

澜沧江梯级水电开发对流域水温的影响

李 昱^{1,2}, 龚 珂¹, 孙 艳¹, 吴雨娇¹

(1. 大连理工大学建设工程学院; 2. 大连理工大学宁波研究院)

摘要:为研究澜沧江梯级水电开发对流域水温的影响,构建了一维-三维耦合水温模型,系统模拟了功果桥至澜沧江出境断面河段梯级河库系统水温的时空变化。结果表明:水温变化呈现深大水库库区蓄热—坝前低温下泄—自然增温的连续循环过程,并表现出显著的累积效应;深大梯级水库减缓来流水体流速,蓄热效应导致上游小湾水库年均表层水温较天然状态升高 1.5℃;由于深大水库水温分层并下泄低温水,小湾水库年均下泄水温与天然状态的温差为-2.4℃,其变动汇水区的温差随气温和辐射回升至-1.9℃,对小湾水库坝下鱼类栖息地构成全年性低温胁迫;下游糯扎渡水库进一步强化了这一过程,坝前年均水温增幅为 1.7℃,年均下泄水温与天然状态温差收窄至-1.6℃,在纬度与气象梯度的共同作用下,其变动汇水区的热恢复能力优于小湾水库,致使糯扎渡水库坝下至出境断面区间的年均水温高于天然 0.3℃,其中 8 月至翌年 1 月对鱼类栖息地形成高温胁迫;梯级水电开发对水温的累积效应使水温由单一低温胁迫转为低温与高温双重胁迫。

关键词:梯级水电开发;水温分层;水温滞时;坦化效应;澜沧江

Impact of cascade hydropower development on water temperature in the Lancang River Basin//Li Yu^{1,2}, Gong Ke¹, Sun Yan¹, Wu Yujiao¹(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: To study the impact of cascade hydropower development on water temperature in the Lancang River Basin, a 1D-3D coupled water temperature model was constructed, and the spatiotemporal variation of water temperature in the cascade reservoir system from Gongguo Bridge to the international boundary section of the Lancang River was systematically simulated. Results indicate that water temperature changes exhibit a continuous and cyclical process: reservoir heat storage in deep-large reservoirs-low temperature discharge upstream of dams-natural warming, demonstrating significant cumulative effects. The deep cascade reservoirs slow down the flow velocity of incoming water, and the thermal storage effect causes the annual average surface water temperature of the upstream Xiaowan Reservoir to increase by 1.5℃ compared to the natural state. Due to the stratification of water temperature and the discharge of low-temperature water in deep-large reservoirs, the annual average temperature difference between the discharge water temperature and the natural temperature in Xiaowan Reservoir is -2.4℃. The temperature difference in the fluctuating catchment area rises to -1.9℃ with the temperature and radiation, posing a year-round low-temperature stress on the fish habitat under the dam of Xiaowan Reservoir. The downstream Nuozhadu Reservoir further strengthened this process, with an average annual increase in water temperature in front of the dam of 1.7℃, and the average annual discharge water temperature difference narrowing to -1.6℃ compared to the natural temperature. Under the combined effect of latitude and meteorological gradient, the thermal recovery capacity of the fluctuating catchment area is better than that of Xiaowan Reservoir, resulting in an average annual water temperature of 0.3℃ higher than the natural temperature in the section from the dam to the exit of Nuozhadu Reservoir. From August to January of the following year, it poses a high temperature stress on fish habitats. The cumulative effect of cascade hydropower development on water temperature has led to a shift from a single low temperature stress to a dual stress of low and high temperatures.

Key words: cascade hydropower development; water temperature stratification; water temperature residence time; flattening effect; the Lancang River

水温是水环境中的重要因子,直接影响水体的物理化学过程与水生生物的生长繁殖。大规模水库建设显著改变了河道水温沿程演变

的自然连续性,水温因多过程耦合作用而更趋复杂,对下游生态构

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC3205100)
作者简介:李昱(1988—),男,教授,博士,主要从事流域水资源管理研究。E-mail:liyu@dlut.edu.cn
通信作者:孙艳(1992—),女,助理研究员,博士,主要从事水资源及水环境管理研究。E-mail:syan@dlut.edu.cn

成潜在威胁^[1]。因此,明确梯级河库系统对水温的连续影响过程是河流生态保护的基础。现有研究多基于建库前后的监测数据,从实证角度揭示水电开发对水温的影响。例如:张弛等^[2-3]系统识别了澜沧江不同类型水库的水温结构特征,明确径流式电站以纵向水温变化为主,深大水库垂向分层显著,呈现由库表至库底的表温层、温跃层和底温层;Wang等^[4]的研究表明太阳辐射和气温对深大水库表层水温影响显著,表层水温存在蓄热效应。然而,关于深大水库低温水下泄对下游河道的实际影响,现有研究尚未形成一致结论。例如:Xu等^[5-6]认为梯级建设对澜沧江水温沿程变化无显著影响;蒋丽等^[7-8]则认为低温水下泄导致下游乃至出境断面水温降低,可能引发低温胁迫。这一分歧也使得对鱼类等水生生物生态适应性的评估存在不同判断。现有研究多局限于单一水库或局部断面,受监测数据时空不连续所限,难以精细刻画水温在“库-河-库”连续系统中的传递与演变过程。尤其是在梯级水库串联作用下,水温从上游逐级累积并影响至出境断面的全链条机制,仍缺乏系统性模拟与机理阐释,从而制约了对全流域水温动态格局的整体认知。

数值模型是突破观测资料限制、揭示建库对水温影响认知的重要手段^[9-10]。三维数值模型能够更好地刻画水体流场与温度场之间的相互作用及其驱动特性,在空间上实现多维水温模拟,在时间上实现连续水温模拟,适用于热分层显著的深大水库^[11]。复杂河库系统通常由多座深大水库、径流式电站与变动回水区串联组成,空间跨度大、气候地貌多样^[12-14]。系统内水库类型与运行方式差异显著^[15],水动力与热力过程高度异质,耦合建模难度较高。在“库-河-库”多段串联中,水温受水体输移与混合、大气热通量交换等多重过程共同驱动,沿程多断面的同步率定涉及多过程的高维参数协同^[16]。因而,构建具备精度与稳定性的多维水温模型以表征系统尺度演变过程仍面临较大挑战。

