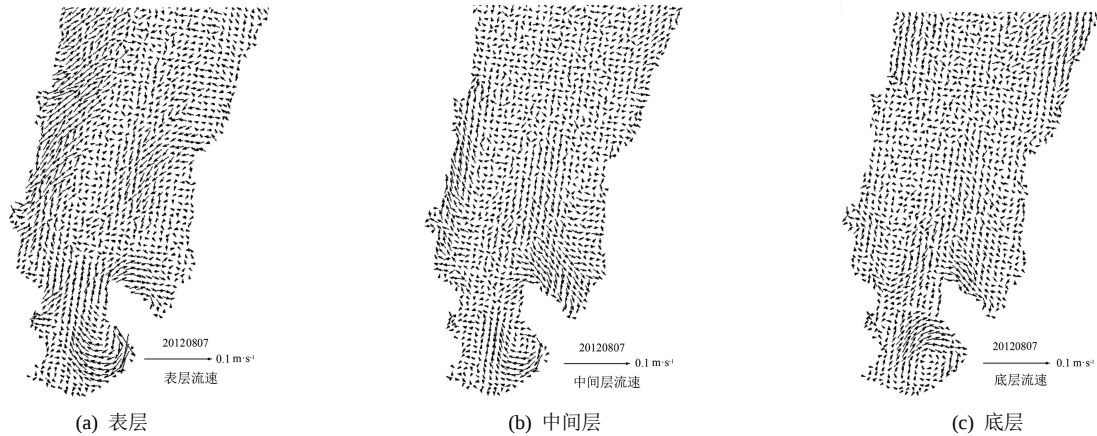


图 5 新立城水库河区典型流场模拟结果

Fig.5 Typical schematic diagram for fluvial zone flow field in Xinlicheng reservoir

2.2 水温

L#采样点的表层水温模拟值与实测值之间的

2 结果与分析

2.1 水动力过程

新立城水库水位模拟值与实测值之间的 *MRE* 为 4.47%（图 4），表明所构建的模型能够反映模拟期内的水动力变化过程。图 5 为水库河区明水期分层流场的模拟结果，表层流速（图 5（a））大于底层流速（图 5（c）），这是由于表层为自由水面，受外部阻力（空气阻力）的影响较小，而底层流速则因底泥拖拽作用的影响而变缓，中间层流速（图 5（b））介于表层和底层流速之间。

表 1 模型参数及率定结果

参数	定义	率定结果	单位
ZROUGH	库底糙率	0.035	m
AHO	恒定水平扩散系数	1.0	m ² ·s ⁻¹
AHD	水平动量扩散系数（无量纲）	0.05	-
AVO	分子涡流（运动）粘度	1.0×10 ⁻⁷	m ² ·s ⁻¹
ABO	分子扩散系数	1.0×10 ⁻⁸	m ² ·s ⁻¹
BSC	浮力影响系数	1.0	-
HEQT	平衡温度传导系数	1.0×10 ⁻⁶	m·s ⁻¹
RKDYE	总磷浓度衰减系数	0.006	d ⁻¹

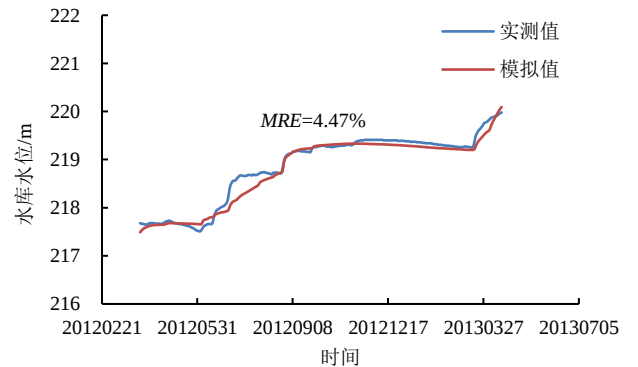


图 4 新立城水库水位模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and measured water level values of Xinlicheng Reservoir

