

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220976

# 基于 CE-QUAL-W2 模型的功果桥水库与景洪水库水温模拟对比

赖红<sup>1</sup>, 杨延东<sup>2</sup>, 袁嫒<sup>3</sup>, 张丽梅<sup>3</sup>, 袁旭<sup>1</sup>, 陆颖<sup>1</sup>

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南昆明 650500; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南昆明 650031; 3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院, 云南昆明 650051)

**摘要:** 为探究地理位置(纬度)差异对库区水温的影响,以规模和运行方式相似的温带功果桥水库和热带景洪水库为研究对象,基于原型观测数据和 CE-QUAL-W2 模型,对比分析功果桥和景洪水库库区水温分布特征。结果表明,CE-QUAL-W2 模型适用于温带及热带水库水温模拟,且能明晰不同气候带水库水温变化差异;景洪库区表层水温升温与降温过程明显滞后于功果桥库区表层水温;功果桥水库和景洪水库均为弱分层型水库,功果桥水库春、夏季呈弱分层状态,秋、冬季的分层现象不明显;景洪水库夏、秋季呈弱分层状态,春、冬季的分层现象不明显。研究结果可为澜沧江类似规模电站的水温研究提供参考。

**关键词:** 水温; CE-QUAL-W2 模型; 功果桥水库; 景洪水库; 澜沧江

**中图分类号:** TV697.21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0114-04

## 1 概况

功果桥水电站是澜沧江干流中下游河段“两库八级”的第一级水电站,坝顶高程 1 310 m,最大坝高 105 m,水库面积 13.23 km<sup>2</sup>,设计回水长度 44.3 km,水面平均宽度 70 m,平均水深 50 m,坝址以上控制流域面积 9.72 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,总库容 3.16 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,为日调节型水库。功果桥库区属于高山峡谷地貌,处于低纬度高海拔的温带、亚热带季风气候区。景洪水电站是澜沧江干流中下游河段“两库八级”的第六级,是目前澜沧江出境前最后一个已建水电站,坝顶高程 612 m,最大坝高 108 m,拦河水库面积 32.81 km<sup>2</sup>,回水长度约 105 km,水面平均宽度 180 m,平均水深 40 m,坝址以上控制流域面积 14.91 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,总库容 11.39 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,为日调节型水库。景洪库区属中山宽谷地貌,处于北热带至南亚热带季风气候区。研究区示意图见图 1。功果桥水库和景洪水库坝型、规模相似,均为狭长河道型、闸坝式、日调节型水库,且坝前水深均不超过 100 m。两座水库分别代表了澜沧江干流已建水库的两种基本类型,即高山峡谷温带型(功果桥水库)和中山宽谷热带

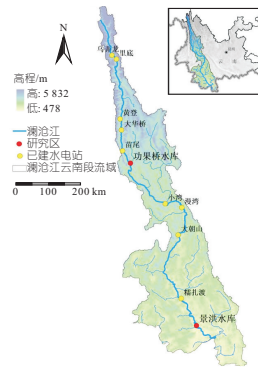


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

型(景洪水库),分析这两座水库的水温结构特征有助于判别不同环境对水库水温造成的影响<sup>[1,2]</sup>。CE-QUAL-W2 立面二维水温模型假设横向上水温保持不变,适合模拟狭长河道型水库的水温变化,但在澜沧江流域尚未展开应用。因此,基于 CE-QUAL-W2 水温模型,模拟功果桥库区和景洪库区的水温分布,分析其水温时空分布规律以及模型的适用性。

## 2 研究方法

### 2.1 原型观测

收稿日期: 2022-05-01, 修回日期: 2022-06-20

基金项目: 华能澜沧江公司科技项目(HY2020/S9); 云南省万人计划项目(QNBJ2018166)

作者简介: 赖红(1998-),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源, E-mail: laihong\_ynu@foxmail.com

通讯作者: 陆颖(1978-),男,博士、副研究员、硕导,研究方向为生态水文, E-mail: yinglu@ynu.edu.cn

在功果桥、景洪水库坝前拦污漂布设自研 S1 垂向水温链设备,在功果桥、景洪水文站的测井水面以下 1 m 内布设 Onset HOBO U22 型水温自动记录仪,在大坝坝址专用气象观测区布设 Onset U30 自动气象站,监测气温、湿度、风速风向、日照时数等水文气象要素,监测时间为 2018 年,采样间隔为 30 min。