鉴于此,本文以澜沧江下游的小湾入库断面至景洪下游出境断面为研究区,构建一维-三维耦合水温模型,突破以往单一水库的研究局限,系统揭示梯级水库作用下水温的时空分布特征及其对鱼类栖息环境的影响,以期为面向生态保护的梯级联合调度提供理论支撑与决策依据。

1 研究区概况

澜沧江发源于青藏高原,其下游在云南境内,河段自北向南全长 1 200 km,天然落差达 1 770 m^[16]。澜沧江流域主要位于亚热带季风气候区,太阳辐射

强,降水年内不均,汛期(6—10 月)降雨集中,约占全年降水量的 85%;气温呈现季节性变化,夏季高冬季低^[17]。此外,气温与辐射呈现明显的空间梯度,随着海拔降低,年平均气温从 18℃ 逐渐升高为 22℃,年均辐射从 184 W/m² 升至 193 W/m²。目前,澜沧江干流已建成 11 座水电站,其核心区域为功果桥至出境断面(图 1)。核心区域河长 700 km,梯级水库贡献了 67% 的水力发电^[18],建有 6 座水电站,依次为:功果桥水库、小湾水库、漫湾水库、大朝山水库、糯扎渡水库、景洪水库。小湾水库、糯扎渡水库是多年调节的深大水库,坝高分别为 294、262 m,库容分别约为 150 亿、237 亿 m³,其余水库则为季调节或日调节,调节能力较弱。

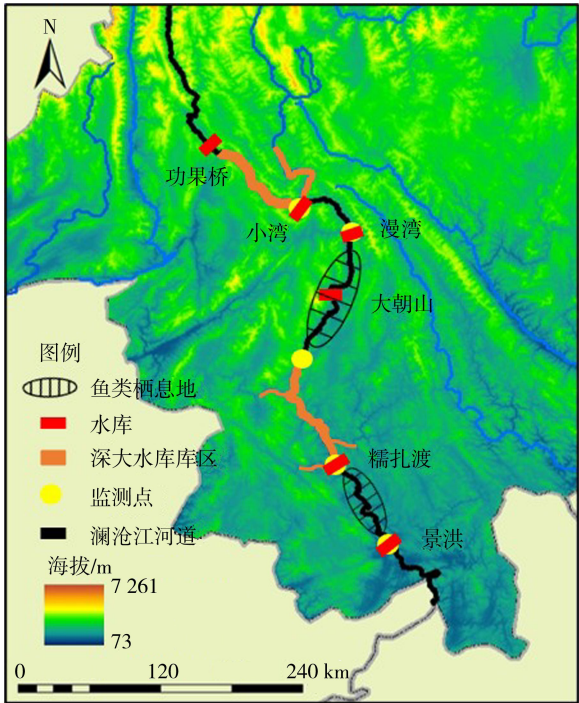


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

作为中南半岛淡水生态系统的中心,澜沧流域孕育着丰富的大型淡水鱼类和洄游鱼类。下游梯级河段的主要鱼类为鲤形目和鲈形目等^[19],其中,糯扎渡至景洪河段栖息着多种重点保护鱼种,包括中华鲱鲇^[20]、中国结鱼^[21]等。梯级水电站的建设改变了河流的水文和水温情势,进而可能对流域内鱼类造成不可逆的影响。作为国际问题争端的流域,鉴于站点观测的时空局限,全面探究澜沧江上游梯级水电开发对流域内及下湄公河水温的时空影响对于河流水电建设及可持续发展具有重要意义。

2 研究方法

为复现梯级水库建设前后的水温演变过程,综

合考虑水动力条件、水库类型及气象影响等因素,本文针对不同情景分别建立物理模型。天然状态下,河流水温主要沿纵向变化,采用一维模型进行模拟;不同水库水温结构差异显著,采用一维-三维耦合水温模型模拟“库-河-库”系统水温的多时空动态变化。

利用适合模拟大范围纵向水温变化的 EIAW 模型^[22]开展变动回水区的一维水温模拟。模型以小湾水库建设前的气温、辐射等气象条件为输入,假设水体通过辐射、蒸发与对流与大气进行热量交换,模拟日尺度的天然条件下水温的时空演变过程,为后续梯级开发影响分析提供对照基准。

在梯级水库中,小湾、糯扎渡两座深大水库水体形成稳定的水温分层,一、二维模型难以解析垂向结构,故采用 Delft3D^[2,23] 构建三维水动力-水温耦合模型,模拟不同气象条件及水库调度下的多维度水温响应。而漫湾、大朝山、景洪等径流电站,水体垂向混合充分,水温变化主要沿纵向分布,因此采用一维水温模型对该类水库与变动回水区进行模拟。图 2 为澜沧江下游梯级水库水温模型拓扑结构,其中一维与三维水温模型的耦合基于单向数据传递原理,沿河流流向将上游模型的输出作为下游模型的输入,以松散耦合的方式复现梯级开发后系统中的时空水温演变特征。

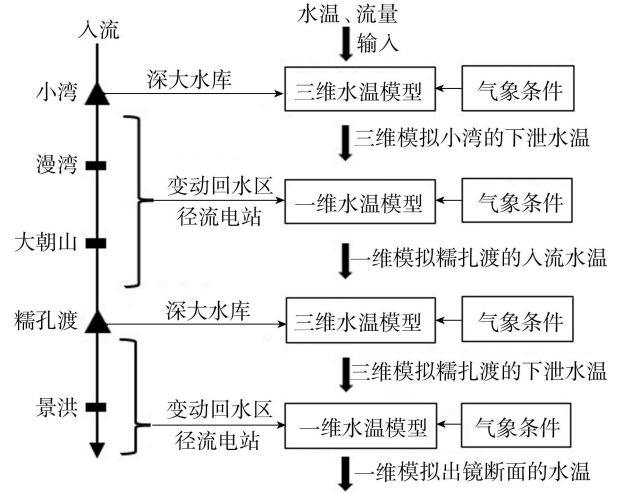


图 2 澜沧江下游梯级水库水温模型拓扑结构
Fig.2 Topological structure of water temperature model for cascade reservoirs in the Lower Lancang River

