

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.005

三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应

纪道斌^{1,2}, 成再强¹, 龙良红^{1,2}, 闫金波³, 杨忠勇^{1,2}, 赵星星¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 3. 长江水利委员会长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为了解三峡水库库首 2003—2018 年的水温变化特征及其对生态环境的影响, 基于庙河断面实测资料, 采用 LSTM-Logistic 模型模拟分析了库首多年水温结构特性, 并探讨了其变化对库区支流库湾水华的影响和对坝下鱼类产卵水温的影响。结果表明: LSTM-Logistic 模型能较好地适用于三峡水库, 准确地模拟水温的逐日变化过程; 2006—2013 年, 三峡水库库首每年 4—6 月均出现了水温分层现象, 从 2014 年开始, 水温垂向差异变小, 水温不分层, 且春季、秋季和冬季水温升高, 下泄水温进一步平坦化; 三峡水库库首水温长期变暖的趋势, 会使支流库湾倒灌异重流潜入深度上移, 从而改变异重流倒灌形式, 降低库湾水华风险; 梯级水库蓄水缓解了春季下泄低温水的不利影响, 但秋冬季水温的升高对中华鲟繁殖造成了进一步威胁。

关键词: 库首水温; 水温分层; LSTM-Logistic 模型; 生态效应; 三峡水库

中图分类号: TV697.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)03-0034-09

Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods//JI Daobin^{1,2}, CHENG Zaiqiang¹, LONG Lianghong^{1,2}, YAN Jinbo³, YANG Zhongyong^{1,2}, ZHAO Xingxing¹ (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, China)

Abstract: In order to investigate the variation of water temperature at the head area of the Three Gorges Reservoir (TGR) from 2003 to 2018 and its impact on the ecological environment, the LSTM-Logistic model was used to simulate the multi-year water temperature process based on the field data at the Miaohe hydrological station. The influences of its variation on algal blooms in the tributary bay and the spawning water temperature of the downstream fish are discussed. The results show that the LSTM-Logistic model is applicable to the TGR, and it can accurately simulate the daily variation of water temperature. From 2006 to 2013, thermal stratification occurred at the head of the TGR from April to June. In 2014, the vertical differences of water temperature began to decrease and stratification disappeared. The average water temperature increased in spring, autumn, and winter, and the discharge water temperature further flattened. The long-term warming trend of the water temperature at the head area of the TGR will reduce the depth of the plunging point of the density current from the tributary bay, affect the pattern of the density current, and reduce the risk of algal blooms in the tributary bay. After the impoundment of the upstream cascade reservoirs, the impact caused by cold discharge water in spring is partly mitigated, while the increase of the water temperature in autumn and winter further threatened the spawning of Chinese sturgeon.

Key words: temperature in head area of reservoir; thermal stratification; LSTM-Logistic model; ecological effect; Three Gorges Reservoir

水温是河流生态系统物理、生物和化学过程中的一个关键因素^[1], 水温垂向结构、变化过程的改

变对河流生态系统、水生生物生长繁殖会产生深远的影响。大型水库的建设会显著改变河流水文和水

基金项目: 国家自然科学基金(52079069, 52009066); 国家自然科学基金联合基金(U2040220)

作者简介: 纪道斌(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: dbji01101@163.com

通信作者: 龙良红(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: 893310859@qq.com

力条件,水深、水面面积、流速、水体滞留时间等变化很大程度上影响着河流水温的时空分布特性^[2]。周期性水温分层是大多数水库最显著的热力学现象。典型分层型水库的垂向结构分为上、中、下3层,即表温层、温跃层和滞温层,水温结构显著影响着水动力过程和水质状况^[3-4]。水库水温的垂向分布规律不仅与季节变化有关,而且受入流条件、水库水深、地理位置、运行调度的影响。

三峡水库蓄水后,其库首水温结构的改变对长江流域河流生态系统产生了较为深远的影响,这一直是学者们关注的重点。黄真理^[5]通过研究密度弗劳德数指出,在入库流量小于 $6000\text{ m}^3/\text{s}$ 的4月,近坝段有短时水温分层现象,5月下旬逐渐消失,上下层水温差在 $1.7\sim 9.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。任华堂等^[6]采用三维模型预测库首 105 km 范围水温,结果显示,蓄水后水温对气象条件的响应变慢,沿程温差有所加强,库首江段在4—6月会出现弱分层,垂向温差在 $1\sim 2\text{ }^\circ\text{C}$ 。曹广晶等^[7]利用坝前的实测水温资料,分析了三峡水库近坝区水体水温垂向结构,结果表明,库首从2006年开始,每年4—6月在垂向上会出现一定的温差,但三峡水库不存在深层低温水下泄问题。邓云等^[8]根据三峡水库不同调度运行方式,采用纵向一维水温模型模拟分析了三峡水库达到 175 m 正常蓄水位后,宜昌至监利 300 km 河道水温的变化过程,结果表明三峡水库蓄水后,宜昌断面水温出现了平坦化及延迟现象,并且随着蓄水位的抬升,延迟幅度逐渐加大,四大家鱼和中华鲟特征水温出现时间延迟。蔡玉鹏等^[9]基于宜昌水文站1983—2013年长时间系列逐日水温资料,对三峡水库蓄水前和蓄水后的特征水温参数明显改变情况进行了定量分析,结果表明三峡水库蓄水后水温参数明显改变,坝下水温发生显著变化。随着上游梯级水库(溪洛渡和向家坝水库)的蓄水,任实等^[10]通过实测资料发现,近年来三峡水库近坝区温度分层现象在梯级水库运行后显著减弱。水库运行方式的改变对河流水温和生态系统的影响显著,因此,研究三峡水库多年的水温变化过程,有必要根据三峡水库运行调度特征进行划分,对不同阶段水温结构特性及影响因素进行阶段性、系统性的梳理,进一步揭示水库水温过程改变造成的生态效应。

