

# 人类活动及气候变化下伊犁河河流水温时空尺度特征及演变

杜思哲<sup>1,2</sup>, 杜彦良<sup>2</sup>, 陈伏龙<sup>1</sup>, 王统霞<sup>1</sup>, 徐雪雯<sup>1</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038)

**摘要:**为了梳理内陆干旱区河流热动力特征及驱动因子,在对伊犁河水温系统调查的基础上,构建了基于HEC-RAS的河流水动力-水温数值模型,采用遥感气象时空数据分析了伊犁河出山口水库下游210 km河道水温变化规律,量化并探讨了水资源开发利用以及未来气候变化对河流水温的影响。结果表明:构建的HEC-RAS模型能够识别水资源开发利用及气候变化的影响;4月大型水库下泄的低温水受限于较小的水气温差、下游河流沿程复温缓慢、分层取水等措施效果有限;取用水等行为导致的河流流量变化改变了河流的热容量,水温变化规律呈现差异,4月河流流量减少时水温升幅不显著,但流量增加使水温降低明显,最大降幅达 $-0.60^{\circ}\text{C}$ ,而7月流量减少时水温升幅变化明显,最大升幅为 $0.65^{\circ}\text{C}$ ,水量增加时水温变化不大;在未来低、中、高碳排放情景不同的气候模式下,2020—2080年长时间尺度上伊犁河水温均呈上升态势,水温升幅与波动范围均低于气温,2号断面10 a温升平均速率分别为 $0.09$ 、 $0.21$ 、 $0.56^{\circ}\text{C}$ ;预测到2080年,河流水量减小导致水温上升,4月和7月的影响占比分别为6%和21%。

**关键词:**河流热动力;人类活动;再分析数据;气候变化;长时间尺度;HEC-RAS模型;伊犁河  
**中图分类号:**P332 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0216-10

**Spatio-temporal scale characteristics and evolution of water temperature of Ili River under human activities and climate change**//DU Sizhe<sup>1,2</sup>, DU Yanliang<sup>2</sup>, CHEN Fulong<sup>1</sup>, WANG Tongxia<sup>1</sup>, XU Xuewen<sup>1</sup>(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to sort out the thermal dynamic characteristics and driving factors of rivers in the inland arid region, based on the systematic investigation of the water temperature of Yili River, a numerical model of river hydrodynamic-water temperature based on HEC-RAS was constructed. Remote sensing meteorological spatio-temporal data was used to analyze the variation law of the water temperature of the 210 km section downstream of the reservoir at the outlet of the Yili River. The impacts of the development and utilization of water resources and future climate change on the water temperature of the river were quantified and discussed. The results show that the constructed HEC-RAS model can identify the impacts of the development and utilization of water resources and climate change. In April, the low-temperature water discharged from large reservoirs is limited by the small temperature difference between water and air, and the downstream river warms up slowly along the way, and measures such as stratified water intake have limited effects. The changes in river flow caused by water intake and other behaviors have changed the heat capacity of the river, resulting in differences in the variation law of water temperature. When the river flow decreases in April, the rise in water temperature is not significant, but when the flow increases, the water temperature decreases significantly, with a maximum decrease of  $-0.60^{\circ}\text{C}$ . When the flow decreases in July, the rise in water temperature changes significantly, with a maximum increase of  $0.65^{\circ}\text{C}$ , and when the water volume increases, the water temperature changes little. Under different climate models of low, medium and high carbon emission scenarios in the future, the water temperature of the Yili River will show an upward trend on the long time scale from 2020 to 2080. The increase range and fluctuation range of the water temperature are both lower than the air temperature. The average 10-year temperature increase rate at section 2 is  $0.09$ ,  $0.21$ , and  $0.56^{\circ}\text{C}$  respectively. It is

**基金项目:**国家自然科学基金项目(U2040211, U2340224);兵团科技创新人才计划项目(2023CB008-08);第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0405)

**作者简介:**杜思哲(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:286404948@qq.com

**通信作者:**陈伏龙(1978—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:cfl103@shzu.edu.cn

predicted that by 2080, the increase in water temperature caused by the decrease of river water volume will account for 6% and 21% in April and July, respectively.

**Key words:** river thermal dynamics; human activities; reanalysis data; climate change; long-term scale; HEC-RAS model; Ili River

河流是维系流域水生态系统的主要空间。水温作为河流水质的基础变量,调节着水体中的物理、化学和生物等过程,进而影响了生物多样性、水生生态安全以及社会经济利益<sup>[1]</sup>,同时也是协助监测和评估气候变化、水资源利用、生态环境健康等的关键指标之一<sup>[2]</sup>。全球几乎没有处于自然流态的河流<sup>[3]</sup>,人类活动深刻影响了河流温度的时空分布<sup>[4]</sup>。现阶段对河流动态水温仍缺乏深刻的认识,大致体现为:①无法量化人类活动(工程建设、取水、气候变化)等因素对水温的联合作用;②缺乏对更大空间尺度和更长时间尺度上河流水温整体变化规律的掌握;③未探明各水温影响因素系统性的累积及相互关联规律;④对未来水温预测的不确定性等<sup>[5]</sup>。

人类活动极大地改变了世界范围内的河流水温状态。水库工程建设致使春季下泄水温低于天然水温,影响着鱼类的繁殖并会延缓灌区作物的发育<sup>[6]</sup>。Vliet 等<sup>[7-8]</sup>研究表明,从 20 世纪至今,气温与水温均呈现趋势性的升高。世界气象组织于《全球年度近十年气候更新报告》中指出,全球气温的总体轨迹令人严重担忧,在 2022—2026 年突破 1.5℃ 危险气候影响临界值的概率极大,并将对河流温度模式和过程产生影响<sup>[9]</sup>。水温变化问题日益严重并面临不同困境,一方面,针对水库下泄水的低温水害问题,现有措施普遍采用分层取水等方法进行改善<sup>[10-11]</sup>,但在春季条件下,部分河流的水温恢复并不显著;另一方面,在夏秋季,大坝建设使伊犁河等内陆河流水温长时间高于自然状态的河流,尽管未被广泛讨论,但河流长时间处于非天然的热状态并叠加气候变化背景下气温的持续升高,将导致水体溶解氧下降,或使冷水鱼类及部分温水鱼类的生长和存活率下降<sup>[12]</sup>。Hawkins 等<sup>[13-14]</sup>研究表明,河流生物对高温的耐受性更差,且鱼类比无脊椎动物对温度变化更为敏感。河流水温升高可能导致水生生物栖息地丧失、物种多样性下降、生态系统结构破坏等问题。Bartholow<sup>[15]</sup>对 Klamath 河进行了研究,结果表明,其下游干流从 1960 年开始每 10 a 以 0.5℃ 的速度升温,造成使洄游鲑鱼不适的高温季节延长了约 1 月,夏季适宜栖息地每 10 a 平均长度下降约 8.2 km,并危及鲑鱼的产卵。