3 结果与分析

3.1 水温模型率定及验证

采用 1986—2000 年景洪断面的年均旬尺度水温数据对变动回水区的一维模型进行校准,模型模拟结果与实测数据吻合良好,如图 3(a)所示,纳什效率系数 (NSE) 和决定系数 (R^2) 均大于 0.85^[24],

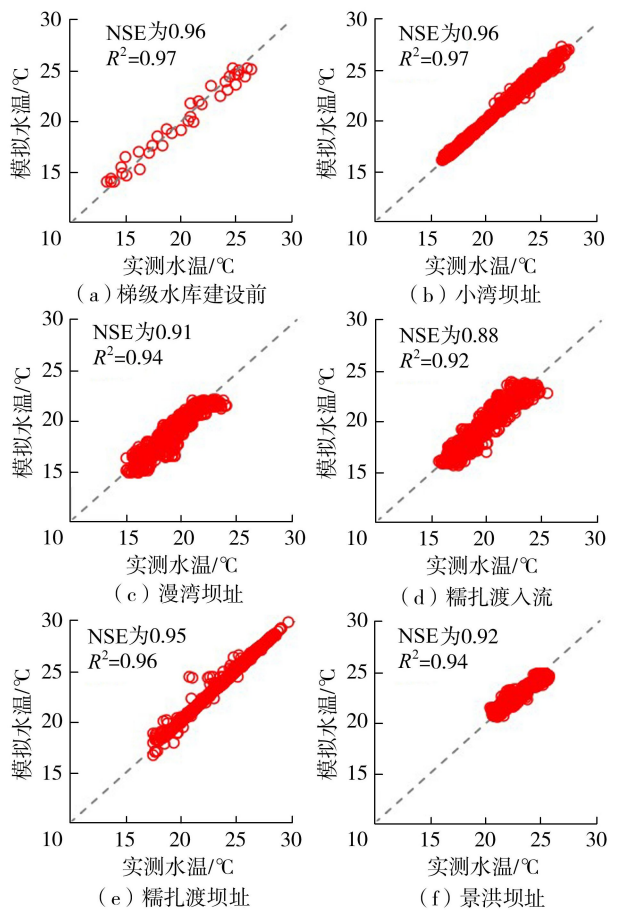


图 3 梯级水库建设前后水温模型的率定结果
Fig.3 Calibration results of water temperature models before and after cascade reservoir construction

模型在纵向尺度上模拟变动回水区水温过程具有可靠性。针对梯级水库建设后情景,基于 2015—2017 年流域内多个代表性断面的日尺度水文与水温观测数据开展耦合模型率定,结果如表 1 所示。首先,分别对小湾、糯扎渡两座深大水库的三维水动力模块进行率定,NSE 和 R^2 均为 0.99,确保三维水温模型的水量平衡;其次,在此基础上,于坝前的垂向断面对三维温度场进行率定,确保水温在不同深度、不同时间的变化在合理范围内,均与实测数据相近;最后,将三维水温模型与一维水温模型进行耦合,依据水流方向依次逐一率定小湾坝址、漫湾坝址、糯扎渡入流、糯扎渡坝址、景洪坝址 5 个关键断

表 1 一维-三维耦合水温模型的率定结果

断面位置	水动力模拟		垂向水温模拟		表层水温模拟	
	NSE	R^2	NSE	R^2	NSE	R^2
小湾坝址	0.99	0.99	0.95	0.95	0.96	0.97
漫湾坝址					0.91	0.94
糯扎渡入流					0.88	0.92
糯扎渡坝址	0.99	0.99	0.89	0.91	0.95	0.96
景洪坝址					0.92	0.94

面的表层水温,如图 3(b)~(f)所示,进一步确保耦合模型能够准确地模拟梯级建设后水温的沿程特征。为检验模型的可靠性,将 2016 年(平水年)率定参数集直接应用于水文条件差异显著的 2015 年(特枯年)与 2017 年(偏丰年)进行验证,结果显示各断面 NSE 与 R^2 均稳定在 0.85 以上,表明模型在不同水文年型下均具备可靠的水温模拟性能。

3.2 梯级水库建设对水温时空分布的影响

为系统解析梯级水库建设对水温的影响,以 4 月、7 月、10 月、1 月的月平均水温分别代表春、夏、秋、冬季水温,绘制建库前后的各季节表层与底层水温沿程分布如图 4 所示。由图 4 可见,澜沧江的天然水温沿程变化特征为线性增温,增温速率主要受到气象条件影控制。在春季和夏季,受气温和辐射的共同驱动,水温上升速度较快,最大温升发生在夏季(由 20.8℃ 升至 25.9℃),每 100 km 的温升速率为 0.73℃;在秋季和冬季,气温随时间逐渐降低,辐射相对夏季减弱,水温上升速度变慢,最小温升发生在冬季(由 16.3℃ 升至 19.4℃),每 100 km 的温升速率为 0.44℃。

梯级水库显著改变了水温沿程的自然演变的连续性,形成水温突变点,导致其空间分布呈现异质性。在深大水库坝前约 50 km 范围内,库区表层水温沿程非线性升高,且坝前水温普遍高于同期天然值;而底层水温则表现出非线性下降,形成明显的垂向温差结构。温升和温降均在夏季最显著,表层温升幅度约为 5℃,底层温降幅度约为 4℃,最大垂向温差达 10℃。由于取水口常位于水体中下层,水库下泄的为较低温度的底层水,导致坝下水温显著低于天然条件。其中夏季温降最为显著,较天然条件下降约 4.5℃,冬季降幅约 1℃,河道水温的季节性