目前国内水库水温的预测研究方法有经验公式和数值模型^[11]。经验公式可用来初步判断水库所属的分层类型,以定性分析为主,在定量分析中不够精确^[5]。数值模型主要为纵向一维、二维和三维模型,通过离散化的地形网格,求解偏微分方程,得到相应的水温过程,难度较高,过程较为复杂^[6,8]。机

器学习算法属于数据驱动模型,其优势在于研究者不必深入了解物理机制,不必建立地形网格,便可以通过复杂的神经网络建立各影响因素与水温之间的非线性关系,快速达到预测水温的目的。本文利用已有各水文观测站实测水温及水文资料,采用LSTM-Logistic模型对库首多年逐日水温变化过程进行模拟,解决了低采样频率和对高频信息需求之间的矛盾,分析了三峡水库不同运行期库首水温分层特性及其主要影响因素,探讨了库首水温改变造成的生态影响,以期水库生态调度提供理论依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

三峡水库(图1)东起宜昌市秭归县三斗坪镇,西至重庆市朱沱镇,长达 660 km ,平均库容 393 亿 m^3 ,防洪库容 221.5 亿 m^3 ,控制流域面积 100 万 km^2 ,正常蓄水位 175 m ,防洪限制水位 145 m ,年均径流量达 4510 亿 m^3 ,约占长江年总径流量的 49% ,坝址断面多年平均流量 $14300\text{ m}^3/\text{s}$,属于季调节水库。库区的河型、边界条件和河势在蓄水后有所变化,具体包括库区的水表面积增大、河面加宽、流速减缓及库区水体滞留时间增长等。庙河断面距三峡大坝 14 km ,是库区距三峡大坝最近的一个水文观测断面,水面宽约 1 km ,断面水深随水位在 $138\sim 168\text{ m}$ 范围之间变化。在庙河断面以下,无较大支流汇入三峡水库。巴东断面距离大坝 74 km ,黄陵庙断面是坝下第一个水文观测断面,距离三峡大坝 12 km 。

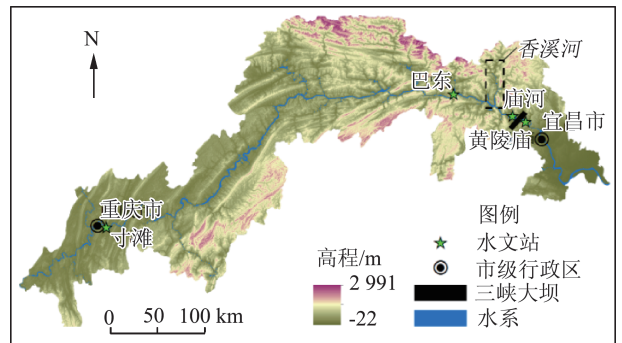


图1 研究区域及水文监测点分布

Fig.1 Study area and distribution of hydrological monitoring stations

1.2 数据来源

本文所用数据主要有流量、水温和气象数据。流量数据主要选用三峡大坝2008—2018年逐日平均出入库流量。水温数据主要包括庙河断面2003—2018年表层水温和垂向水温、黄陵庙断面2000—2018年逐日平均水温、巴东断面2008—2018年逐日表层水温。其中庙河断面表层水温2003—

2013 年为逐日平均水温,2014—2018 年为每旬监测一次的瞬时水温,垂向水温为 2006—2018 年每旬监测一次的瞬时水温。另外,为分析入流水温对库首水温的影响,选用寸滩断面 2003—2018 年逐日平均水温。气象数据主要选用秭归县 2008—2018 年逐日气象数据(包括空气温度、日照时长、降雨量、蒸发量、风速、湿度)。庙河断面垂向水温监测深度布置,2006—2010 年为 1 m、3 m、5 m、7 m、10 m、13 m、16 m、20 m、25 m、30 m、40 m、50 m、70 m、90 m、110 m、130 m、150 m 和底部,2011—2018 年按总水深的相对位置布置测点,具体比例为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0。其中流量数据来自中国长江三峡集团公司官网,水温数据来自长江水利委员会水文局三峡分局,气象数据来自中国气象网。

2 研究方法

2.1 模型构建

2.1.1 LSTM-Logistic 模型

模型由长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)和 Logistic 回归曲线构建而成。LSTM 是基于递归神经网络(recurrent neural network, RNN)而改进的时间序列预测模型^[12],解决了 RNN 反向传播过程中梯度消失的问题,易于训练。

许丹等^[13]发现 Logistic 回归曲线对不同类型水库垂向水温分布有很好的拟合效果,且过程较数学模型简便。根据庙河断面垂向水温分布特点,本文借鉴下述垂向水温分布的经验公式:

$$T(y) = \frac{k}{1 + e^{a+by}} + T_s \quad (y < 0, b > 0) \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 k 为 3 个未知无量纲参数, a 和 b 共同控制温跃层深度; k 为底表温差; $T(y)$ 为水深 y 处的水温; y 为水深; T_s 为表层水温。

首先通过 LSTM 输出逐日表层水温(式(1)中的 T_s ,水面以下 0.5 m 的位置),再用 Logistic 曲线拟合每旬一次的实测垂向水温,得出每旬一次的参数 a 、 b 、 k ,由于参数 k 随时间线性变化,使用线性插值得到逐日参数 k ,再由 k 与 a 的线性关系计算逐日 a 值,再通过 a 与 b 之间的关系确定逐日 b 值,进而加密得到逐日垂向水温。LSTM 神经网络使用 Python 和深度学习框架 Keras 搭建,Logistic 曲线使用 SPSS 24.0 软件进行拟合。