受多因素共同作用的影响,河流水温变化较为复杂。国内大量研究聚焦于水库水温的变化<sup>[16-18]</sup>,针对河流水温的研究较少。考虑到河流与水库在整

体水生生态空间的占比以及河流在生物栖息、繁殖中的重要作用,明晰各类型河流水温变化规律非常必要<sup>[19]</sup>。不同河段河流存在着不同的热特性水源,如冰川融雪、岩溶地下水、山坡含水层汇流等,由于这些水源对径流贡献的比例不同,造成了水温呈现出复杂性和空间异质性的特征<sup>[20]</sup>。水源在冰川源头段年内温差小<sup>[21]</sup>,而山谷发源的支流与干流水温存在差异;水温沿程逐渐升高,中下游河段年内差异变大<sup>[22]</sup>。总体上影响河流水温的主要相关因子有汇入水源、水气候条件、河流长度、河流总流量、河岸地貌和河岸荫蔽等<sup>[23]</sup>。Leblanc 等<sup>[24]</sup>通过敏感性分析表明,在 14 个变量中,气温、河流流量和河流宽度对河流温度的影响较大。

相较于研究河流温度的大量方法和应用,模型能够更完整地反映河流温度的变化及其系统累积性<sup>[25-28]</sup>,其中基于统计分析方法的水温回归模型应用较为广泛,该方法简单但对数据的要求较多,主要针对外部气象条件相对稳定的非调控河流。Mohseni 等<sup>[29]</sup>通过分析美国 584 个水文站水温数据,建立了 Logistic 回归方程;Vliet 等<sup>[7]</sup>对 Logistic 回归方程进行修订,增加了流量的影响项以及部分调整参数。当观测数据量充分且外部条件稳定时,Logistic 回归方程可对水温进行计算,但针对多因子联合作用时容易失焦<sup>[30]</sup>。由物理机制构成的模型方法所需数据复杂,但在模拟、预估人类活动或气候变化的影响方面优势显著,并能为更大规模统计模型的开发提供有价值的见解<sup>[28,31]</sup>。Hannah 等<sup>[32]</sup>在分析河流水温变化时指出,基于物理过程的河流温度模型是当下用以维持河流生态安全稳定的重要工具。

本文选取新疆内陆干旱区河流——伊犁河为对象,构建基于 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) 的河流水动力-水温数值模型(以下简称 HEC-RAS 模型),在长距离河流空间使用多点气象数据集驱动,模拟山区-平原河流时空热力学分布特征;从水库拦蓄和流量调度等角度分析大型水库建设、区域引水等驱动因子下的水温变化,并针对不同碳排放模式下的未来气候变化,预测长时间尺度下的水温变化,对空间大尺度气象模型与区域尺度河流模型的耦合进行实践验证。

## 1 研究区概况

伊犁河发源于新疆中部天山北支,由特斯河、喀

什河和巩乃斯河三大支流及其他一、二级支流组成,多年平均流量为  $50 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,为一条中等河流。其流域位于中纬度欧亚大陆中心 ( $42^\circ 50' \text{ N} \sim 44^\circ 10' \text{ N}$ ,  $80^\circ 30' \text{ E} \sim 83^\circ 10' \text{ E}$ ),受到大陆性和山地气候的双重影响,夏季温暖多雨,冬季寒冷干燥<sup>[33]</sup>。年平均降水量为  $200 \sim 800 \text{ mm}$ ,山区降水量较平原地区高<sup>[34]</sup>。伊犁河源头山谷支流以冰川融水为主,河谷断面形态多为 V 形,同时受含水层水源补给及河岸遮阴的影响,流量丰枯变幅大,年水温变幅为  $0 \sim 10^\circ \text{ C}$ ,不同河谷的源头支流水温存在差异。伊犁河出口建设有多年调节功能的恰甫齐海水库,该水库下游区域地貌较缓,为重要的粮食生产基地,年内气温变幅较大且降水量较少。河道断面形态为宽浅型,坡降较小,河水主要来源于上游及支流,绝大部分河段地表水补给地下水,且生产、生活取用水量较大,并呈增加的趋势<sup>[35]</sup>。

选取伊犁河受到人类活动影响较大的河段进行建模分析。河水主要来源为上游水库下泄及支流,热来源较为清晰。选取 1、2 号测站作为重要控制站,位置如图 1 所示。1 号测站位于喀什河汇入点之后,生态多样性最为丰富且河流水量充足。2 号测站设置在河流进入哈萨克斯坦共和国境前,以监测伊犁河流经伊犁州主要用水地区后的水资源状况,2 号测站区域同时也是重要的生态栖息地。由于伊犁河流域的气象数据存在缺失的情况,因此运用遥感数据集替代传统的气象站点数据,融入模型计算中。设置气象数据点 9 个,沿河分布,见图 1。

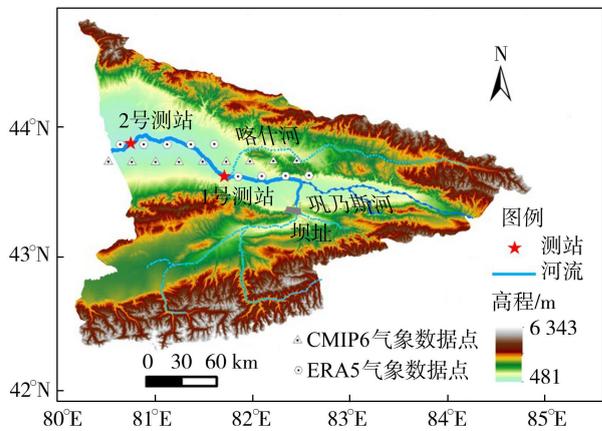


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

伊犁河拥有丰富的土著鱼类资源,包括新疆裸重唇鱼、伊犁弓鱼、伊犁裂腹鱼、斑重唇鱼、裸腹鲟、银色弓鱼等,其中斑重唇鱼为国家二级重点保护水生野生动物,新疆裸重唇鱼为自治区一级重点保护水生野生动物。20 世纪 60 年代后,伊犁河引入了大量外来鱼种,包括四大家鱼、欧鲈、赤梢鱼、东方欧