振幅减弱。

下泄水体进入下游变动回水区后,其水温恢复过程受水体滞留时间和水体-大气界面热通量的影响,具体表现为两因素贡献的季节性交替。在春夏季,下泄水温显著低于气温,较大的水气温差增强了热通量交换,使温差驱动成为温升的主导因素;在秋冬季,下泄水温接近甚至高于气温,热通量贡献减弱,此时水体在库尾及回水区等缓流区段的滞留时间延长成为热量累积的主因。同时,空间上受纬度影响,糯扎渡水库下游的水温恢复速率整体高于小湾水库下游,尤其在景洪水库回水区,滞留效应进一步放大,共同导致出境断面水温在部分时段高于天然状态,最大增幅约 3℃。

3.3 深大水库的水温时空特征

水温突变主要来源于深大水库,其运行改变了库区水体的垂向热结构,呈现水温分层现象,即分为表层高温水、位置在水深 40~50 m 左右的温跃层以及 50 m 以下的底层低温水。小湾水库库尾地形狭长、水深较大,入流水温偏低且流速在入库时迅速衰减,分层结构自库尾即开始建立(图 5)。相较之下,糯扎渡水库尾段水深未及百米,入流扰动强,库尾水体呈近似同温状态,直至坝前流速进一步减缓、水体静稳增强,才逐步形成明显的分层结构(图 6)。由图 5、图 6 可见,在热分层结构基础上,表层水温随沿程升高,增温速率显著高于变动回水区。在表层水温最高的夏季,糯扎渡水库表层水温每 100 km 升温速率为 5.6℃,小湾水库的表层水温每 100 km 升温速率为 3.9℃,分别为变动回水区温升速率的 8.0、5.6 倍。流速减缓与滞留时间延长是造成这一差异的主要原因,非汛期蓄水阶段维持高水位运行,表层水平平均流速仅为 0.06 m/s,是天然状态的 6%~

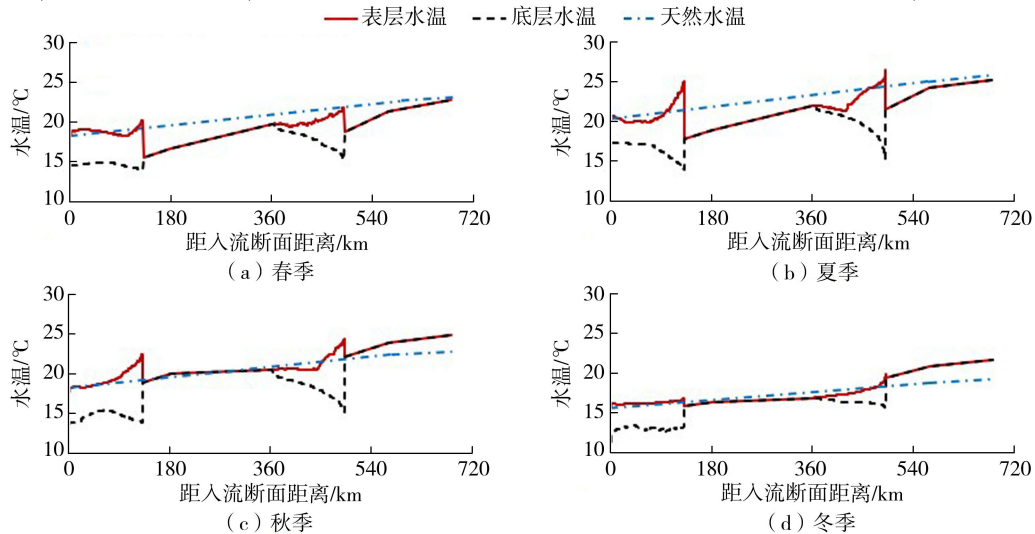


图 4 梯级水库建设后不同季节水温在空间上的变化

Fig. 4 Spatial variations in water temperature of different seasons after cascade reservoir construction