2.1.2 模型输入参数选择

影响三峡水库库首水温的因素众多,在河道型水库中多考虑入流水温、出入库流量以及局地太阳辐射、气温、降雨量、蒸发、湿度、风速等气象条件。选择相关性较好的巴东水温、出库流量、入库流量、

湿度、气温作为 LSTM 模型的输入变量。

2.1.3 模型验证

使用均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和决定系数 R^2 作为检验模型误差的指标。

选取 2008—2013 年的逐日实测数据和 2014—2017 年每旬一次的实测数据作为训练集,2018 年每旬一次的实测数据作为测试集, RMSE、MAE 分别为 0.53°C 、 0.43°C 。Logistic 曲线拟合精度较高,对多年垂向水温进行拟合, R^2 在 $0.97 \sim 1.00$ 之间,水温最大绝对误差范围为 $0 \sim 0.79^\circ\text{C}$ 。

2.1.4 LSTM-Logistic 模型适用性分析

LSTM-Logistic 模型适用于不同类型的河道型水库,只需要提供入流条件和气象条件边界进行训练,即可预测表层水温,而 Logistic 曲线可以拟合不同类型水库的水温结构。因 LSTM 具有自学习的特点,在水流条件改变后,也依然适用。目前,LSTM 神经网络和 Logistic 曲线水温预测已广泛应用于海洋、湖泊和河流中^[13-16],并且取得了较高的精度。

2.2 三峡水库的运行调度特征

三峡工程于 2003 年 6 月首次蓄水,蓄水初期坝前水位达到 135 m。2006 年 9 月,三峡工程实行第二次蓄水,成功蓄至 156 m 水位。这一过渡阶段,汛期水位维持在防洪限制水位 145 m,枯水期蓄水至 156 m。2008 年 9 月,三峡工程开始首次 175 m 试验性蓄水,当年水库水位达到 172.8 m。自此,三峡水库全年的水位落差达到近 30 m,年内的水位调度包括汛前消落期、汛期、蓄水期、枯水期 4 个过程。在三峡水库正常运行期内,上游向家坝水库于 2012 年 10 月下闸蓄水,溪洛渡水库于 2013 年 5 月下闸蓄水。根据三峡水库多年运行调度以及上游梯级水库联合运行调度情况,其运行过程可以分为 4 个阶段:①135 m 运行期(2004 年至 2006 年 9 月);②156 m 运行期(2006 年 10 月至 2008 年 9 月);③175 m 运行期 I(2008 年 10 月至 2013 年 5 月,上游梯级水库蓄水前);④175 m 运行期 II(2013 年 6 月至 2018 年 12 月,上游梯级水库蓄水后)。

2.3 水温分层强度指标

温跃层指水体垂向温度梯度上出现突变或不连续剧变的水层^[17]。因水文和水动力条件的差异,温跃层的划分标准在不同水体中取不同值。在湖库水体中,多采用 $0.2^\circ\text{C}/\text{m}$ 的梯度值^[17-18],也有地区使用 $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$ 的最低值^[19-20]。因三峡水库干流流量较大,水温分层强度较其他类型水体弱,以往关于三峡水库水温结构的研究,并没有明确定义温跃层及其形成的判定标准。本文采用 $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$ 的标准,即当垂向温度

梯度大于或等于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,温跃层形成,水温开始分层。为了进一步量化分析三峡水库长期热分层强度的变化,引入温跃层强度指数(thermocline strength index, TSI)和温跃层深度两个指标。TSI 是水温差与水深差的比值,表示温跃层的陡度或平均梯度,简单量化了水体热分层强度,被广泛应用于湖库水体。根据实际垂向施测布点,将温度梯度大于或等于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的水层均划分为温跃层。温跃层深度是指温跃层上界的深度,即温度垂直分布曲线上,一般在温跃层的上、下各有一个极大曲率点,温跃层深度即最浅的极大曲率点所在的深度^[17]。本文中不同年份间垂向水温施测方法不同且水深变化较大,统一换算为水位,温跃层位置以高程计量。

3 结果与分析

3.1 不同运行期库首水温的季节性差异

图2为三峡水库库首2004—2018年不同季节平均水温变化,可见不同季节水温的年际变化存在一定的差异。春季(3—5月)平均水温年际波动较大,达到了近 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在前3个阶段,库首水温呈显著降低趋势(2009年除外),2012年之后显著升高;夏季(6—8月)平均水温的年际变幅较小($1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内),除了2013年显著升高以外,4个不同时期水温差异并不显著;秋季(9—11月)整体上水温呈升高趋势,第一阶段最低($21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$),第二阶段次之($21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),第三、四阶段水温差异不明显($22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$);冬季(12月至次年2月)整体上水体升温过程明显,水温稳步上升,2014年以后趋于稳定,平均水温从蓄水初期的 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

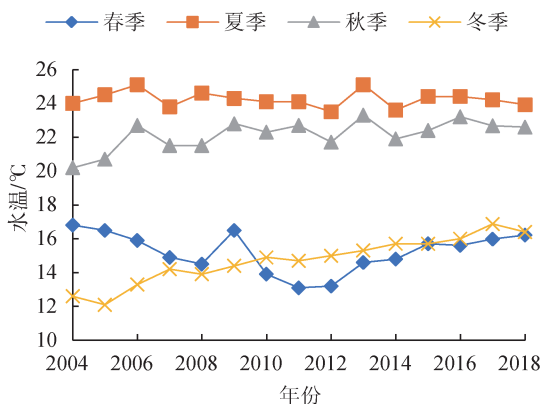


图2 三峡水库库首庙河断面水温季节变化

Fig.2 Seasonal variation of water temperature at Miaohe site at head of Three Gorges Reservoir