鲌、裸腹鲟等。伊犁河的土著鱼种多属喜冷水性鱼类,斑重唇鱼喜栖息于水温  $20^\circ \text{ C}$  以下的河道,天然条件下产卵期为 4—6 月。受水库调度的影响,干流土著鱼类出现了繁殖期推迟的现象。

## 2 模型构建及参数设定

### 2.1 模型构建

#### 2.1.1 非恒定流模型

基于 HEC-RAS 模型模拟河流的水力和热力条件。该模型采用偏心隐式有限差分格式对水力方程离散求解,计算速度快,稳定性好,在处理天然或人工河系的一维、二维以及两者耦合的恒定、非恒定流计算时能够有效处理复杂的水流动态过程;同时可以计算亚临界、超临界等不同状况流态特征的非恒定流水面线,效果较好。伊犁河具有河道坡降前半段大而后半段小、流量季节变化较大等特点,水流情况复杂,因此采用 HEC-RAS 水动力模块中的一维非恒定流基本方程组,包括连续方程和动量方程。

#### 2.1.2 河道水温方程

水温方程基于能量平衡原理的数值方法进行离散求解,水温的计算采用热传导通用方程:

$$\frac{\partial B\rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial UB\rho C_p T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho B D_x}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon_p C_p T B + H_{S/K} \quad (1)$$

其中

$$H_{S/K} = \frac{q_n A_s}{\rho C_p V}$$

式中:  $T$  为水温;  $B$  为体积宽度;  $\rho$  为水体的密度;  $C_p$  为水的比热容;  $x$  为河道距离;  $D_x$  为扩散系数;  $\varepsilon_p$  为热源强度;  $U$  为水流的速度;  $H_{S/K}$  为热的源和汇项;  $q_n$  为水表面热净通量;  $A_s$  为计算单元的表面面积;  $V$  为计算单元的水体体积。

$q_n$  主要由太阳短波辐射  $q_{sw}$ 、大气长波辐射  $q_a$ 、显热通量  $q_h$ 、水面长波辐射  $q_b$  以及潜热通量  $q_1$  5 个变量构成:

$$q_n = q_{sw} + q_a - q_b + q_h - q_1 \quad (2)$$

其中  $q_a = \varepsilon_a \sigma T_a^4$   $q_h = \left( \frac{K_h}{K_w} \right) C_p \rho_w (T_a - T) f(U)$

$$f(U) = R(a + bU^c) \quad q_b = \varepsilon_w \sigma T^4$$

$$q_1 = \frac{0.622}{P} L \rho_w (e_s - e_a) f(U)$$

式中:  $K_h$  为空气的热扩散系数;  $K_w$  为水的热扩散系数;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数;  $\varepsilon_a$  为大气发射率;  $T_a$  为气温;  $f(U)$  为风速函数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为校准系数;  $R$  为气温、水温、风速的函数;  $\varepsilon_w$  为水体发射率;  $P$  为大气压;  $L$  为蒸发潜热;  $e_s$  为水温对应的饱和蒸汽压;  $e_a$  为水面蒸汽压。

在水体热收支过程中,  $q_{sw}$ 、 $q_a$ 、 $q_h$  为增量,  $q_b$  和  $q_l$  为减量。  $q_{sw}$  由河流所在区域的纬度决定, 是河流增温的重要作用项, 计算中气象参数云量作用于该项, 对其大小有调节作用。

## 2.2 模型边界条件及参数设定

### 2.2.1 水动力及水温边界

选择伊犁河上水库坝下至出口断面 210 km 河段为模型的计算区域。模型计算时段为 2019—2020 年, 河流坡降为 0.001 26, 上游以水库逐日下泄水量、水温过程为边界条件, 初始河道水温由实测资料确定。下游出流设定为均匀流, 区间考虑巩乃斯河及喀什河对干流的补给, 在模型中以旁侧入流的形式加入, 其水温由巩乃斯河及喀什河上水文测站测得。引水断面位于 1 号测站下游 30 km 处, 主要在 4—11 月供给下游农业灌溉。

### 2.2.2 气象边界

采用的气象条件变量为太阳辐射量、日气温、日湿度、日风量和月云量, 其中太阳辐射量由区域经纬度及高程确定, 精确度较高<sup>[36]</sup>。气温、湿度和风量来源于欧洲中期天气预报中心的第五代全球气候大气再分析数据 (fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate, ERA5) 数据集和第六次国际耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project 6, CMIP6) 数据集。气象遥感数据点包含 ERA5 数据集点以及 CMIP6 数据集点各 9 个, 其中 ERA5 数据集点通过降尺度处理, 分辨率与 CMIP6 数据集保持一致, 为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 呈线性排列在河流两侧, 能够较好地还原河流沿岸小气候的局部区域变化。模型中, 利用 ERA5 数据集进行 2019—2020 年的水温计算。未来预测情况以 IPSL-CM6A-LR、EC-Earth、CanESM5 等 3 个机构发布的未来气候模式数据, 经过历史期 2000—2014 年数据修正后的 CMIP6 未来气候预测数据对 2020 年数据进行计算并修正, 进而计算 2020—2080 年的水温。

### 2.2.3 参数设定

水动力计算中, 影响河道流水的关键参数为糙率系数, 其漫滩区以及主河道的设定不同。通过调整主河道与左右岸滩的糙率系数调整计算结果, 糙率系数取值为 0.035~0.070, 根据实测数据进行调整。

水温参数有: ①  $D_r$ , 一般取值为 50~200; ② 尘埃系数, 为大气衰减系数, 取值为 0~0.2, 用于区分农村以及城市地区; ③ 云影系数  $C_1$ , 取值为 0~1, 用于调节太阳辐射对水温的影响; ④ 风速使用系统给定的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  校准系数; ⑤  $R$  的取值为 0.5~1, 用于改变风速对水面蒸发的影响。

## 2.3 数据来源

研究需收集气象、水文、河道地形、水温等数据资料。气象数据选用 ERA5 数据集, 包括 2019—2020 年逐日气温、湿度、平均风速、太阳辐射资料, 并利用伊宁气象站实测资料进行修正; 未来气象预测数据使用 CMIP6 数据, 包括由 IPSL-CM6A-LR、EC-Earth、CanESM5 等 3 个机构发布的 2000—2014 年数据及 2020—2085 年的气象预测资料, 并基于 2000—2014 年伊犁地区霍城、察布查尔、巩留等 10 个站点气象实测资料进行偏差修正。其他资料包括 2019—2020 年逐日流量及水温资料, 以及 2020—2021 年实地考察特克斯河、喀什河、巩乃斯河源头及沿程测得的季节水温资料。