## 2.2 数值模拟法

CE-QUAL-W2 模型<sup>[3]</sup>(简称 W2 模型)属于二维水动力学模型,针对水库研制,但也适用于河流、湖泊等水体,尤其适用于相对狭长水体。模型可预测水体流速、温度等的变化,也可预测水质参数,达 21 项。模型已发展 30 多年,成功应用于全球超 500 个水域<sup>[4-6]</sup>。

## 2.3 模拟精度评价指标

W2 模型水动力参数率定及验证的评价指标选用平均绝对误差 ( $M_{MAE}$ ) 和均方根误差 ( $R_{RMSE}$ )<sup>[7]</sup>,可表征模拟结果拟合精度, $M_{MAE}$ 、 $R_{RMSE}$  值越小,表明模拟精度越高。

# 3 CE-QUAL-W2 水温模型的构建

## 3.1 数据来源

W2 模型的输入数据主要包括功果桥及景洪水库的水文数据(入库流量、出库流量、水位)、气象数据(气温、湿度、风速、风向、云量)、地形数据及水温数据(坝前表层水温、坝前部分垂向水温数据)。其中,水文数据为 2018~2019 年逐日数据,由华能澜沧江公司提供;地形数据为 ASTER GDEM,分辨率为 30 m,来自美国航天局(NASA);气象和表层水温数据均为 2018~2019 年逐日实测数据。

## 3.2 库区网格划分

功果桥水库回水区长度约 44 km,划分为  $73 \times 114$ (纵向 $\times$ 垂向)个矩形单元,将景洪水库至坝前 70 km 划分为  $140 \times 115$  个矩形单元。两水库纵向网格单元间距为 500 m,垂向网格层厚均为 1 m,生成的网格图见图 2。

## 3.3 初始条件与边界条件

假定初始水位沿程不变,模型初始流速均设为零,水体类型为淡水,其余各参数的初始值均取模型开始运算当天的实测值。模型边界条件主要为出、入库流量,入流水温,水体表面边界及河床底部无滑移边界,所有边界输入时间间隔为 1 d。

## 3.4 参数率定

对模型参数进行调算,确定模型主要敏感性参数的最佳取值,见表 1。

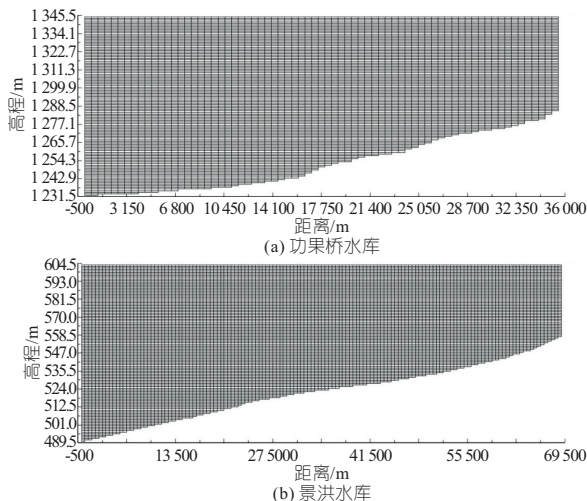


图 2 水库垂向网格划分图

Fig. 2 Vertical meshing of reservoir

表 1 W2 模型敏感性参数取值

Tab. 1 W2 model sensitivity parameter value

参数名称	变量名	功果桥水库取值	景洪水库取值
曼宁系数	FRICT	0.04	0.04
消光系数	EXH2O	0.40	0.45
风遮蔽系数	WSC	0.90	0.90
动态光遮蔽系数	Shade	0.60	0.70

(1)水位率定。模型模拟水位过程线和实测水位过程线的吻合程度,可表征模型库区水量平衡拟合精度。分别对功果桥、景洪水库 2018 年坝前水位进行率定,结果见图 3。功果桥水库模拟结果  $M_{MAE}$  为 0.22 m,  $R_{RMSE}$  为 0.31 m;景洪水库模拟结果  $M_{MAE}$  为 0.19 m,  $R_{RMSE}$  为 0.32 m,表明模型对河道形态拟合较好,能较好地反映功果桥和景洪水库水位波动情况,满足水动力模拟计算。