3.2 不同运行期库首的水温分层特性

前期的监测结果表明,三峡水库135 m运行期间(蓄水初期),2004—2005年干流未出现水温分层,2006年4—6月库首水温才开始出现分层,且

其他月份垂向无明显差异^[7]。因此,本文重点模拟分析了2006—2018年不同阶段4—6月垂向水温结构,模拟的逐日垂向水温分布结果如图3所示。

a. 135 m运行期。在该阶段末的2006年4月30日,三峡水库库首段开始出现水温分层现象(图3(a)),最大表底温差为 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温跃层出现在高程68 m的水层,厚度约40 m,分层共持续了9 d(以垂向温度梯度大于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 计,下同)。水温分层发育过程中 TSI 逐日升高,在5月6日达到最大值,为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。该阶段水温分层持续时间较短,水温分层强度较弱。

b. 156 m运行期。在2007年、2008年春季,库首出现了明显的水温分层现象,最大表底温差分别达到 $10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图3(b)~(c))。2007年温跃层开始出现在高程60 m位置处,厚度约40 m,随分层强度增加逐渐下移至35 m处。2008年开始出现在60 m的位置处,而后跃变至35 m处,厚度约20 m。分层分别持续了58 d、43 d,期间 TSI 最大值分别为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,分别出现在2007年6月8日和2008年5月28日,该阶段水温分层持续时间长,TSI 最高达到 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上,水温分层强度最强。

c. 175 m运行期 I。从2008年9月汛末蓄水后,一直持续运行到2013年5月上游梯级水库向家坝、溪洛渡蓄水前。如图3(d)~(h)所示,2009年、2010年、2011年、2012年、2013年最大表底温差分别为 $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,温跃层开始均出现在40~50 m的范围内,随分层加强而下移至35 m处,厚度为15~20 m。分层期间 TSI 最大值分别为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,出现的日期分别在5月15日、5月26日、6月6日、5月15日、5月12日,分层持续时间分别为20 d、19 d、20 d、11 d、8 d。该阶段分层持续时间和 TSI 最大值在2012年开始减小,分层有减弱的趋势。

d. 175 m运行期 II。从2013年6月上游梯级水库蓄水后一直到2018年12月,期间三峡水库依然处于正常水位175 m运行。如图3(i)~(m)所示,2014年、2015年、2016年、2017年、2018年最大表底温差分别为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,垂向水温最大梯度分别位于高程53 m、38 m、70 m、53 m、35 m处,分别为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,出现的日期分别在5月7日、5月6日、5月7日、4月14日、4月16日、6月11日。与前三个阶段相比,该阶段最大表底温差以及垂向水温差异持续