## 3 模型验证

### 3.1 水动力过程

采用 1 号断面与 2 号断面 (分别位于起始断面下游 95 km 和 192 km) 的实测流量、水位等水文和水温资料对模型进行参数率定、水动力过程以及水温过程验证, 计算结果见图 2。

2019—2020 年的日径流深过程显示 1 号和 2 号断面模型计算月均相对误差分别为 1.9% 和 2.1%。1 号断面纳什效率 (NSE) 系数为 0.86, 2 号

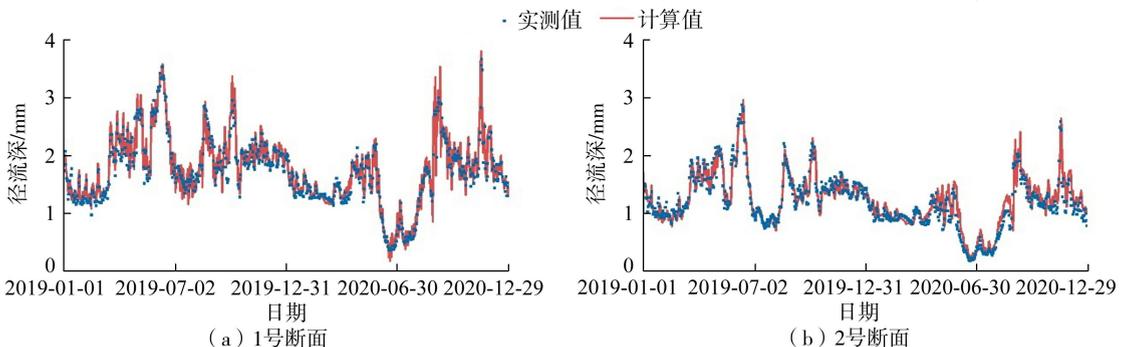


图 2 2019—2020 年计算日径流深与实测日径流深对比

Fig. 2 Comparison of calculated daily runoff depth with measured daily runoff depth from 2019 to 2020

断面NSE系数为0.88。总体来看,模型的非恒定流计算能够较好地模拟河段的水动力条件变化。

由日径流深过程看,上游水库下泄的洪峰,近1d到达1号断面,2d到达2号断面,洪峰过程沿河道的坦化效果不明显。实测资料及调查显示年际过程丰、枯季节水量变化较大,水库调度和取水改变了河流的天然水文过程,6—9月河道区间用水量很大。

### 3.2 水温过程

2019—2020年实测与模型计算水温对比见图3,可见水温冬季最低,夏季最高。实测数据和模型计算值在整个时间段都保持了较高的一致性,尤其在水温的峰值和谷值时期。水温在7月达到峰值(接近26.5℃),1月达到最低值(略高于0℃)。与实测结果相比,月均误差变化范围为-0.2~0.3℃,年均偏低0.1℃。模型计算值与实测数据的一致性表明模型很好地预测了河流的季节性水温动态,验证了模型的准确性和适用性。

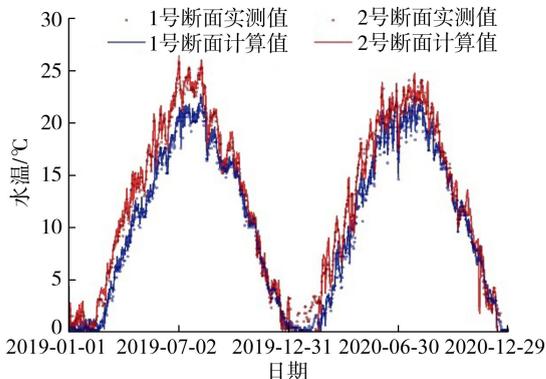


图3 2019—2020年计算水温与实测水温对比

Fig. 3 Comparison of calculated water temperature and measured water temperature from 2019 to 2020

1号与2号断面,最低水温出现在1月,河流上下游水温接近0℃;最高水温出现在7月左右。下游2号断面水温高于中部的1号断面。2号断面最高水温2019年为26.3℃,2020年为24.9℃。根据实测2019—2020年河道水温数据,1号和2号断面超过20℃的天数分别为71、162d,占总天数的9.7%和22.2%,对干流冷水性鱼类的夏季栖息地产生了负面影响。

## 4 结果与分析

### 4.1 河道水温主要相关变量

通过河道水温计算公式,梳理影响河道水温的主要相关变量。计算中存在5个影响水温的变量,其中 $q_{sw}$ 项作为能量来源占比较大。对于大时空尺度的低热容量河流,其水温的变化可以直接归因于

太阳辐射的变化及其间接影响下的大气温度变化。但对于选定的小时空尺度的河流区域,气温本身作为太阳辐射的强相关因素,叠加着控制 $q_a$ 强度及 $q_i$ 强度,在影响河流水温变化上超越了太阳辐射成为主要相关因子。对于大多中小型河流,其流量决定的热容量变化对水温也具有重要影响,热容量决定着河流对各能量输入、输出变化的敏感性。在式(1)中, $A_s/V$ 为水深的倒数,经验公式 $V \propto Q^{0.32}$  [24] ( $Q$ 为流量)揭示了对于选定的河流计算断面,热容量受流量变化影响的具体关系。 $q_i$ 表明了蒸发效应,湿度越小,热损失越大。因此,影响河流水温的最主要相关因子为:①能量输入、输出的主要相关因子气温;②间接影响能量输入、输出后水温变化的主要相关因子流量。

采用率定后的模型,分析驱动河道水温时空变化的因子。干支流河道使用20世纪80年代多年平均的月均流量作为流域受人类活动影响较小的天然水文过程。起始断面以Vliet等[7]公式估算的水温作为天然水温过程。Logistic回归方程认为河流水温与气温、坡降、流量有关。气象过程采用2020年作为现状水平年,其他参数不变,计算得到1号和2号断面周平均水温-气温的过程线,如图4所示(图中标注了4月第2周(16周)、7月第3周(30周)和10月第2周(42周)对应的水温)。

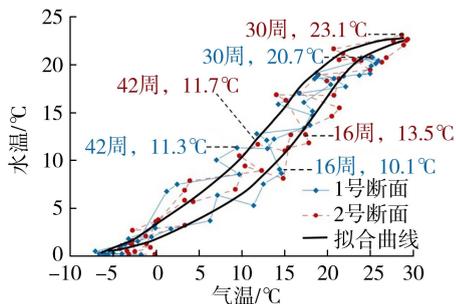


图4 1号和2号断面周平均水温-气温过程线

Fig. 4 Weekly mean water temperature-air temperature process curves of No. 1 and No. 2 sections