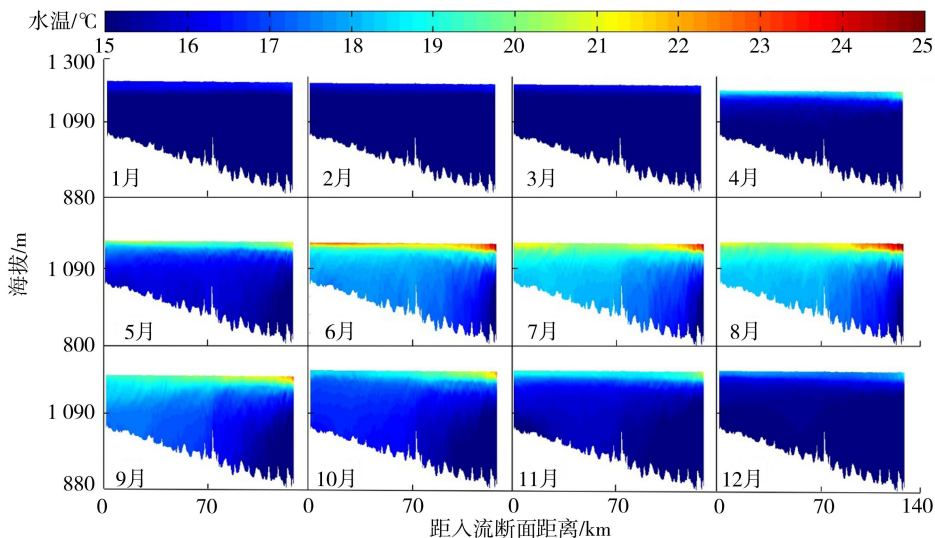


图 5 小湾水库库区水温的时空变化

Fig. 5 Spatiotemporal variation of water temperature in Xiaowan Reservoir area

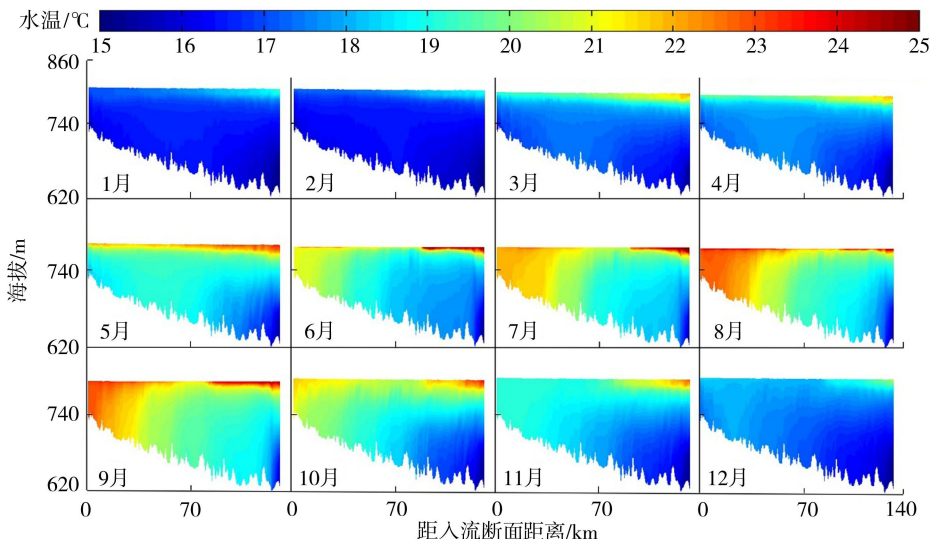


图 6 糯扎渡水库库区水温的时空变化

Fig. 6 Spatiotemporal variation of water temperature in Nuozhadu Reservoir area

10%, 年均滞留时间约为 40 d。长时间暴露在辐射强烈的表层水受热显著, 且因流速低、混合弱, 热量难以下传至中下层, 形成沿程逐渐升高的表层温度梯度。相较之下, 水库底层水温热结构稳定, 垂向热梯度较小。小湾水库基本稳定在 14.0~14.4℃, 糯扎渡水库在非汛期基本稳定在 15.0~15.2℃。由于取水口通常布设在温跃层附近, 未触及深层水体, 避免了运行过程中对底层的扰动; 同时, 水库水深大, 热分层稳定, 底层也难以与表层发生热交换, 二者共同作用下, 底层水温长期保持稳定。

3.4 变动汇水区的水温时空特征

为了明确水温在河道中的时空演变, 沿程选取小湾坝址、漫湾坝址、糯扎渡入流、糯扎渡坝址、景洪坝址、澜沧江出境 6 个典型断面, 分析其 2015 年水温的年内变化特征, 结果如图 7 所示。可见, 下游河

道水温较天然水温出现了坦化现象, 纬度更低的河段水温恢复更快, 下游坦化程度较上游强。

深大水库低温水下泄对下游自然河段的水温影响较大。由图 7(a)(d) 可见, 蓄水引起的滞时导致水温峰值由 6 月滞后到 7 月中旬, 与建库前相比, 小湾水库和糯扎渡水库的坝前表层水温在 6 月至翌年 2 月出现温升, 最大温升在 8 月, 约为 5℃, 形成了蓄热效应。下泄水温同样呈现类似趋势, 在 2—8 月出现低温水下泄, 最大温降约 6℃(4 月); 而 9 月至翌年 1 月的下泄水温与建库前水温基本相同。在年内, 小湾水库下泄水温变幅为 15.1~21.1℃(变差 6℃), 建库前水温变幅为 16.6~23.6℃(变差 7℃), 深大水库削弱了水温的年内差异, 使其变化曲线更平缓, 呈现坦化现象。