MRE 为 12.9%（表 2），表明模型能够较好地反映模拟期内 L#点表层水温的变化过程。由图 6 可知，4 月

初一10月下旬(明水期),表层水温的变化趋势与气温变化一致;11月上旬—次年4月上旬(冰封期),表层水温基本维持在冰点附近。F[#]和T[#]采样点的表层水温变化过程与L[#]采样点的变化过程基本一致。

表2 L[#]采样点表层水温模拟值与实测值统计分析结果

Table 2 Statistical results for simulated and observed surface water temperature at L[#] sampling site

时间	实测值	模拟值	MRE/%
20120406	2.00	2.08	4.1
20120503	11.00	10.82	1.6
20120606	20.00	17.77	11.2
20120703	23.00	21.24	7.7
20120801	25.00	24.40	2.4
20120903	19.00	22.24	17.1
20121008	11.00	14.71	33.7
20121101	1.00	0.89	10.7
20121203	0.50	0.42	16.0
20130101	0.30	0.25	16.7
20130205	0.60	0.48	20.0
20130304	2.20	2.10	4.5
20130407	3.20	2.48	22.4
MRE/%			12.9

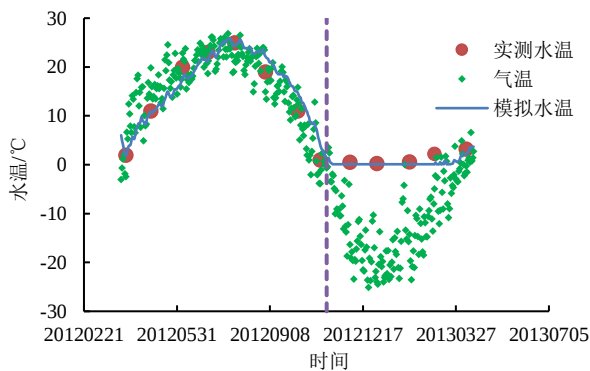
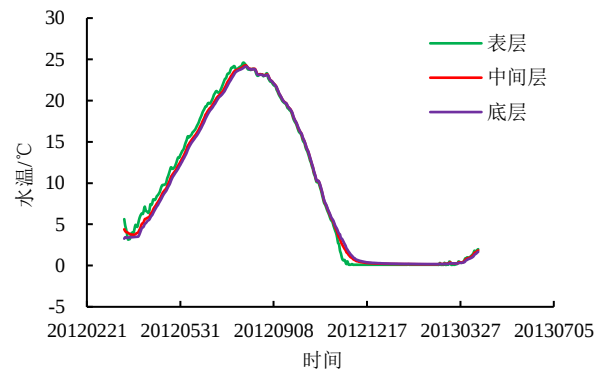


图6 L[#]采样点表层水温模拟值与实测值对比

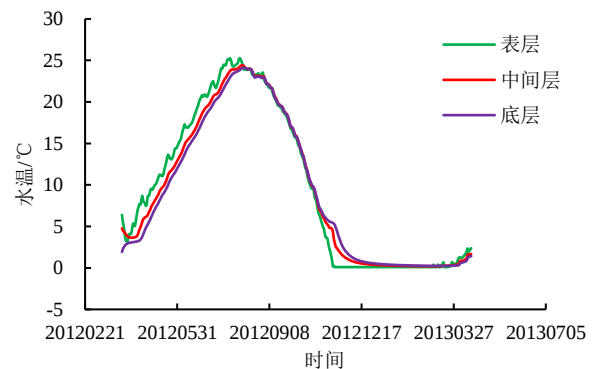
Fig.6 Comparison between simulated and measured surface water temperature values at L[#] sampling site