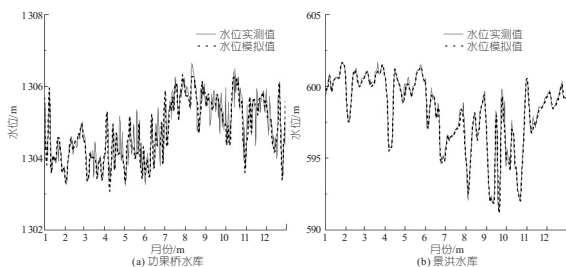


图 3 坝前水位实测值与模拟值

Fig. 3 Measured and simulated water level in front of dam

(2)水温率定及验证。采用 2018 年 1~2、4~5、7~8、10~11 月功果桥、景洪库区实测表层水温值与模拟值进行表层水温率定,以 2018 年 3、6、9、12 月(图 4)表层水温进行验证。受野外监测不可控因素影响,获取的垂向水温监测数据不连续,采用 2018 年四个季度 3、6、9、12 月的<sup>#</sup>15 垂向水温实测值与模拟值进行垂向水温验证。对于坝前表层水温模拟结果,功果桥水库率定期的  $M_{MAE}$  为 0.57 °C,  $R_{RMSE}$  为 0.68 °C;验证期的  $M_{MAE}$  为

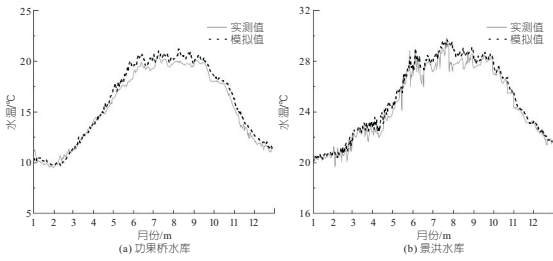


图 4 坝前表层水温实测值与模拟值

Fig. 4 Measured and simulated surface water temperature in front of dam

0.44 °C,  $R_{RMSE}$  为 0.54 °C。景洪水库率定期的  $M_{MAE}$  为 0.51 °C,  $R_{RMSE}$  为 0.66 °C, 验证期的  $M_{MAE}$  为 0.38 °C,  $R_{RMSE}$  为 0.48 °C, 误差在可接受范围内。对于坝前垂向水温模拟结果, 功果桥水库的  $M_{MAE}$ 、 $R_{RMSE}$  均小于 0.6 °C, 景洪水库的  $M_{MAE}$ 、 $R_{RMSE}$  均小于 0.05 °C, 模拟结果较好, 表明 W2 模型能较好地呈现功果桥、景洪水库垂向水温分层特性, 模型参数取值较合理。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 表层水温分析

功果桥、景洪库区表层水温变化趋势基本一致, 皆呈抛物线状, 水温先下降后升高, 后缓慢下降(图 5), 但景洪库区表层水温升温与降温过程明显滞后于功果桥库区表层水温。功果桥于 6 月 5 日开始升温, 但景洪于 6 月 19 日才开始升温; 功果桥于 7 月 26 日停止降温并开始升温, 但景洪库区仍处于降温趋势; 两库区的气温过程线也有相同变化规律。此外, 功果桥库区年平均水温为 15.9 °C, 变幅约为 12 °C; 景洪库区年平均水温为 25.9 °C, 变幅约为 10 °C。功果桥库区和景洪库区最低水温均出现在 2 月, 分别为 9.9、20.2 °C, 功果桥库区最高水温出现在 9 月, 为 21.7 °C, 景洪库区最高水温出现在 7 月, 为 29.8 °C。景洪库区表层水温的最低值和年平均水温均比功果桥库区高 10 °C, 最高值高 8 °C。这与功果桥库区和景洪库区所处气候带有直接关系, 功果桥库区处于

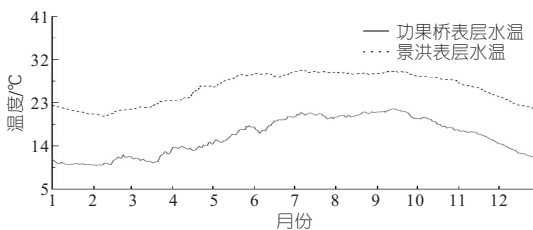


图 5 功果桥库区和景洪库区表层水温对比图

Fig. 5 Comparison of surface water temperature between Gongguoqiao and Jinghong Reservoir