-- 分层起止日期 — 入库流量 — 出库流量
 10 12 14 16 18 20 22 24 26
 温度/°C

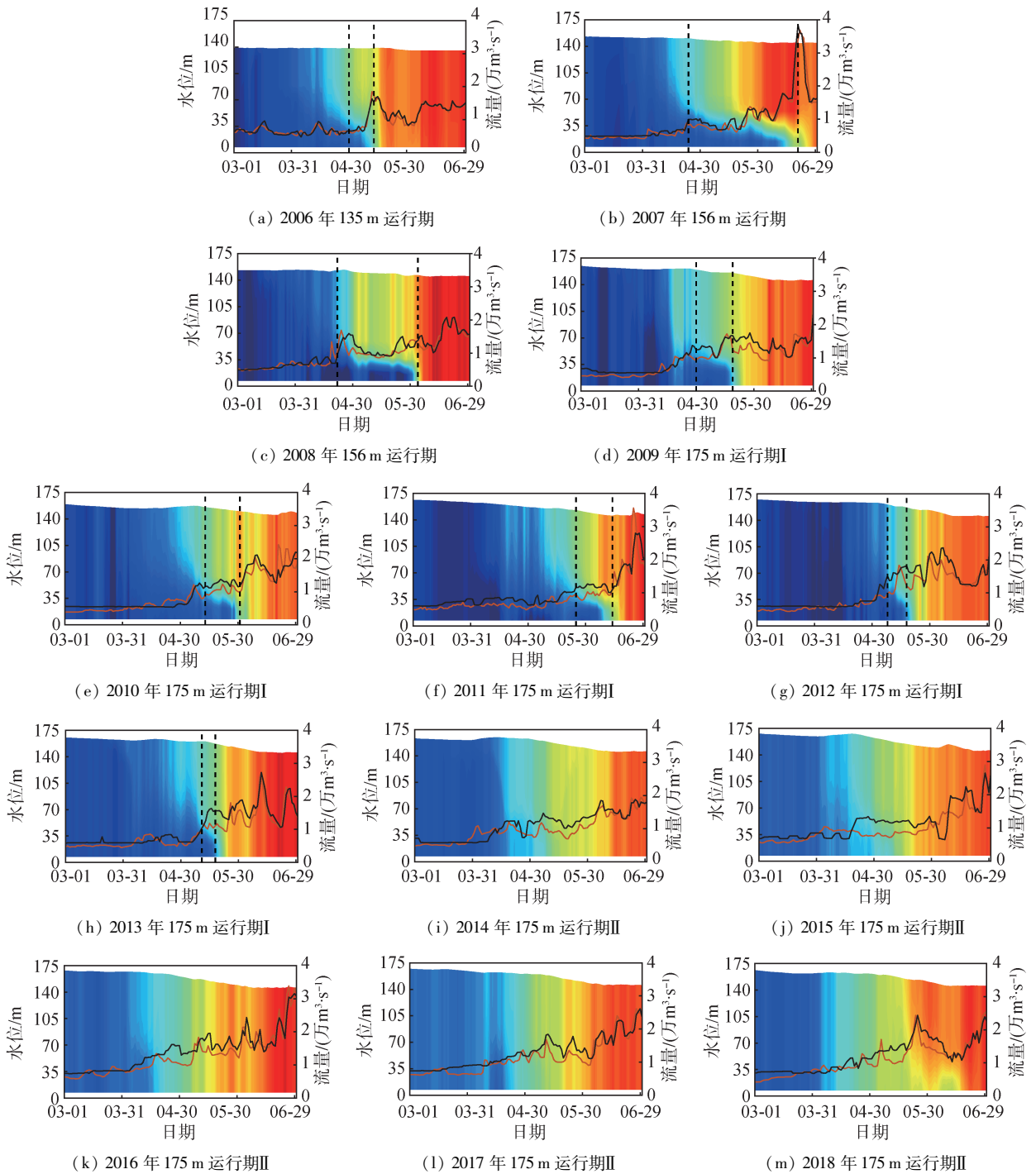


图3 各运行期3—6月庙河断面垂向水温分布

Fig. 3 Vertical water temperature distribution of Miaohe site from March to June in each year during different operation periods

时间都大幅递减,最大温度梯度没有超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,没有形成稳定的温跃层,因此,可以认为175 m运行期II库首水温不分层。

3.3 不同运行期的下泄水温变化

图4为不同时期多年日均下泄水温变化过程,不同时期水温年内变化差异较大,三峡水库蓄水之后水温变化过程滞后效应显著。较蓄水之前,三峡

水库蓄水导致春季水温显著降低,秋冬季水温显著升高:三峡水库单独运行阶段,春季平均水温为 $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,较蓄水前降低了 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均水温 $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,较蓄水前升高了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均水温增幅最大,从蓄水前的 $11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增长至 $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,升高了 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。梯级水库蓄水后,下泄水温进一步平坦化:春季平均水温 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,较三峡水库单独运行升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平

均水温 22.8℃,升高了 0.6℃,冬季平均水温 15.8℃,升高了 1.1℃。三峡水库蓄水前年平均水温为 18.5℃,蓄水之后 4 个时期的年平均水温分别为 18.3℃、19.0℃、18.9℃、19.7℃。可见,年平均下泄水温在逐年升高。由于汛期流量较大、流速较大、水体滞留时间短,不同时期的夏季平均水温差异较小,升温主要体现在 10 月至次年 5 月。

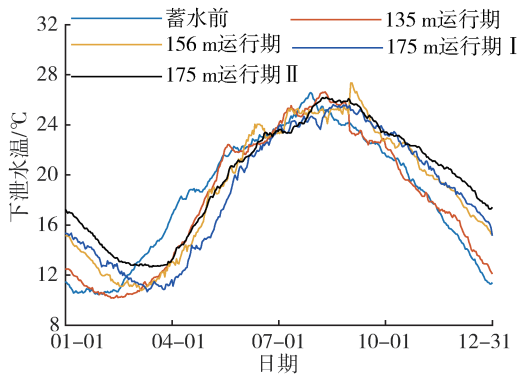


图 4 不同运行期多年日均下泄水温特征曲线
Fig. 4 Characteristic curves of multi-year average daily discharge water temperature in different operation periods

研究表明,长江四大家鱼主要在 4—5 月水温升至 18℃时开始产卵繁殖;中华鲟主要在 10—11 月,水温降至 20℃时开始产卵^[20-21]。蓄水前,下泄水温在 4 月上旬升至 18℃,在 10 月中下旬降至 20℃。由图 4 可知,对比三峡水库蓄水前,175 m 运行期 I 和运行期 II 的下泄水温升至 18℃的时间分别平均推迟了 38 d 和 29 d。梯级水库蓄水之后,18℃水温出现时间从 5 月中下旬提前至上旬。但在秋季,水温降至 20℃的时间相比 175 m 运行期 I 平均延迟了 9 d,较蓄水前延迟了 34 d。梯级水库联合运行之后,三峡库首及其下泄水温的变化对下游水温敏感种群产卵将产生新的影响。

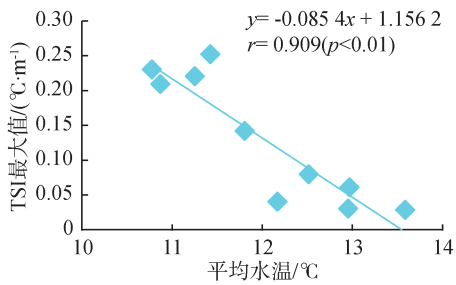
4 讨论

4.1 库首水温变化的影响因素

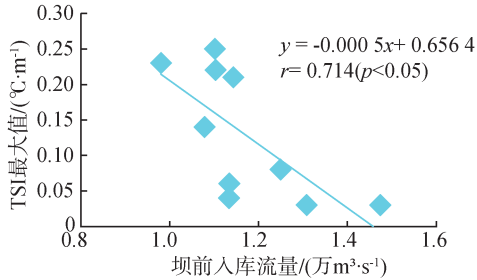
河道型水库水温的影响因素众多,主要包括入流水温、出入库流量、水动力过程以及局地太阳辐射、气温、降雨、蒸发、湿度、风速等气象条件。水库运行方式的变化也会直接改变河流径流量的时空分布特征^[22],使得水库年内热量再分配,进而影响水库年际间水温结构。不同于国内其他深水水库,三峡水库为年调节水库,其水温分层仅出现在库首河段且分层时间较短(4—6 月)。以龙羊峡水库为例,其坝前水温结构主要取决于水库运行调度过程^[23]。低水位运行期,呈现表温层和温跃层两层分布,高水