由图4可以看出:①由于季节变化,水温与气温的拟合变化曲线呈现S型逆绳套相关关系,水温基本与气温保持同步;②春夏两季,河流水温具有明显的增温效应,而秋季增温效应减弱。伊犁河沿程水温受季节性因素影响明显,实测数据显示,受海拔等因素影响,气温2号断面年内绝大部分时间都高于1号断面;水温2号断面相较于1号断面在春夏季节偏高。

### 4.2 水库下游水温空间变化

考虑河道中喜冷水性土著鱼类,选择鱼类繁殖和耐热生存较敏感的4月和7月,分析水库调度对

下游河流水温的影响,结果见图5。计算情景气象数据为2020年过程,上游边界水文过程采用20世纪80年代月均流量数据,丰水期7月流量大于4月,通过经验公式<sup>[7]</sup>计算得到上边界的天然水文过程。假定水库采用底孔出流,与表层排水水温相比,4月和7月中旬底层水温分别降低了4℃。

流量不变条件下:①4月河流沿程整体水温为增温趋势,初始水温较低,在水库底孔下泄和表层排水条件下河道起始断面分别为4.6、8.6℃。经过19 km 巩乃斯河汇入,水温小幅升高0.4℃;喀什河汇入水温未发生明显变化,经引水断面取水,温升略有加大。表层下泄条件下全河道增温速率每10 km为0.35℃,水库低温水下泄后增温速率每10 km为0.47℃。但在下游边界,水库底孔水温比表层水低0.5℃,表明低温水效应在经过210 km河道后仍未完全恢复。②7月表层水下泄条件下全河道增温速率每10 km为0.2℃,水库低温水下泄后增温每10 km为0.37℃。由于热交换强烈,在经过52 km的河流传输后恢复至正常水温,复温速率每10 km达到1.46℃,随后水温上升趋势维持在每10 km 0.33℃。水库低温水下泄后,前段水温增温速率大。升温季节(3—7月)水温沿程升高,但随着气温和水温的上升,上下游沿程增幅变小。

研究河道具有宽浅河道的特点,在38~60、140~160 km区间宽深比较大,水温热交换速率快。因河流流速较大,水温很快传播至下游,该区间的增温效果不明显。低温水复温的关键为气温和水温的差值。7月,较大的气温和水温差使得水温复温速

度加快,一旦恢复到天然水温,即达到了热平衡状态,水温增幅减缓。4月气温与水温差较小,沿程水温的升温率相对较低,低温水复温距离延长,在一段时间和空间上很难避免低温水的出现,造成下游部分鱼类的产卵期推迟。河流水温是由地形地貌、区域气象条件和流量等共同决定的,水库建设对河流水温的扰动,即在特定时间和空间上产生的影响,大部分时间可得到较快恢复。

### 4.3 流量对河道水温的影响

人类生产、生活用水及区域调水将导致河流流量的变化,而流量变化会改变河流的热容量,使得河流水温对气象因子的敏感性发生变化。通过河流水动力-水温数值模型计算,可以评价水温对河道流量变化的敏感性。设计的情景中,坐标轴参照零点的流量为干支流天然月均流量,其他情景分别对干支流边界的流量进行不同比例的增减;边界水温条件为天然水温过程,各情景保持一致。选取鱼类繁殖期的4月与高温持续期7月为代表月份,分析1号和2号断面水温相应变幅,结果如图6所示。

图6的热性能曲线显示出显著的不对称性。4月气温较低,水气热交换对河流水温的影响相对有限,增加流量较减少流量水温变化更为明显。在原流量基础上减少50%后,1号和2号断面水温分别升高了0.52℃和0.64℃;在原有流量基础上增加20%、35%、50%、75%分别使1号断面的平均水温下降0.18、0.35、0.52、0.54℃,使2号断面的平均水温下降0.15、0.33、0.48、0.51℃。进一步增加流量至原流量的150%时,水温下降了0.59℃,变化不

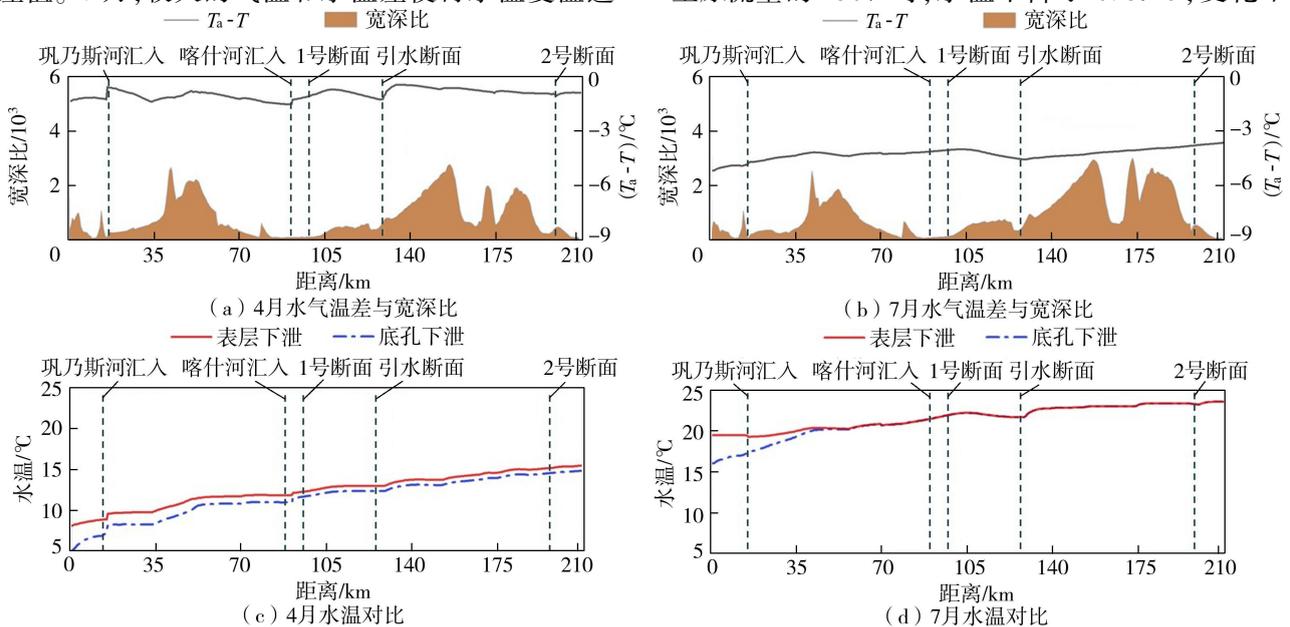


图5 沿程表层水与底孔下泄水温及其对应水气温差、宽深比沿程分布

Fig. 5 Distribution of water temperature at surface layer and at bottom discharge, as well as the corresponding temperature difference and width-depth ratio along the route