温带, 景洪库区处于热带, 表层水温变化主要受气温影响, 与气温变化最为接近。

### 4.2 垂向水温分析

(1) 功果桥水库。功果桥水库的水面平均宽度为 70 m, 平均水深为 50 m, 依据水库宽深比法, 水库宽深比  $R$  为 1.4 ( $< 30$ ), 初步判定功果桥水库为分层型水库。利用校准后的 W2 模型可得到功果桥水库坝前垂向逐月平均水温, 见图 6。2019 年功果桥坝前表层(水下 0~1 m)水温在 10~22 °C 内变化, 底层(水下 50 m)水温在 9~19 °C 内变化, 底层水温随表层水温变化而变化, 变化幅度超过 10 °C。1~3 月库区水温基本不分层, 整体水温较低, 在 10 °C 左右, 表层水温有逐渐升温的现象。春季 3 月库区水温开始出现分层趋势, 4~9 月垂向水温出现弱分层现象, 随着 4 月份气温升高、太阳辐射增强, 表层水温逐渐升高, 变幅大约为 7 °C, 表底层温差先增加后减小, 最大温差出现在 7 月份, 接近 6 °C。春季 4 月温跃层深度在 1~4 m 之间, 5 月温跃层在 1~3 m 之间, 温跃层厚度呈变薄趋势, 且在 5 月水库底部有温跃层出现趋势。这是由于 5 月份处于春夏季更替期, 气温和水温波动较大, 同时入库流量增大, 导致夏季 6~7 月接近库表的温跃层消失, 库底 36~50 m 出现温跃层, 且 7~9 月温跃层深度增加, 在秋季 9 月温跃层厚度为 3 m。夏季温跃层总厚度增加, 平均强度呈现下降趋势, 夏季温跃层厚度大于春季。10~12 月库区水温掺混均匀, 基本不分层, 随着气温逐渐下降, 水库处于降温状态, 表底层温差缩小, 秋季 10 月库区整体水温在 18~19 °C 范围内变化, 秋季 11 月库区在 16 °C 左右, 冬季 12 月库区大约降至 12 °C, 表底层温差均小于 1 °C。

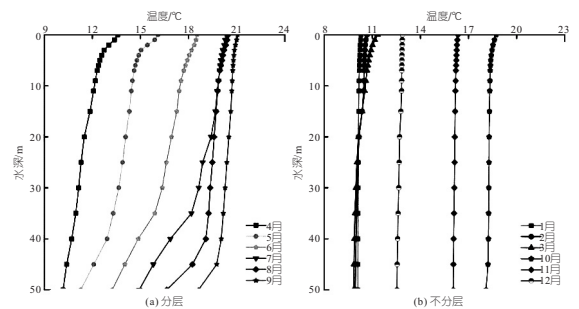


图 6 功果桥水库坝前垂向月均水温

Fig. 6 Vertical monthly average water temperature in front of the Gongguoqiao Reservoir

从坝前垂向水温分层整体情况来看, 功果桥水库为弱分层型水库, 春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)呈弱分层状态, 秋季(9~11 月)、冬季(12~次年 2 月)的分层现象不明显。

(2)景洪水库。景洪水库的水面平均宽度为 180 m,平均水深为 40 m,依据水库宽深比法, $R$  值为 4.5 ( $<30$ ),初步判定景洪水库为分层型水库。利用校准后的 W2 模型,可得到景洪水库坝前垂向逐月平均水温,见图 7。由图 7 可看出,2019 年景洪坝前表层(水下 0~1 m)水温在 20~30 °C 内变化,底层(水下 90 m)水温在 18~27 °C 内变化,底层水温随表层水温变化而变化,变幅超过 9 °C。1~5 月库区基本不分层,水温随水深增大呈下降趋势,随着气温降低,冬季 2 月表层水温降至全年最低(20.9 °C),表底层水温差减小。春季 3 月开始库区气温回升,水温进入吸热期。由于气温上升较缓慢,上层水体吸收的热量难以迅速传递到深层水体,上中下层水温依然均匀分布,3 月表底层水温差约为 1.7 °C,为全年最小。春季 5 月表底层水温差增大,水温在垂向上出现分层的迹象,6~11 月库区出现弱分层现象。6~9 月气温升高,日照时数增多,水体吸收的太阳辐射能量也增加,库区整体水温升高,表底层温差先减小后增加,夏季 7 月表层水温达到 29.4 °C,为全年最高。秋季 9 月气温开始下降,库区水温开始降低,表底层温差减小,10 月表底层温差为 3.8 °C,达到全年最大。夏季 6 月温跃层深度在 7~9 m 之间,7 月温跃层在 6~9 m 之间,8 月温跃层在 5~8 m 之间,温跃层位置逐渐抬高。秋季 9 月温跃层深度在 5~10 m 之间,温跃层厚度增加。10 月温跃层深度在 7~11 m 之间,11 月在 9~11 m 之间,温跃层位置降低,且呈变薄趋势。12 月库区水温掺混均匀,基本不分层。