低温水汇入下游河道后, 河道水温在气温与辐

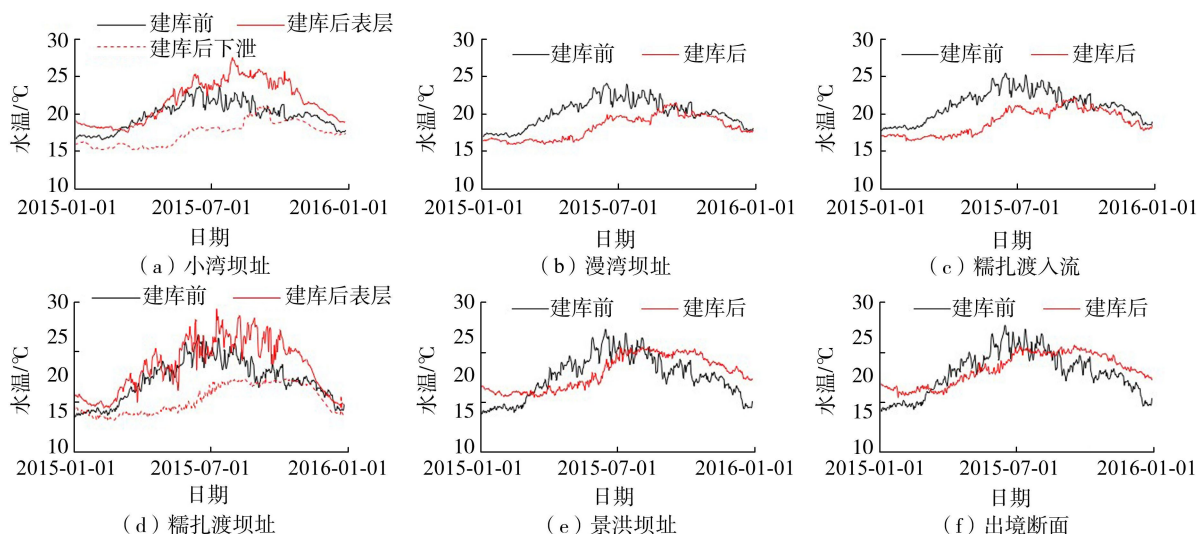


图7 典型断面水温年内变化

Fig. 7 Annual variation of water temperature at typical cross-sections

射等作用下逐渐回升。由图 7(b)(c) 可见,建库后河道水温与天然水温的最大差值在小湾水库下游,为 7.2°C ,至漫湾减至 5.4°C ,在糯扎渡水库入流进一步降至 4.8°C 。与建库前相比,该河段温升速率由原来的每 $100\text{km } 0.75^{\circ}\text{C}$ 提高到每 $100\text{km } 0.94^{\circ}\text{C}$,主要由于建库后下泄流量减少、流速减缓,水体在河道中停留时间延长,在相同热交换通量下的温升速率有所提高。尽管沿程回升明显,水温变幅仍小于天然背景,水温坦化效应在下游河道持续存在。至糯扎渡水库坝前(图 7(d)),深大水库蓄热缓解了表层水的坦化效应,同时进一步调节下泄水,使得变幅为 5.9°C ($16.4 \sim 22.3^{\circ}\text{C}$) 的入流,坦化为变幅 4.1°C ($18.4 \sim 22.5^{\circ}\text{C}$) 的糯扎渡水库下泄水,可见梯级水库的串联加剧了水温坦化现象。纬度更低的糯扎渡水库下游河段的水温在快速回升(图 7(d)(e))。糯扎渡水库下游的景洪地区年内平均气温约 22°C ,小湾水库下游的漫湾地区年内平均气温约 18°C ,较高的温度、辐射等气象条件使糯扎渡水库的低温下泄水现象得到快速缓解。低温差值由坝下断面的 5.8°C 逐步减小至景洪断面的 2.8°C 和出境断面的 2.2°C ,低温持续期也由 2~10 月缩短至 3~6 月。糯扎渡水库下游河段较快地自然增温不仅减少低温水胁迫时期,甚至从年均角度出发,在出境断面形成了温差约为 $1.2 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 的高温水现象(年均水温为 23.4°C ,天然年均水温为 23.1°C),低温水现象基本消失。

综合深大水库及其变动回水区的水温时空特征,从年均水温角度阐释梯级水库的水温累积效应,由 3 类机制耦合作用:① 水库蓄热效应在空间上正向累积,上游小湾水库年均表层水温较天然状态升高 1.5°C ,其下泄水体在下游糯扎渡水库进一步经

历蓄热过程,致使糯扎渡坝前年均水温增幅增至 1.7°C ,表明水库的表层“热源”属性沿程增强;② 下泄低温水冲击效应在传递过程中呈衰减态势,水库调节使下泄水温过程趋于坦化,小湾水库下泄水温与天然的温差为 -2.4°C ,至糯扎渡水库下泄时已收窄至 -1.6°C ,印证了水体在流动过程中从大气吸热的增温效应在不断累积,并逐渐抵消低温水的影响;③ 在纬度与气象梯度的驱动下^[25],温升效应最终在出境断面引发了水温影响从量到质的根本性转变,与变动回水区水温的差值在小湾水库至糯扎渡水库区间持续减小,并在糯扎渡水库至出境断面区间由负转正为 $+0.3^{\circ}\text{C}$ 。由此,水库蓄热效应、下泄低温水负温效应以及自然增温效应共同作用,沿程累积后有效缓解了大库下泄的低温水胁迫,甚至导致了部分月份的高温胁迫现象。

4 水温对鱼类栖息环境的影响

澜沧江小湾水库下游至景洪水库下游出境断面区间存在两个鱼类栖息地,分别为漫湾下游至糯扎渡入流河段、糯扎渡下游至景洪河段。鱼类以鲤科三属和鲃科两属为主^[26],其主要的繁殖期为 4—8 月,适宜的水温区间为 $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。根据洪迎新等^[27-28]的研究,主要鱼类年内的适宜生长水温区间如表 2 所示。同时,糯扎渡下游至景洪河段的中华鲮和中国结鱼为重点保护鱼类,中华鲮繁殖期为 6—8 月,适宜繁殖水温为 $23 \sim 26^{\circ}\text{C}$;中国结鱼繁殖期为 7—9 月,适宜繁殖及幼苗生长水温为 $20.0 \sim 25.0^{\circ}\text{C}$ ^[21]。

选取鱼类栖息地上、下游两个代表性断面以表征河段的水温特征,分析水温的年内变化特征,结果如图 8 所示。在小湾水库下游,4—8 月漫湾河段出

表 2 鲤科和鲃科的适宜生长水温区间

Table 2 Optimal growth temperature ranges for Cyprinidae and Cobitidae

月份	适宜水温区间/℃	月份	适宜水温区间/℃
1	12.6~16.0	7	20.6~25.5
2	13.2~16.4	8	20.5~25.6
3	14.7~19.5	9	19.1~25.2
4	17.5~21.0	10	18.1~24.8
5	18.3~23.6	11	15.9~22.6
6	20.0~24.9	12	13.4~20.1

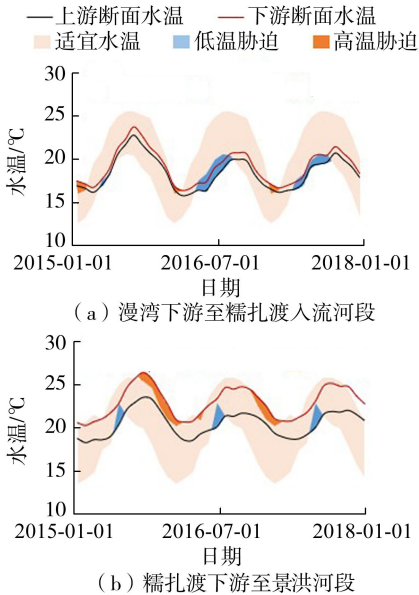


图 8 鱼类栖息地河段水温年内变化特征

Fig. 8 Annual variation characteristics of water temperature in fish habitat river sections

现明显的低温水现象,影响鱼类的产卵与孵化。糯扎渡水库在 6—7 月存在低温水下泄,其下泄水温过程受到上游梯级坝化效应的深刻塑造,表现为季节性峰值衰减、年内过程趋于平缓;水体进入下游纬度更低、气温与辐射更强的河段后,强烈的热交换作用导致其在 8—11 月的升温恢复过程并非简单地回归天然状态,而是产生了“过冲”效应,致使水温升至适宜区间上限甚至超出,形成高温水胁迫现象,对鱼类的生理代谢与繁殖行为同样构成潜在压力^[29]。此外,两河段水温波动幅度均小于天然条件下的适宜区间,梯级水库串联造成的水温坝化效应沿程累积,使水温变化趋于恒定,可能延迟鱼类产卵期并减缓生长繁殖,长期甚至可能改变鱼类群落结构^[30-31]。