位运行期为稳定的 3 层分布,表现出显著的年际差异。与三峡水库不同,其汛期为蓄水过程,且年平均入库流量较小,水温分层不易被打破,分层持续时间较长。可见,水库坝前水温结构特征与年际、年内水库运行方式和入流条件密切相关。三峡水库经历的 3 个蓄水阶段,水位从 135 m 抬升至 175 m,库容逐阶段增加。在巨大的热量储蓄作用下,夏季滞留高温水难以快速释放,使得秋冬季下泄水温升高;同样,冬季滞留低温水使得来年春末夏初下泄水温偏低,下泄水温过程出现明显的延迟和平坦化特征(图 4)。水温延迟效应在春季 4—5 月和秋季 10—11 月表现最为突出^[8]。三峡水库蓄水后,水深变大,流速变缓,垂向紊动强度变弱,在坝前深水区水温容易分层,而水库中上游河段几乎不分层。春季坝前表层水体滞留时间相对较长,在表面热通量影响下迅速增温^[6],与库底冬季滞留水体形成半 U 形水温分层结构,随着 5—6 月上游入库流量的显著增大,水温分层被迅速打破。

随着上游梯级水库的蓄水,库首水温从 2013 年开始受到上游梯级水库运行的影响。梯级水库联合运行最直接的改变是流域的径流过程。较 175 m 运行期 I,175m 运行期 II 期间坝前入库流量在汛期被削减,枯水期有所增加,表现出“蓄丰补枯”的特点,4—6 月月平均流量分别增大了 2 837 m³/s、770 m³/s 和 1 578 m³/s,4—6 月分层强度与分层期间月平均流量显著相关($p < 0.05$),流量的增加使得库首水体垂向紊动增强,分层消失(图 5),该结果与曹广鼎等^[7]的研究结果一致。库首多年垂向水温特征表明(图 3):表底温差在 6 月较大流量的影响下会完全消失,此时坝前出入库流量接近 1.5 万 m³/s,与上述线性回归统计结果(当坝前流量等于 1.45 万 m³/s 时 TSI 为 0)基本相符(图 5(b))。此后,垂向水温无分层。175 m 运行期 II 库首水温分层的消失还可能与水库持续升温有关。冬季入库水温的显著升高,使得库首庙河断面 3 月库底滞留水体水温升高,3 月库底平均水温与 TSI 呈显著($p < 0.01$)负相关关系(图 5(a)),表明热量在三峡水库库首的累积,是分层消失的另一个重要原因。除了入库流量的变化,上游梯级水库蓄水也显著改变了三峡水库的入库水温。虽然寸滩断面春季水温受上游水库蓄水影响有所降低^[24],但库首表层水温却显著升高 1.9℃,这是由于入库流量的增加,使得水体滞留时间变短所致。在秋冬季节,虽然两个运行期的水体滞留时间没有发生明显改变,但上游寸滩断面的入库水温有显著的增加,使得三峡水库秋冬季水温进一步升高^[24]。综上,上游梯级水库运行导致三峡水库坝前



(a) TSI 最大值与 3 月库底平均水温线性回归



(b) TSI 最大值与坝前 4—6 月平均流量线性回归

图 5 2009—2018 年 TSI 最大值与 3 月库底水温和坝前 4—6 月平均流量的线性回归关系

Fig. 5 Linear regression relationship between maximum values of TSI and water temperature at bottom of reservoir and average discharge from April to June from 2009 to 2018

水温分层进一步减弱,而 4—6 月入库流量的增加缓解了春季的低温水下泄,但秋冬季节入流水温的变暖使得降温过程进一步延迟,三峡水库整体处于变暖阶段。

4.2 水温波动对支流库湾倒灌异重流演替的影响

自三峡水库蓄水后,支流库湾经常发生严重的水华^[25]。以往的研究表明,在营养盐充足、光照和水温适宜的情况下,普遍存在的倒灌异重流是影响水华生消的主要水动力过程,而在三峡水库典型支流库湾中,倒灌异重流的形成主要由干支流水温差异引起^[26]。由于长江干流水温受到上游来流变化(降雨、行洪等)和调度过程(水位涨蓄)的影响,干流短期的水温变化改变了干支流河口的密度差异,将造成河口倒灌异重流潜入深度的频繁波动。当干流水温升高时,倒灌异重流的潜入深度上移;而水温降低时,潜入深度则下移。倒灌异重流潜入深度的频繁变化会不断扰动库湾水体,打破水温分层,抑制浮游植物生长,甚至促使水华消亡^[27]。可见,准确地掌握干流水温的波动过程是认识支流库湾异重流演变及浮游植物生长趋势的前提,也是制定水库生态调度策略的理论基础。

在以往的相关研究^[28]中,采用庙河断面实测垂向水温(每月监测 3 次)作为模型下边界条件,通过水温的线性内插来反映干流的水温变化过程,进而模拟出异重流的变化。通过对比线性内插和 LSTM

模拟逐日水温过程发现(图 6):线性内插的水温升降过程并不能模拟出库湾倒灌异重流的真实变化,忽略了高频的异重流波动,这种短期波动过程很可能在支流库湾的水动力变化过程中起主导作用。统计结果显示,线性内插的水温日变幅在 0~0.2 °C 之间,其水温变化更加平滑,而 LSTM 模拟水温日变幅在 0~1.1 °C 之间,这种水温更大变幅的波动所引起的动力过程不容忽视,因此, LSTM 模型能更加真实地反映干流水温的短期变化,同时将其逐日的模拟结果运用于后续支流库湾水动力模型,能进一步改善模型模拟的精度和准确性。