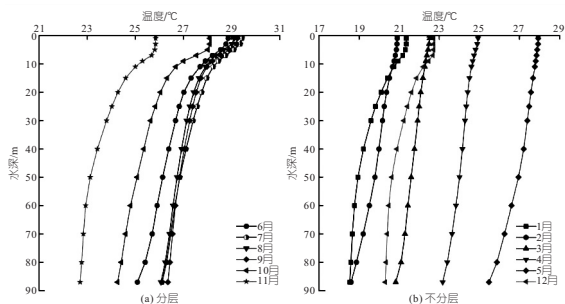


图 7 景洪水库坝前垂向月均水温

Fig. 7 Vertical monthly average water temperature in front of the Jinghong Reservoir

从坝前垂向水温分层整体情况来看,景洪水库为弱分层型水库,夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)呈弱分层状态,春季(3~5 月)、冬季(12~次年 2 月)的分层现象不明显。

功果桥水库春季温跃层出现在 1~4 m 范围内,而夏季在接近库底位置形成温跃层,这可能与

夏季入库流量有关。夏季较大径流潜入库区中部水层,上层温跃层受到破坏,在下部形成新的温跃层。而景洪水库温跃层始于夏季,结束于秋季,基本保持在 5~11 m 范围内,气温也是影响温跃层厚度的重要因素,随着秋季 9 月气温降低,温跃层深度开始增加,厚度减少。

## 5 结论

a. 在澜沧江流域库区水温模拟中,CE-QUAL-W2 模型展示出较好的适用性,可为水库水温预测及生态调度提供计算平台。

b. 景洪库区表层水温升温与降温过程明显滞后于功果桥库区表层水温。从库区水温变化看,两水库均为弱分层型,但水温分布规律有所不同,功果桥水库春、夏季呈弱分层状态,景洪水库夏、秋呈弱分层状态。

c. 基于 CE-QUAL-W2 水温模型,两水库所呈现的水温分布规律有所不同,除了水库自身的特性影响外,两水库所处地形与纬度差异的影响也较为明显,功果桥水库为高山河谷型,景洪水库为中山宽谷型,景洪库区表面积更大,表层水体受风力影响大,从而更易形成明显的表温层,但库区地形和纬度对库区水温分异规律的影响及机理有待进一步监测和研究。

## 参考文献:

- [1] 梁斯琦,陆颖,杨福平,等. 澜沧江小湾水电站坝前水温垂向分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 156-162.
- [2] 毕晓静,陆颖,保文秀,等. 功果桥水库坝下河道水温原型观测及分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 56-58, 135.
- [3] COLE T M, BUCHAK E M. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 2.0. user manual [M]. Civil and environmental engineering faculty publications and presentations. 2003: 5-10.
- [4] 宋丹, 华国春, 黄孝容, 等. 西藏地区水库水温预测方法适用性研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 68-71.
- [5] 刘有志, 相建方, 陈文夫, 等. 狭长型水库蓄水至初期运行阶段水温演化规律研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1412-1422.
- [6] 姚嘉伟, 刘晓波, 董飞, 等. 平原型水库水体热分层的水质响应特征与水质改善成效[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 158-167.
- [7] 龙良红, 徐慧, 鲍正风, 等. 溪洛渡水库水温时空特性研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(4): 79-89.

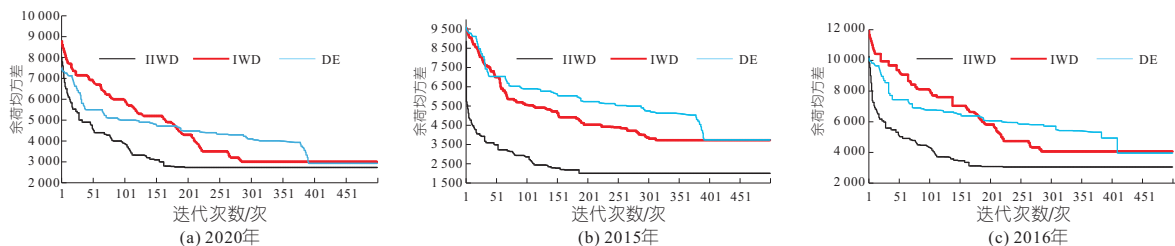


图 5 算法进化过程图

Fig. 5 Process diagram of the three algorithms

## 5 结论

a. 本文提出了 IIWD 算法并建立了以调峰后电网余荷均方差最小为目标的梯级水库群优化调度模型,以溪洛渡、向家坝、三峡水库为例,采用提出的 IIWD 算法求解,同时与 IWD 和 DE 算法进行对比。