由图7和图8可知,各层水温变化过程可分为3个阶段。第一阶段(2012年4月12日—2012年8月10日)处于气温上升期,受太阳辐射增强的影响,各层水温均呈上升趋势。在这段时期内,水体以热量吸收为主,热量由表层逐渐传导至底层,温度梯度呈表层高底层低的特征。第二阶段(2012年8月11日—2012年10月31日)处于气温下降期,随着气温的逐渐下降,各层水温均呈下降趋势,这段时期的水体与大气热量交换的特点是吸收-释放-吸收的循环过程。日间气温高于表层水温,水体以吸热为主,夜间气温低于表层水温,水体以散热为主。因此,该时期的水温即有从表层向底层传导的过程,也有底层向表层传导的过程,水体热量总体上处于动平衡状态,因此各

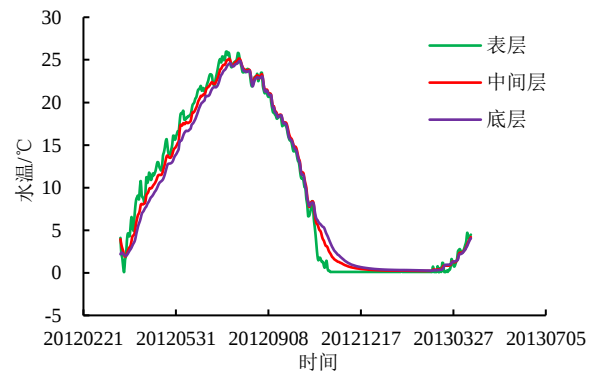
层水温之间的温差较小。第三阶段(2012年11月1日—模拟期末)处于冰封期,随着气温降至冰点以下,表层水温也开始降至冰点,水库开始结冰,水体与大气之间的热量交换逐步减少,当冰盖完全覆盖水体时,大气热量和水体热量交换基本终止。此后,水体热量除一部分随水库出水损失外,其余热量大部分在各层之间进行交换。表层水温稳定在冰点附近,底层水温则因存留有第二阶段的热量而高于表层水温,因此这一阶段的温度梯度与第一阶段相反,热量由底层传导至表层。2013年3月下旬,气温逐渐回升至冰点以上,冰盖开始消融,2013年4月后,冰盖基本融化,开始新一轮的热量交换。



(a) L[#]采样点



(b) T[#]采样点



(c) F[#]采样点

图7 采样点各层水温模拟结果

Fig.7 Simulation results of water temperature in each layer of the sampling sites

从垂向平均温度分布来看(图9),夏季浅水区

平均水温高于深水区平均水温，冬季分布情况则相反。内水量大于浅水区，因此深水区平均水温升高或降低的幅度小于浅水区。这一现象的主要原因是网格面积不变的情况下，单位面积所吸收或释放的热量相同，而深水区单位面积