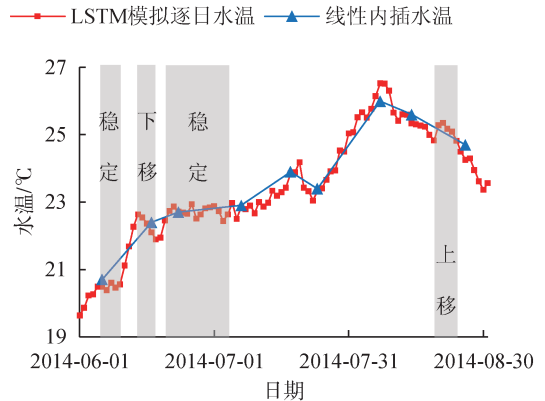


图 6 2014 年汛期庙河断面 LSTM 模拟的逐日水温波动过程和实测水温波动过程

Fig. 6 Fluctuation processes of daily water temperature simulated by LSTM and measured water temperature at Miaohe site in flood season in 2014

除了短期的水温波动,本文通过对比多年水温变化也发现:三峡水库平均水温逐年升高,表现出逐渐变暖的趋势,秋冬季节尤为明显。春季平均水温在 2012 年之后也显著升高,这种水温的季节性变暖很可能会造成支流倒灌异重流潜入深度的上移。Long 等^[29]研究发现:当发生中上层倒灌时,表层水体在顶托作用下,水流变缓,水体滞留时间增长,水温分层加剧,促进藻类生长,而当异重流潜入深度上移至表层时,将不利于形成稳定的水温分层,进而抑制藻类生长。随着干流水温的升高,表层倒灌模式发生的次数可能会增加,持续时间增长,从而降低支流库湾水华风险。这可能是近年来三峡水库支流库湾水华、水质好转的主要水动力原因,后期值得进一步验证。

4.3 水库变暖对下游鱼类的影响

三峡水库蓄水显著降低了下游河道的春季水温,并导致秋冬季水温升高,年内水温的升温、降温过程显著滞后。三峡水库单独运行时,下泄低温水导致宜昌断面水温过程明显延迟。受低温水的影

响,下游四大家鱼产卵的 18℃特征水温出现时间推迟 38 d,这一结论与蔡玉鹏等^[9]和彭期冬等^[30]基于实测水温资料分析的结果基本一致。上游梯级水库蓄水之后,春季下泄水温回升到 18℃的时间有所提前(9 d)。这与三峡水库坝前春季水温升高、水库变暖密切相关。可见,梯级水库联合运行将有利于缓解三峡水库春季下泄低温水对四大家鱼产卵的胁迫。

Huang 等^[31]的研究表明,成年中华鲟从河口到产卵场的洄游途中并不进食,而是通过消耗自身的脂肪来完成迁徙和繁殖。秋后水温的下降、流速和泥沙的增大会给中华鲟发出产卵信号,若一直等不到适宜的水温,性腺脂肪耗尽后,会发生不可逆的退化,这意味着中华鲟必须在有限的窗口期内完成繁殖。因此,适宜的水温是中华鲟自然繁殖最迫切的需求。相比于蓄水之前,三峡水库单独运行时秋冬季节平均水温升高了 2.6℃,中华鲟产卵的特征水温到达时间延迟 25 d,从蓄水前的 10 月中下旬延迟至 11 月中旬。而梯级水库蓄水之后,秋冬季下泄水温进一步升高 0.8℃,特征水温出现时间延迟 34 d,出现在了 11 月下旬,秋冬季水温的进一步升高必然导致中华鲟自然繁殖受到更大限制。结合多年中华鲟产卵活动的调查结果^[32]:1983—2002 年,中华鲟年平均产卵活动频次为 1.8 次,2003—2012 年为 1.1 次,2013—2018 年,降至 0.33 次。2013—2018 年长江中华鲟繁殖群体规模下降比例超过了 50%,在 2017 年甚至达到了 90.17%。中华鲟产卵事件响应了多年水温的变化趋势,从之前的“连续繁殖”变为“偶发繁殖”^[33]。然而,随着人为活动的加剧,水温的变化并未停止,持续的水温改变将对水生生态系统产生深远的影响。已有研究表明,梯级水库下泄水温的延迟效应和平坦化效应会随梯级数量增加而加强。三峡水库作为长江上梯级水库的最后一级,梯级水库的水温累积影响最终将以其为终点。随着全球的持续变暖,水温升高已成为很多湖泊、水库的普遍趋势^[18],然而,水库年内年际的运行方式、上游梯级运行都会显著影响水库的年内热分层特性及下泄水温过程,持续跟踪水库水温的变化趋势,理解其热分层机制并通过水库调度、梯级调度来缓解水库蓄热效应,营造适宜的水生生态环境^[34],是目前亟待解决的问题。

5 结 论

a. LSTM-Logistic 水温模型能准确模拟三峡水库库首多年水温结构的演变过程,模拟精度满足要求。通过本模型可得到较为准确的逐日水温数据,

为量化库首水温结构及变化趋势以及后续干支流模型改善提供了数据支撑。

b. 2006—2013 年,三峡水库库首每年 4—6 月均出现了不同程度的水温分层现象。受溪洛渡和向家坝水库蓄水的影响,从 2014 年开始,库首垂向水温梯度显著减小,水温不分层。同时期春季水温显著升高,夏季水温变化不大,秋冬季的水温也有升高趋势,水库水温呈逐渐变暖的趋势,使得三峡水库下泄水温过程进一步平坦化。

c. 三峡水库库首水温变暖的趋势,会影响支流库湾异重流倒灌形式,扰动库湾水体,打破水温分层,降低支流库湾水华风险。受溪洛渡和向家坝水库蓄水的影响,下游四大家鱼产卵特征水温出现时间平均提前 9 d,低温水的影响有所缓解。但是,中华鲟产卵特征水温出现时间平均延迟 9 d,对中华鲟繁殖造成了严重威胁。