b. IIWD 算法能够更好地平抑电网余荷波动,更大程度上降低了电网余荷峰谷差和均方差,更加充分地响应了电网调峰需求,同时也具备更快的求解速度,为梯级水库群优化调度提供了一种新的高效算法。

### 参考文献:

[1] 张世钦. 基于改进粒子群算法的风光水互补发电系

统短期调峰优化调度[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 208-212.

[2] 孟庆喜. 多电网调峰负荷分配问题的优化算法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.

[3] LIU S, FENG Z K, NIU W J, et al. Peak operation problem solving for hydropower reservoirs by Elite-Guide Sine Cosine algorithm with Gaussian local search and random mutation [J]. Energies, 2019, 12(11):1-24.

[4] 吴中华. 智能汽车避障路径的智能水滴算法规划方法[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(1): 1-5, 8.

[5] 白鹤, 刘紫燕, 唐虎, 等. 改进智能水滴算法的协作通信能效资源分配[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22): 129-134.

[6] 肖小刚, 周建中, 张祥, 等. 多级协同模式下华中电网大规模水电站群跨网调峰调度研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 66-70.

## Research on Peak Shaving Scheduling of Cascade Reservoir Groups Based on Improved Intelligent Water Drop Algorithm

WANG Qi, XING Long, JIAN Tie-zhu, ZHAO Ming-liang, LI Shuai

(River Basin Hub Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of insufficient population diversity, easy to fall into local optimum, and slow initial solution speed of intelligent water drops algorithm (IWD), an improved IWD algorithm (IIWD) was proposed, which introduces the Logistic chaotic initialization method and the differential variation operator of the difference evolution algorithm (DE), and improves the neuronal update mode of the self-organizing mapping algorithm(SOM) and introduces it into the sub-update process of the optimal individual of the IWD algorithm. The IIWD was applied to the peak shaving scheduling of cascade reservoir groups. Compared with IWD and DE, the efficiency of the IIWD was verified.

**Key words:** intelligent water drop algorithm; self-organizing mapping algorithm; peak shaving scheduling; groups of cascade reservoirs

\*\*\*\*\*  
(上接第 117 页)

## Comparison of Water Temperature Simulation Between Gongguoqiao and Jinghong Reservoir Based on CE-QUAL-W2 Model

LAI Hong<sup>1</sup>, YANG Yan-dong<sup>2</sup>, YUAN Yuan<sup>3</sup>, ZHANG Li-mei<sup>3</sup>, YUAN Xu<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1</sup>

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650031, China;

3. Kunming Survey Design & Research Institute of China Power Construction Group, Kunming 650051, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of geographical location (latitude) differences on the water temperature of the reservoir area, the temperate Gongguoqiao Reservoir and the tropical Jinghong reservoir, which are similar in scale and operation mode, were taken the research objects. Based on the prototype observation data, the CE-QUAL-W2 model was established to compare and analyze the water temperature distribution characteristics of the Gongguoqiao and Jinghong reservoir. The results show that the CE-QUAL-W2 model can be applied to the simulation of temperate and tropical reservoirs, and the difference of water temperature changes in reservoirs in different climatic zones can be clarified. The temperature increase and decrease of the surface water temperature in the Jinghong reservoir area obviously lags behind the surface water temperature in the Gongguoqiao reservoir area. Both Gongguoqiao and Jinghong reservoir are weakly stratified reservoirs. Gongguoqiao Reservoir is weakly stratified in spring and summer, while the stratification in autumn and winter is not obvious. Jinghong Reservoir shows weak stratification in summer and autumn, but not in spring and winter. The results can provide reference for water temperature research of similar-scale power stations on the Lancang River.

**Key words:** water temperature; CE-QUAL-W2 model; Gongguoqiao Reservoir; Jinghong Reservoir; Lancang River