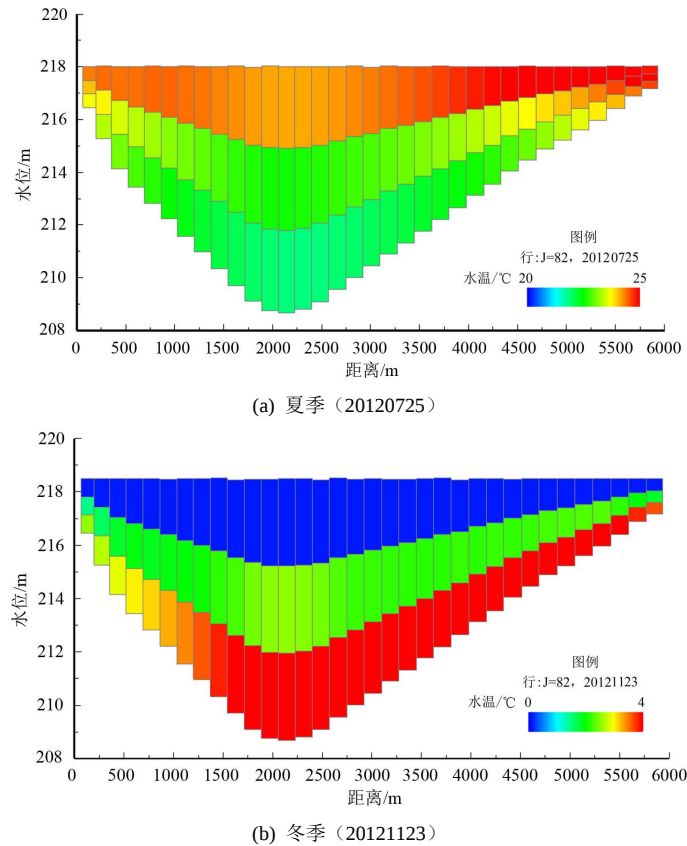


图 8 T#采样点所在断面垂向水温分布

Fig.8 Vertical water temperature distribution of T# cross section

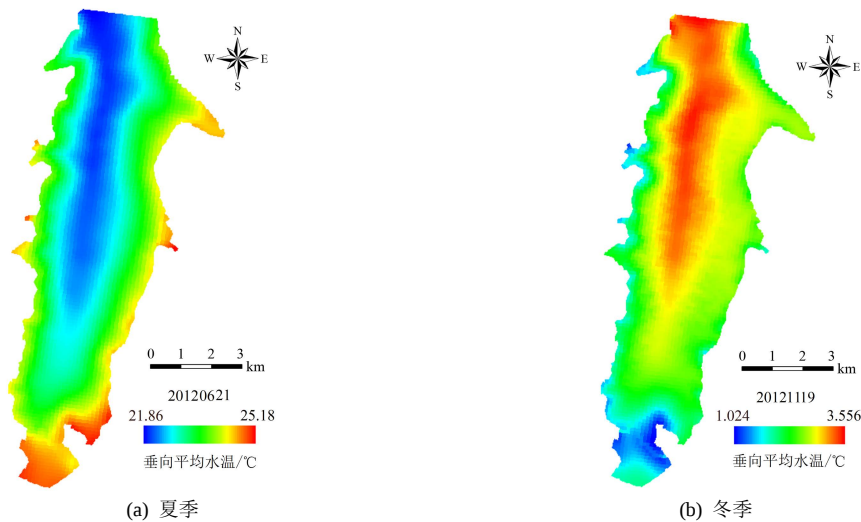


图 9 新立城水库夏季与冬季垂向平均水温分布

Fig. 9 Vertical mean water temperature distribution of Xinlicheng Reservoir in summer and winter

2.3 TP浓度

水库表层 TP 浓度的模拟值与实测值之间的对比分析结果见表 3。三处采样点的 MRE 均小于 20%。其中，F#采样点的 MRE 最大，为 15.78%；L#采样点次之，为 15.22%；T#采样点最小，为 11.25%。

从时间梯度来看，TP 浓度总体呈明水期逐渐升高而冰封期逐渐下降的趋势，9—11 月浓度达到峰值

(图 10 和图 11)，这与水库上游地区的农业生产和居民生活规律存在相关性。春、夏季，流域内大量施用化肥农药，导致农田退水往往含有高浓度的氮、磷，这些农田退水大部分汇入河道并最终流入水库。此外，夏季天气炎热，流域内居民生活用水量显著增加，大量洗涤剂的使用导致生活污水中磷浓度激增，这些生活污水最终均排入新立城水库。

从垂向浓度分布来看, 整个模拟期 L[#]采样点的 TP 浓度保持稳定(图 11(a)), L[#]采样点附近水域垂向 TP 浓度未出现明显分层现象, 说明该区域的水体得到了充分混合。T[#]和 F[#]采样点 TP 浓度在明水期差异较为明显, 冰封期差异不大(图 11(b)、图 11(c)), 造成这一现象的原因是明水期入库和出库

流量大于冰封期, 层间流速差异较大, 表层流速快于中间层和底层; 而在冰封期, 入库和出库流量减少, 受冰盖阻力影响, 水体流速比明水期减缓, 层间流速差异不明显, 因此这一阶段 TP 浓度在垂向上变化不明显。

表 3 新立城水库表层总磷模拟值与实测值统计分析结果

Table 3 Statistical results for simulated and observed surface TP values in Xinlicheng reservoir