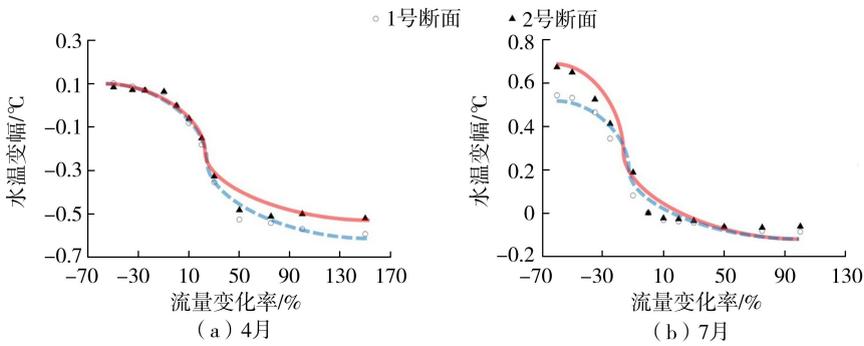


图6 1号和2号断面水温变幅与流量变化率关系

Fig. 6 Relationship between water temperature amplitude and flow change rate of No. 1 and No. 2 sections

大。减少水量会导致各断面水温略有上升,但增温幅度基本稳定在 $0.08^{\circ}\text{C}$ 以内,变化有限。7月气温较高,水体受热交换影响增温效果显著,减少流量使水温产生了较大升幅。在原流量基础上减少10%、25%、35%、50%分别使1号断面平均水温升温 $0.08$ 、 $0.34$ 、 $0.46$ 、 $0.53^{\circ}\text{C}$ ,2号断面升温 $0.18$ 、 $0.41$ 、 $0.52$ 、 $0.64^{\circ}\text{C}$ 。当流量减少至原流量的60%时,1、2号断面水温分别上升了 $0.54^{\circ}\text{C}$ 和 $0.67^{\circ}\text{C}$ 。相对而言,增加流量对河流温度的影响较小,变化幅度通常小于 $0.08^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.4 气候变化对河道水温的影响

在河流水文过程不变的条件下,选用不同机构发布的气象模型的预测结果输入模型,预测未来水温的变化。根据共享社会经济路径(SSPs)情景中高排放情景(SSP5-8.5)、中等排放情景(SSP2-4.5)及低排放情景(SSP1-2.6)3种不同的排放情景,利用对水温影响较为敏感的年平均气温和年平均相对湿度2个参数预测未来气象要素的变化趋势,结果见图7(彩色阴影区域代表了模拟数据的不确定性范围)。

由图7可见,总体上气温均呈升高趋势,趋势较为一致,未来气候持续变暖。在SSP5-8.5情景下,每10a温升速率达 $0.65^{\circ}\text{C}$ ;SSP1-2.6情景年平均气温变化曲线表明,在采取严格的减排措施下可能保持较为稳定的气候条件,每10a温升速率为 $0.2^{\circ}\text{C}$ ,

气温上升趋势温和,与SSP2-4.5情景预测结果相似。湿度不同机构预测值相近,在未来60a内变化较小,略有下降趋势。至2080年,SSP5-8.5情景下湿度约下降 $0.8\%$ ,SSP2-4.5情景约下降 $0.3\%$ ,SSP1-2.6情景约下降 $0.1\%$ 。预测显示,西北地区年湿度变化总体不大,其轻微下降趋势可能与温度升高相关<sup>[37]</sup>。

根据王磊等<sup>[38]</sup>的研究,未来极端气候的发生概率较大,因此,通过河流水动力-水温数值模型预测水温长时间尺度的变化。由于2号断面与1号断面变化趋势相近,选取2号断面分析2020—2080年年均水温演变,以及与2020年相比2080年的月均水温变化,结果见图8。

由图8可见,至2080年,2号断面受不同排放情景影响较大且升温效果差别明显。伊犁地区气温的未来变化包含山区气温的变化幅度,因此,SSP2-4.5情景与SSP1-2.6情景下,气温60a变化幅度相近,而对于处于下游平原河谷的2号断面,其气温变化幅度更大。尽管多数研究认为,气候尤其是气温将在高山地区产生较大的变化,但是越来越多的实测结果显示,在中海拔及低海拔地区存在明显的升温趋势,而高海拔地区的升温趋势则不明显<sup>[39]</sup>。在计算中,由于只采用沿河分布的数据点,因此2号断面SSP2-4.5情景与SSP1-2.6情景的计算水温差距较大。SSP1-2.6情景下10a温升速率为 $0.09^{\circ}\text{C}$ ,

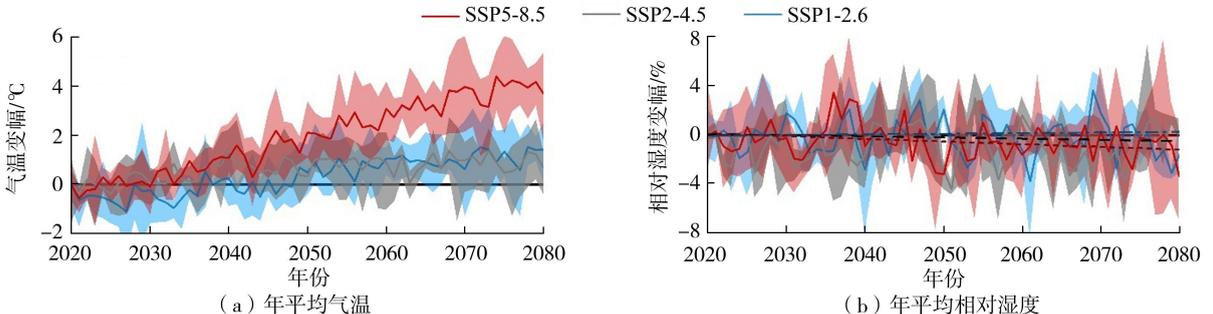


图7 2020—2080年气温与相对湿度年际变化趋势

Fig. 7 Interannual variation trends of temperature and relative humidity from 2020 to 2080