若优先保障鱼类生态需求,可在夏季从水库表层取水,缩小水气温差以减弱沿程增温,进而缓解下游高温压力;秋冬季则取用底层低温水,以抑制不应期增温。此外,在春夏季可适度减少对叠梁门等人工措施的依赖转向适应性监管,建立长效监测机制,

持续跟踪气候变化下鱼类繁殖对水温的动态响应。尤其是 8—11 月气候变暖下的自然增温导致的水体高温胁迫,其生态风险可能超越低温水影响,可作为下一阶段生态保护与调度研究的关注重点。

5 结 论

a. 构建了澜沧江梯级水库的一维-三维耦合水温模型,模型在各断面模拟结果的 NSE 与 R^2 均稳定在 0.85 以上,表明模型在不同水文年型下均具备可靠的水温模拟性能。

b. 在梯级开发的“库-河-库”系统中,水温变化呈现为具有累积效应的连续过程,由深大水库库区蓄热、低温水下泄、变动回水区自然增温三类机制耦合驱动。水库蓄热使表层水温沿程正向累积,而低温下泄水的冲击效应则在向下游传递中逐渐衰减;在纬度与气象梯度的共同驱动下,变动汇水区的自然增温能力增强,最终导致梯级水电开发下水温由单一低温胁迫转为低温与高温并存的双重胁迫。

c. 梯级水库中不同深大水库的水温结构具有一致性,年内形成较为稳定的水温分层,主要表现为受气温显著控制的温升表层水,垂向上水温快速下降的温跃层,以及长期稳定在较低温度的底层水。与天然径流相比,表层水温呈现 5℃ 的蓄热和 40 d 的滞时现象;下泄水温被坝化,年内波动幅度缩减了 40% 以上,并在 2—8 月呈现低温下泄的特征。

d. 低温下泄的生态影响具有沿程转化的特征,坝下河段主要承受低温水胁迫,可能延迟鱼类的产卵与孵化;而在下游气温较高、辐射较强的河段(如糯扎渡下游至景洪河段),低温现象快速减弱甚至反转约为 1.2~1.5℃ 高温水现象,对鱼类的代谢和繁殖同样构成潜在压力。因此,水利开发的生态影响评价与调度优化应立足河流连续性视角,结合水温在栖息区间的时空演变特征综合分析,而非局限于坝下单点的水温变化。

参考文献:

[1] 雷欢,陈锋,黄道明. 水温对鱼类的生态效应及水库温变对鱼类的影响[J]. 环境影响评价, 2017, 39(4): 36-39. (Lei Huan, Chen Feng, Huang Daoming. Ecological effect of water temperature and impact of reservoir water temperature variation on fish[J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(4): 36-39. (in Chinese))

[2] 张弛,张洋,吴雨娇,等. 缓解水温失调问题的水库生态调控策略[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 134-143. (Zhang Chi, Zhang Yang, Wu Yujiao, et al. Reservoir ecological regulation strategy to alleviate water temperature imbalances[J]. Advances in Water Science, 2023, 34

- (1):134-143. (in Chinese))
- [3] 毕晓静. 糯扎渡水库水温变化模拟研究[D]. 昆明:云南大学,2019.
- [4] Wang Longfan, Xu Bo, Zhang Chi, et al. Surface water temperature prediction in large-deep reservoirs using a long short-term memory model[J]. Ecological Indicators, 2022,134:108491.
- [5] Xu You, Guo Xiaojuan, Dan Yong, et al. Impact of cascade reservoirs on continuity of river water temperature; a temperature trend hypothesis in river[J]. Hydrological Processes, 2021,35(1):e13994.
- [6] Wang Jiahong, Yuan Xu, Lu Ying, et al. Cross-border impacts of cascade reservoirs on the temperature of the Lancang-Mekong river[J]. Ecological Indicators, 2024, 160:111918.
- [7] 蒋丽. 澜沧江中游梯级水电开发对水库水温的累积影响[D]. 昆明:云南大学,2021.
- [8] Jiang Bo, Wang Fushan, Ni Guangheng. Heating impact of a tropical reservoir on downstream water temperature; a case study of the Jinghong dam on the Lancang River[J]. Water, 2018,10(7):951.
- [9] 张士杰, 彭文启, 刘昌明. 高坝大库分层取水措施比选研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6):653-658. (Zhang Shijie, Peng Wenqi, Liu Changming. Alternative withdrawal schemes for layered water in large reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6):653-658. (in Chinese))
- [10] 毕潇伟, 徐聪, 何义亮. 基于 Delft3D 水动力模型对青草沙水库水温变化的模拟和预测[J]. 净水技术, 2018, 37(1):14-21. (Bi Xiaowei, Xu Cong, He Yiliang. Simulation and prediction of water temperature variation in Qingcaosha Reservoir based on Delft3D hydrodynamic model[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(1):14-21. (in Chinese))
- [11] 宋清林. 温度分层型水库分层取水流动特性及下泄水温研究[D]. 天津:天津大学,2021.
- [12] 胡光洋, 杨中华, 白凤朋, 等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1):293-303. (Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Bai Fengpeng, et al. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the Lower reaches of Jinsha River[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(1):293-303. (in Chinese))
- [13] 龚轶青, 洪浩, 顾家丞, 等. 河道型水库支流库湾流速和水温对整流幕设置响应的数值模拟[J]. 淮海大学学报(自然科学版), 2026, 54(3):101-110. (Gong Yiqing, Hong Hao, Gu Jiacheng, et al. Numerical simulation of response of flow velocity and water temperature in tributary bay of river-type reservoirs to installation of rectification curtains[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(3):101-110. (in Chinese))
- [14] 唐玉川, 张勇, 赵忠伟, 等. 乌东德和白鹤滩水库蓄水后溪洛渡库区水温变化趋势分析[J]. 水利水电科技进展, 2026, 46(3):102-109. (Tang Yuchuan, Zhang Yong, Zhao Zhongwei, et al. Analysis of water temperature variation trends in Xiluodu Reservoir area after impoundment of Wudongde and Baihetan reservoirs[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2026, 46(3):102-109. (in Chinese))
- [15] Long Lianghong, Xu Hui, Ji Daobin, 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):1459.
- [16] 肖闵甜. 热交换条件下水库分层流型态及水温数值模拟研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.
- [17] 袁茜, 傅开道, 陶雨晨, 等. 澜沧江(云南段)水-气界面氧化亚氮释放通量时空分布特征及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2024, 33(1):54-61. (Yuan Qian, Fu Kaidao, Tao Yuchen, et al. Spatial-temporal distribution and influencing factors of nitrous oxide flux across the water-air interface in Lancang River, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(1):54-61. (in Chinese))
- [18] 肖海斌, 陈豪, 王海龙, 等. 糯扎渡水电站水库坝前垂向水温预测与实测数据对比分析[J]. 水力发电, 2016, 42(9):74-77. (Xiao Haibin, Chen Hao, Wang Hailong, et al. Comparative analysis of predicted and measured vertical water temperature in front of dam of Nuozhadu Hydropower Station Reservoir[J]. Water Power, 2016, 42(9):74-77. (in Chinese))
- [19] 张超. 梯级水电开发背景下澜沧江鱼类物种多样性和系统发育多样性的变化[D]. 昆明:云南大学,2018.
- [20] 薛晨江, 雷春云, 符世伟. 中华鲱鲇繁殖生物学研究[J]. 水生生态学杂志, 2017, 38(6):102-106. (Xue Chenjiang, Lei Chunyun, Fu Shiwei. Reproductive biology of *Clupisoma sinense*[J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(6):102-106. (in Chinese))
- [21] 侯传莹, 张尚弘, 易雨君. 栖息地模拟中指示物种的选取方法研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5):97-103. (Hou Chuanying, Zhang Shanghong, Yi Yujun. Research on methods of indicator species selection in habitat simulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5):97-103. (in Chinese))
- [22] 孙成龙, 白晓军. 国内外环境影响评价模型软件发展现状研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2007, 34(1):46-50. (Sun Chenglong, Bai Xiaojun. The study on the modeling software development for environmental impact assessment in home and abroad[J]. Railway Energy

Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health,2007,34(1):46-50. (in Chinese))

[23] Wu Y, Chen H, Lu Y, et al. The dominant mechanisms of nutrient cycling in high-dam reservoirs: retention, transport or transformation? [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(12): 124024.

[24] Zheng Xuerui, Shen Zhenzhong, Wang Zhenhong, et al. Improvement and verification of one-dimensional numerical algorithm for reservoir water temperature at the front of dams[J]. Applied Sciences,2022,12(12):5870.

[25] 龙良红,王博文,黄宇波,等. 丹江口水库典型支流库湾水环境状况改善的整流幕设计与应用[J/OL]. 水资源保护, (2025-05-20). <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1454.006>. (Long Lianghong, Wang Bowen, Huang Yubo, et al. Design and application of rectifying curtain for improving water environment in typical tributary bays of Danjiangkou Reservoir[J/OL]. Water Resources Protection, (2025-05-20). <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1454.006>. (in Chinese))

[26] 彭为,刘丙军,邱江潮,等. 基于优先保护鱼类识别的澜沧江中下游生态流量[J]. 中山大学学报(自然科学版),2020,59(3):43-50. (Peng Wei, Liu Bingjun, Qiu Jiangchao, et al. The ecological flow of the Middle and Lower reaches of the Lancang River based on priority protection fishes identification [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2020,59(3):43-50. (in Chinese))

[27] 洪迎新,刘东升,马宏海,等. 澜沧江梯级开发下鱼类支流生境替代效果[J]. 生态学报,2022,42(8):3191-3205. (Hong Yingxin, Liu Dongsheng, Ma Honghai, et al. Effects of fish habitat substitution in tributaries under the cascade hydropower development of Lancang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3191-3205. (in Chinese))

[28] 王海龙,陈豪,肖海斌,等. 糯扎渡水电站进水口叠梁门分层取水设施运行方式研究[J]. 水电能源科学,2015,33(10):79-83. (Wang Hailong, Chen Hao, Xiao Haibin, et al. Study on operating method of multi-level intake structure with stoplog gate of Nuozhadu hydropower station [J]. Water Resources and Power,2015,33(10):79-83. (in Chinese))

[29] 纪道斌,成再强,龙良红,等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护,2022,38(3):34-42. (Ji Daobin, Cheng Zaiqiang, Long Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. Water Resources Protection,2022,38(3):34-42. (in Chinese))

[30] 曹俊,张晓敏,朱迪,等. 基于机器学习模型的长江上游典型产漂流性卵鱼类自然繁殖与环境特征关系研究[J]. 水资源保护,2025,41(6):251-258. (Cao Jun, Zhang Xiaomin, Zhu Di, et al. Research on relationship between natural reproduction of typical producing semi-buoyant eggs fish in Upper reaches of the Yangtze River and environmental characteristics based on machine learning models[J]. Water Resources Protection,2025,41(6):251-258. (in Chinese))

[31] 惠二青,毛劲乔,戴会超. 上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):44-48. (Hui Erqing, Mao Jingqiao, Dai Huichao. Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):44-48. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-18 编辑:王芳)

(上接第 46 页)

[47] 吴丹,潘朱玲. 京津冀科技创新水平对水资源利用效率的影响效应及贡献[J]. 水资源保护,2024,40(4):65-72. (Wu Dan, Pan Zhuling. Impact and contribution of technology innovation level on water use efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection,2024,40(4):65-72. (in Chinese))

[48] 刘晓君,闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究[J]. 水资源保护,2016,32(6):32-38. (Liu Xiaojun, Yan Lizhen. Research on water resources utilization efficiency and factors in western China based on data envelopment model [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):32-38. (in Chinese))

[49] 张修宇,康惠泽,李颖博. 人民胜利渠灌区水资源节约集约利用评价研究[J]. 人民黄河,2023,45(11):81-85. (Zhang Xiuyu, Kang Huize, Li Yingbo. Research on the evaluation of water resources conservation and intensive utilization in the people's victory canal irrigation area [J]. Yellow River, 2023, 45(11): 81-85. (in Chinese))

(收稿日期:2025-11-05 编辑:王芳)