时间	L [#] 采样点			T [#] 采样点			F [#] 采样点		
	实测值	模拟值	MRE/%	实测值	模拟值	MRE/%	实测值	模拟值	MRE/%
20120415	0.022	0.021	6.07	0.032	0.028	13.80	0.062	0.078	25.08
20120515	0.023	0.019	15.54	0.033	0.038	15.17	0.039	0.052	33.15
20120615	0.029	0.030	2.87	0.039	0.038	2.56	0.052	0.042	18.38
20120715	0.038	0.034	9.94	0.048	0.046	4.56	0.064	0.054	14.88
20120815	0.032	0.039	22.11	0.042	0.057	36.63	0.069	0.068	1.62
20120915	0.058	0.039	32.73	0.081	0.072	11.47	0.093	0.098	5.43
20121015	0.051	0.067	31.15	0.073	0.077	5.63	0.072	0.075	4.46
20121115	0.058	0.061	4.84	0.061	0.067	9.69	0.077	0.071	7.90
20121215	0.053	0.052	2.01	0.053	0.056	6.48	0.051	0.061	19.02
20130115	0.040	0.044	9.83	0.050	0.048	4.06	0.060	0.052	13.54
20130215	0.033	0.037	12.12	0.041	0.041	0.85	0.052	0.046	12.08
20130315	0.039	0.032	18.85	0.048	0.035	26.32	0.048	0.040	15.95
20130415	0.038	0.027	29.75	0.042	0.046	9.01	0.062	0.083	33.58
MRE/%			15.22			11.25			15.78

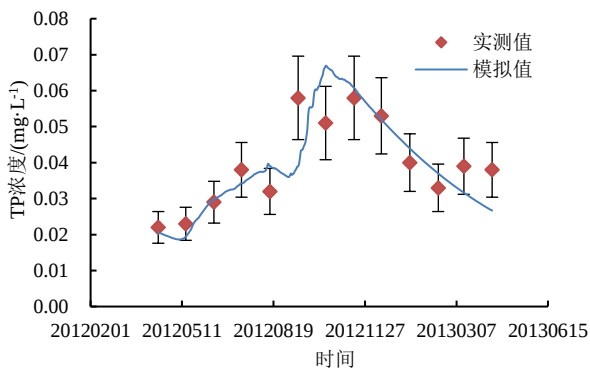
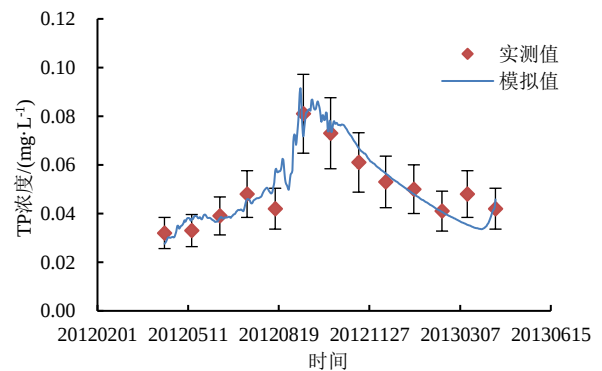
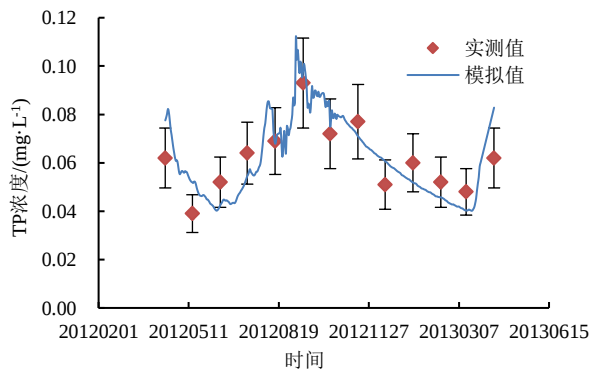
(a) L[#]采样点(b) T[#]采样点(c) F[#]采样点