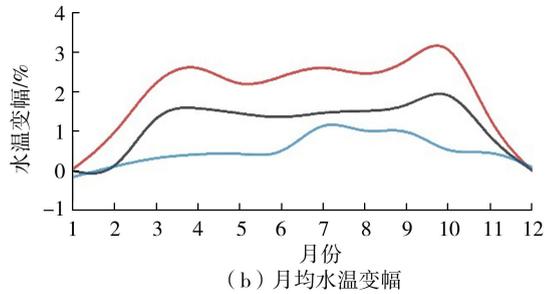
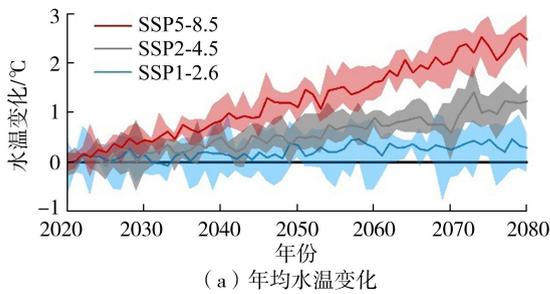


图 8 2 号断面水温年均变化趋势与 2080 年月均水温变幅

Fig. 8 Annual average trend of water temperature at No. 2 section and monthly average temperature variation in 2080

SSP2-4.5 情景下保持在  $0.21^{\circ}\text{C}$ , SSP5-8.5 情景达  $0.56^{\circ}\text{C}$ 。考虑在过去 70 a 间,碳排放基本沿循中间路线(即符合 SSP2-4.5 模式)发展,本文计算得出的未来河道升温速率与同纬度中等流量河流在过去 60 a 升温速率基本一致<sup>[15]</sup>。

对于年内水温的变化,在 SSP1-2.6 情景下,12 月至次年 2 月水温变化维持在  $0\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ ,表明冬季及早春的水温在该情景下受到的影响极小;3—6 月有所升高,保持在  $0.5^{\circ}\text{C}$  以内,在预测期末出现了略微升温;7—9 月水温升幅较大,在  $1^{\circ}\text{C}$  左右,由此可见,SSP1-2.6 情景下,水温升温主要集中在 7—9 月。在 SSP2-4.5 情景下,12 月至次年 2 月水温未发生显著变化;3—10 月水温出现升温情况,升温幅度为  $1\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ ,而春秋两季相较夏季升温更高,这可能是夏季水温本身偏高导致的。SSP5-8.5 情景下,受气温影响,冬季水温基本保持不变,除去冬季的 12 月及 1 月,水温均表现为上升的态势,3—10 月,升温幅度达  $2^{\circ}\text{C}$  以上。SSP2-4.5 与 SSP5-8.5 情景下水温年内变幅呈马鞍形,夏季升温幅度略低于春季以及秋季,这与该河流在过去 40 a 的年内升温情况相近。

综上,水温与气温均呈上升趋势。由于水的高热惯性,水温的变异性比气温低。水温升高将推动水体的蒸发,升温受到限制,使得水温升温曲线低于气温。与各地河流过去 60 a 水温年内月均变化进行比较,发现不同气候影响下的河流不同月份变化不同。受地中海气候影响的 Klamath 河主要升温集中在冬季和春季,而受温带大陆性气候影响的长江源区河流,集中升温的月份为夏季至秋季,与伊犁河较为一致。

#### 4.5 综合影响及流域水温管理建议

为量化气象变化与流量变化的综合影响,考虑到水资源开发利用 40% 的限制,设计 3 种方案进行对比分析:①2020 年气温+天然流量(2020 年);②2080 年气温+天然流量(2080 年);③2080 年气温+40%减水(2080 年+减水),其中未来气象模式采用

SSP5-8.5 情景。通过河流水动力-水温数值模型计算后,得到 2 号断面 3 种方案下周平均水温-气温过程线,见图 9。

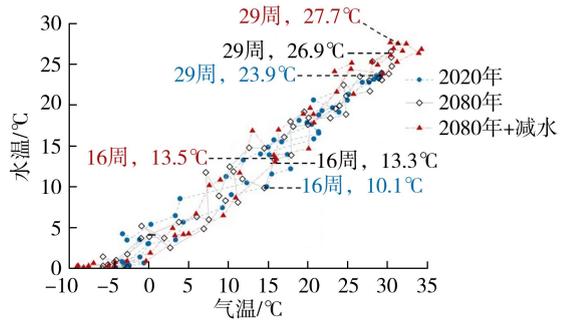


图 9 2 号断面 3 种方案下周平均水温-气温过程线

Fig. 9 Average water temperature-air temperature process curves for 3 schemes of No. 2 section

同样选取 4 月的第 16 周,与最高水温出现的 29 周的水温进行对比。4 月现状水平年平均水温为  $10.1^{\circ}\text{C}$ ,2080 年升温至  $13.3^{\circ}\text{C}$ ,2080 年叠加 40% 减水后升温至  $13.5^{\circ}\text{C}$ ,由流量减少引起的水温变化约占水温变化的 6%。高温期 7 月,各情景下最高温度分别为  $23.9^{\circ}\text{C}$ 、 $26.9^{\circ}\text{C}$ 、 $27.7^{\circ}\text{C}$ ,由流量减少引起的水温变化约占 21%。Vliet 等<sup>[7]</sup>研究表明,高温水(第 95 百分位)上升高达 26% 可间接归因于枯水的变化,而大气能量输入的增加是引起其变化的主要原因,与本文的结论较为接近。

综上所述,全球气候变化带来的气温升高为河流水温升高的主要原因。水库调度在春季产生的低温水下泄,由于气温升高抵消了部分温降,而在高温季节,低温水复温速度快,产生的低温水区域不大。考虑到气候变化因素,高温季节的低温水下泄可能有利于河道中土著冷水鱼种的避暑,而水库的表层取水方式可能导致下游河道的升温,进一步压缩了保护鱼类的适宜栖息生境。因此,在极端干旱的高温季节,人类用水过度挤占维持水温的生态水量,可能会危害水生态系统的健康和稳定,而河岸边的高大树木有利于夏季河流近岸区适宜水温的营造,维持河流生态健康和可持续发展。