参考文献:

- [1] PRATS J, VAL R, ARMENGOL J, et al. Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(1/2): 105-118.
- [2] LONG L, XU H, JI D, et al. Characteristic of the water temperature lag in Three Gorges Reservoir and its effect on the water temperature structure of tributaries [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(22).
- [3] 陈铂,彭梦辉,王华. 静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动规律[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(1): 37-41. (CHEN Bo, PENG Menghui, WANG Hua. Vertical motion characteristics of thermal in static thermal-stratified water [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(1): 37-41. (in Chinese))
- [4] 李红,高增文,秦志新,等. 分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 63-69. (LI Hong, GAO Zengwen, QIN Zhixin, et al. Temporal and spatial characteristics of heat exchange at sediment-water interface in a small stratified reservoir [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 63-69. (in Chinese))
- [5] 黄真理. 三峡工程中的几个环境水力学问题 [J]. *中国三峡建设*, 1999, 6(9): 36-39. (HUANG Zhenli. Some issues on environmental hydraulics of TGP [J]. *China Three Gorges Construction*, 1999, 6(9): 36-39. (in Chinese))
- [6] 任华堂,陈永灿,刘昭伟. 三峡水库水温预测研究 [J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2008, 23(2): 141-148. (REN Huatang, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei. Study on water temperature prediction in Three Gorges

- Reservoir [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008,23(2): 141-148. (in Chinese))
- [7] 曹广晶, 惠二青, 胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析 [J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1254-1259. (CAO Guangjing, HUI Erqing, HU Xinge. Analysis of the vertical structure of water temperature in the vicinity area of Three Gorges Dam since the Three Gorges Reservoir impounds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1254-1259. (in Chinese))
- [8] 邓云, 肖尧, 脱友才, 等. 三峡工程对宜昌-监利河段水温情势的影响分析 [J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 551-560. (DEN Yun, XIAO Yao, TUO Youcai, et al. Influence of Three Gorges Reservoir on water temperature between Yichang and Jianli [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 551-560. (in Chinese))
- [9] 蔡玉鹏, 杨志, 徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 70-77. (CAI Yupeng, YANG Zhi, XU Wei. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges Reservoir on natural reproduction of the four major Chinese carps [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2017, 49(1): 70-77. (in Chinese))
- [10] 任实, 刘亮, 张地继, 等. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库水温分布特性 [J]. 人民长江, 2018, 49(3): 32-35. (REN Shi, LIU Liang, ZHANG Diji, et al. Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs [J]. Yangtze River, 2018, 49(3): 32-35. (in Chinese))
- [11] 李勋贵, 王晓磊, 苏贤保. 黄河上游河道一维河道水温模型和经验公式法对比 [J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 24-29. (LI Xungui, WANG Xiaolei, SU Xianbao. Comparison of one-dimensional river water temperature model and empirical formula method in upper reaches of Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 24-29. (in Chinese))
- [12] 王亦斌, 孙涛, 梁雪春, 等. 基于 EMD-LSTM 模型的河流量水位预测 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 40-47. (WANG Yibin, SUN Tao, LIANG Xuechun, et al. Prediction of river water flow and water level based on EMD-LSTM model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 40-47. (in Chinese))
- [13] 许丹, 陆宝宏, 程昕野, 等. 应用 Logistic 曲线预测水库垂向水温 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2013, 41(3): 235-240. (XU Dan, LU Baohong, CHENG Xinye, et al. Application of logistic curve to forecasting vertical distribution of water temperature in reservoirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 235-240. (in Chinese))
- [14] ZHU S, PTAK M, CHOIŃSKI A, et al. Exploring and quantifying the impact of climate change on surface water temperature of a high mountain lake in Central Europe [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 192(1):7.
- [15] QIU R, WANG Y, RHOADS B, et al. River water temperature forecasting using a deep learning method [J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126016.
- [16] 朱贵重, 胡松. 基于 LSTM-RNN 的海水表面温度模型研究 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(2): 191-197. (ZHU Guisong, HU Song. Study on sea surface temperature model based on LSTM-RNN [J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(2): 191-197. (in Chinese))
- [17] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库 (千岛湖) 热力学状况及热力分层研究 [J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 447-454. (LIU Mingliang, WU Zhixu, HE Jianbo. Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 447-454. (in Chinese))
- [18] HE Wei, LIAN Jijian, ZHANG Jian, et al. Impact of intra-annual runoff uniformity and global warming on the thermal regime of a large reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 1085-1097.
- [19] KOUE J, SHIMADERA H, MATSUO T, et al. Evaluation of thermal stratification and flow field reproduced by a three-dimensional hydrodynamic model in Lake Biwa, Japan [J]. Water, 2018, 10(1): 47.
- [20] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 48-55. (TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 48-55. (in Chinese))
- [21] 王俊娜, 李翀, 廖文根. 三峡-葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响 [J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 84-90. (WANG Junna, LI Chong, LIAO Wengen. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream eco-hydrology [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 84-90. (in Chinese))
- [22] 张蔚, 郁夏琰, 徐怡, 等. 三峡流量调节对长江口潮汐不对称的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48(2): 143-149. (ZHANG Wei, YU Xiayan, XU Yi, et al. Influence of discharge regulation by Three Gorges Dam on tidal asymmetry in Yangtze Estuary [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 143-149. (in Chinese))

(下转第 101 页)