图 10 表层 TP 浓度模拟值与实测值对比

Fig.10 Comparison between simulated and measured values of surface TP concentration

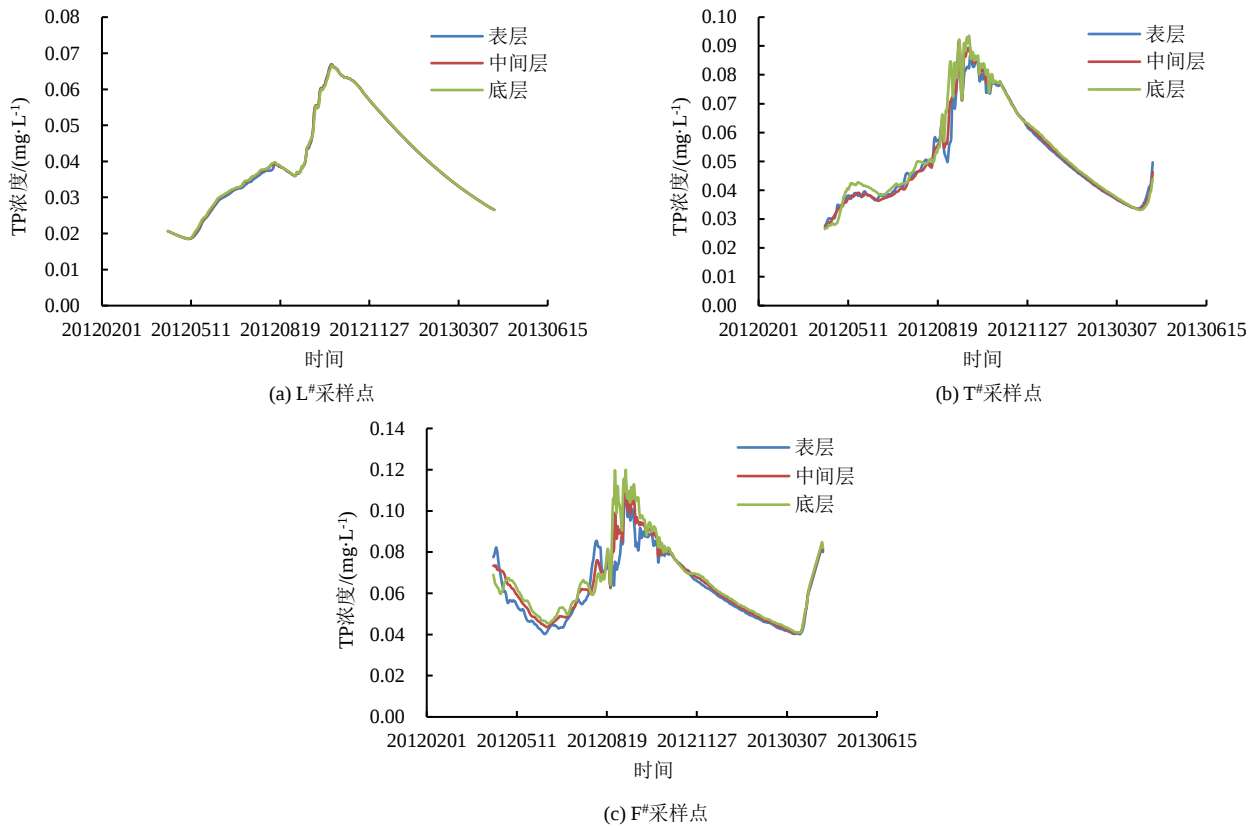


图 11 各采样点 TP 浓度分层变化曲线

Fig.11 Layered variation curve of TP concentration at each sampling site

3 讨论

影响水动力水质模型模拟精度的因素众多,除了由参数不确定性引起的模拟误差外,还包括模型类型、网格种类、垂向坐标系统、模型离散方法、初始条件及边界条件等^[23]。本研究中,2012 年 6 月下旬—8 月中旬的水位模拟误差相对较大,最大模拟误差约为 0.5 m。其主要原因是伊丹河无实测流量资料,只能采用推算值来代替实测值,因此造成这段时期模拟值与实测值之间相差较大。2012 年 10 月 8 日的水温模拟误差较大,达到了 33.7%,其原因是此次水质采样的时间在早上 8 点左右,比其他采样时间提前了 2~3 h,因此实测的水温相对偏低。TP 浓度有多个时间点的模拟误差超过了 30%,其主要原因是伊丹河缺少水质监测数据,水质边界条件难以反映实际情况。由于缺少采样点中间层和底层的水温与 TP 浓度实测值,本研究只能通过采样点表层的实测数据进行模型参数的率定和验证,中间层和底层的模拟结果能否能达到表层的模拟精度,需要在未来进一步验证。

4 结论

1) EFDC 水动力水质模型能够客观反映寒冷地区水库水动力、水温和 TP 浓度的变化过程。

2) 水库水位模拟值与实测值之间的 *MRE* 为 4.47%,

水温的 *MRE* 为 12.5%, TP 浓度的 *MRE* 小于 20%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] TERRY J A, SADEGHIAN A, BAULCH H M, et al. Challenges of modelling water quality in a shallow prairie lake with seasonal ice cover[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 384: 43-52.
- [2] TERRY J A, SADEGHIAN A, LINDENSCHMIDT K E. Modelling dissolved oxygen/sediment oxygen demand under ice in a shallow eutrophic prairie reservoir[J]. *Water*, 2017, 9(2): 131.
- [3] SHAKIBAEINIA A, KASHYAP S, DIBIKE Y B, et al. An integrated numerical framework for water quality modelling in cold-region rivers: A case of the lower Athabasca River[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 634-646.
- [4] STEFANOVIC D L, STEFAN H G. Two-dimensional temperature and dissolved oxygen dynamics in the littoral region of an ice-covered lake[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 34(3): 159-178.
- [5] OVEISY A, RAO Y R, LEON L F, et al. Three-dimensional winter modeling and the effects of ice cover on hydrodynamics, thermal structure and water quality in Lake Erie[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(S3): 19-28.
- [6] 闫慧荣, 刘文涛, 冯民权, 等. 水库冰冻期冰内温度的模拟[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2010, 32(5): 738-741.
YAN Huirong, LIU Wentao, FENG Minquan, et al. Distribution of ice temperature in freeze reservoir[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2010, 32(5): 738-741.
- [7] 孙少晨, 魏怀斌, 肖伟华, 等. 冰封期水动力水质模型在松花江水污染事件中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1 548-1 553.
SUN Shaochen, WEI Huaibin, XIAO Weihua, et al. Application of the freezing period hydrodynamics and water quality model to water

- pollution accident in Songhua River[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1 548-1 553.
- [8] 王志刚. 北方河流冰封期水质特征及模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- WANG Zhigang. Water quality characteristics and simulation methods of Northern rivers during ice-covered periods[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [9] 张岩, 王楠, 赵同国, 等. 冰封对乌梁素海水质污染特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 120-127.
- ZHANG Yan, WANG Nan, ZHAO Tongguo, et al. Change in water quality of Ulansuhai Lake after its surface freezing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 120-127.
- [10] 冯雪瑶, 李兴, 刘瑞霞, 等. 乌梁素海冰封期浮游植物与生态环境响应关系[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 100-105, 170.
- FENG Xueyao, LI Xing, LIU Ruixia, et al. Relationship between phytoplankton and ecological environment during the ice-season of Wuliangsu Lake[J]. Yellow River, 2021, 43(9): 100-105, 170.
- [11] 高玉红. 寒冷地区水库 CH_4 和 N_2O 排放特性及影响因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- GAO Yuhong. Study on CH_4 and N_2O emission characteristics and influencing factors of reservoirs in cold regions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [12] GAO Liangliang, LI Daoliang. A review of hydrological/water-quality models[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2014, 1(4): 267-276.
- [13] HAMRICK J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects[R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317, 1992.
- [14] 张先富. 基于 HSPF 半分布式水文模型的新立城水库流域水环境模拟及预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- ZHANG Xianfu. Water environment simulation and prediction research in Xinlicheng Reservoir watershed based on semi-distributed hydrological model HSPF[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [15] 朴炳洙, 赵清. 新立城水库水文特性分析[J]. 吉林水利, 2007(10): 8-9.
- [16] 宋树东, 尹华. 新立城水库水质现状及富营养化防治措施分析[J]. 农业与技术, 2012, 32(8): 183-184.
- [17] 赵琳琳, 肖长来, 王雅男, 等. 新立城水库富营养化及影响因子分析[J]. 节水灌溉, 2014(10): 40-42, 45.
- ZHAO Linlin, XIAO Changlai, WANG Ya'nan, et al. Assessment and analysis of factors of eutrophication in Xinlicheng Reservoir[J]. Water Saving Irrigation, 2014(10): 40-42, 45.
- [18] 孙立强, 田卫, 马广庆, 等. 新立城水库营养盐动态及富营养化特征分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(6): 728-733.
- SUN Liqiang, TIAN Wei, MA Guangqing, et al. Analysis of the nutrient dynamics and eutrophication characters in Xinlicheng Reservoir[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(6): 728-733.
- [19] 沈万斌, 刘景帅, 杨育红, 等. 新立城水库总磷优化管理[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 20-23, 28.
- SHEN Wanbin, LIU Jingshuai, YANG Yuhong, et al. Optimal management of total phosphorus in Xinlicheng Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(5): 20-23, 28.
- [20] 郑国臣, 马品非, 官涤, 等. 基于云模型方法综合评价新立城水库水质[J]. 水利技术监督, 2019, 27(3): 124-127.
- [21] 吉林省水利厅. 新立城水库调度工作手册[R]. 长春: 吉林省水利厅, 1986.
- [22] 卫志宏, 杨振祥, 唐雄飞, 等. 洱海湖泊及海湾三维水动力模型构建及特征分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, 38(1): 85-95.
- WEI Zhihong, YANG Zhenxiang, TANG Xiongfei, et al. Three-dimensional modeling and characteristics of hydrodynamic processes in Erhai Lake[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 38(1): 85-95.
- [23] 李一平, 施媛媛, 姜龙, 等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 1-8.
- LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8.

Numerical Simulation of Reservoir Water Environment in Cold Regions

MAO Xiangming¹, WU Guozheng^{2,3*}, REN Chuntao⁴

(1. Panzhihua University, Panzhihua 617000, China; 2. School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 3. Guokechuang Beijing Information Technology Co. Ltd, Beijing 100070, China; 4. Hohhot Fengze Water Conservancy Survey and Design Co., LTD, Hohhot 010000, China)

Abstract: 【Objective】Using a water environment numerical model to study the process of hydrodynamic and water quality changes in a seasonal ice-covered reservoir, revealing the variation patterns during the open water and ice-covered periods. 【Method】In this paper, Xinlicheng Reservoir, a plain reservoir in the cold region of northern China, is taken as the research object, and a three-dimensional hydrodynamic water quality model is built based on water environment hydrodynamics. The water temperature and TP concentration of a complete water period which include open water stage and ice-covered stage were simulated and analyzed, and the parameters of the model were calibrated and validated. 【Result】The statistical analysis results show that the mean relative error (*MRE*) between the simulated and measured water level values of Xinlicheng Reservoir is 4.47%, and the water temperature *MRE* value was 12.5%. The *MRE* values of TP concentration at all three sampling points are less than 20%. 【Conclusion】The research results can objectively reflect the changes in hydrodynamics force, water temperature and TP concentration of Xinlicheng Reservoir during the open water and ice covered periods, and can provide reliable reference and application value for the water environment management of Xinlicheng Reservoir.

Key words: cold region; reservoir; water environment; numerical stimulation

责任编辑: 韩 洋