## 5 结 论

a. 基于遥感气象数据集建立了河流水动力-水温模型,模拟了长距离河流的水温分布变化规律,可为基于物理模型的水温研究分析提供更高的分辨率以及更具有区域适应性的预测,为量化人类活动等因素对水温的联合作用提供解决方案。

b. 水库低温水下泄,不同季节下游河道水温沿程恢复不同。春季(4月)鱼类繁殖期,受较小气温温差的影响,水库的低温水在下游很长距离(200 km)都难以完全恢复到天然水温。高温期的7月,水体恢复天然水温的速率快。4月之后,当气温升高,下游河道的低温水可得到较快升温。

c. 春季(4月)河流流量减少,河流水温上升幅度有限,升幅低于 $0.20^{\circ}\text{C}$ 。增加河流流量则导致河流水温下降,增加20%~30%河流流量水温下降幅度较大,达 $-0.42^{\circ}\text{C}$ ,随后稳定在 $-0.60^{\circ}\text{C}$ 左右;夏季7月增加流量对河流水温的降低效果有限,而减少流量则水温提高较为明显,在60%~80%原流量的基础上,水温变化幅度最大,并随着流量减少升幅逐渐增大,最终稳定在 $0.65^{\circ}\text{C}$ 。

d. 对SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5等3种不同情景下的水温进行预测,结果表明,未来60a河流水温将持续升高,在河流下游200 km处,10年升温速率分别为 $0.09^{\circ}\text{C}$ 、 $0.21^{\circ}\text{C}$ 、 $0.56^{\circ}\text{C}$ 。冬季水温变化不大,升温主要集中在3—10月,春秋季节更为显著。

e. 气候变化叠加流域用水条件下,水温将进一步升高,量化分析结果表明,流量减小在春季对河流水温影响较小,约为6%,在高温夏季减水对升温影响占比可达到21%。

### 参考文献:

[1] WEBB B W, HANNAH D M, MOORE R D, et al. Recent advances in stream and river temperature research[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, 22(7): 902-918.

[2] 易雨君, 丁航, 叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. *水资源保护*, 2024, 40(5): 1-10. (YI Yujun, DING Hang, YE Jingxu. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 1-10. (in Chinese))

[3] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.

[4] SOOMRO S E H, SHI X, GUO J, et al. Are global influences of cascade dams affecting river water

temperature and fish ecology? [J]. *Applied Water Science*, 2023, 13(4): 106.

[5] FICKLIN D L, HANNAH D M, WANDERS N, et al. Rethinking river water temperature in a changing, human-dominated world [J]. *Nature Water*, 2023, 1(2): 125-128.

[6] HEGGENES J, STICKLER M, ALFREDSEN K, et al. Hydropower-driven thermal changes, biological responses and mitigating measures in northern river systems [J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(5): 743-765.

[7] VLIET M, LUDWIG F, ZWOLSMAN J, et al. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow [J]. *Water Resources Research*, 2011, 2: 47.

[8] LIU Shuang, XIE Zhenghui, LIU Bin, et al. Global river water warming due to climate change and anthropogenic heat emission [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 193: 103289.

[9] HERMANSON L, SMITH D, SEABROOK M, et al. WMO global annual to decadal climate update: a prediction for 2021-2025 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, 103(4): E1117-E1129.

[10] GRAY R, JONES H A, HITCHCOCK J N, et al. Mitigation of cold-water thermal pollution downstream of a large dam with the use of a novel thermal curtain [J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(7): 855-866.

[11] 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))

[12] HUANG Minrui, DING Liuyong, JUN Wang, et al. The impacts of climate change on fish growth: a summary of conducted studies and current knowledge [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106976.

[13] HAWKINS C P, HOGUE J N, DECKER L M, et al. Channel morphology, water temperature, and assemblage structure of stream insects [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, 16(4): 728-749.

[14] 张东亚. 水利水电工程对鱼类的影响及保护措施 [J]. *水资源保护*, 2011, 27(5): 75-77. (ZHANG Dongya. Impact of hydraulic and hydropower engineering on fish and protection measures [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(5): 75-77. (in Chinese))

[15] BARTHOLOW J M. Recent water temperature trends in the lower Klamath River, California [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2005, 25(1): 152-162.

[16] 孙颖, 范晓娜, 李志群. 河流及水库水质模型与通用软件综述 [J]. *水资源保护*, 2001, 17(2): 7-11. (SUN

- Ying, FAN Xiaona, LI Zhiqun. Overview of river and reservoir water quality models and general software [J]. *Water Resources Protection*, 2001, 17 (2): 7-11. (in Chinese)
- [17] 詹晓群, 陈建, 胡建军. 山口岩水库水温计算及其对下游河道水温影响分析 [J]. *水资源保护*, 2005, 21 (1): 29-31. (ZHAN Xiaoqun, CHEN Jian, HU Jianjun. Water temperature calculation of Shankouyan Reservoir and its influence on water temperature of downstream river [J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21 (1): 29-31. (in Chinese))
- [18] 龚发露, 王裕成, 兰佳, 等. 千岛湖极端水位变化对温跃层的影响 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50 (5): 33-40. (GONG Falu, WANG Yucheng, LAN Jia, et al. Influence of extreme water level changes on thermocline at Lake Qiandao [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50 (5): 33-40. (in Chinese))
- [19] 王远坤, 王一旭, 孟长青, 等. 丹江口水库大坝加高对汉江干流水温影响评价 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43 (5): 66-72. (WANG Yuankun, WANG Yixu, MENG Changqing, et al. Assessing impacts of Danjiangkou Dam heightening on water temperature in main stream of Hanjiang River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43 (5): 66-72. (in Chinese))
- [20] BROWN L E, HANNAH D M, MILNER A M. Hydroclimatological influences on water column and streambed thermal dynamics in an alpine river system [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325 (1-4): 1-20.
- [21] GAO Tanguang, KANG Shichang, ZHANG Tingjun, et al. Stream temperature dynamics in Nam Co Basin, southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14 (12): 2458-2470.
- [22] UEHLINGER U, MALARD F, WARD J. Thermal patterns in the surface waters of a glacial river corridor (Val Roseg, Switzerland) [J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48 (2): 284-300.
- [23] MANGANO J F, PIATT D R, JONES K L, et al. Water temperature in tributaries, off-channel features, and main channel of the lower Willamette River, northwestern Oregon, summers 2016 and 2017 [R]. Reston: US Geological Survey, 2018.
- [24] LEBLANC R T, BROWN R D, FITZGIBBON J E. Modeling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban streams [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 49 (4): 445-469.
- [25] AHMAD S K, HOSSAIN F, HOLTGRIEVE G W, et al. Predicting the likely thermal impact of current and future dams around the world [J]. *Earth's Future*, 2021, 9 (10): e2020EF001916.
- [26] 陈能汪, 余镒琦, 陈纪新, 等. 人工神经网络模型在水质预警中的应用研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41 (12): 4771-4782. (CHEN Nengwang, YU Yiqi, CHEN Jixin, et al. Artificial neural network models for water quality early warning: a review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41 (12): 4771-4782. (in Chinese))
- [27] YEARSLEY J R. A semi-Lagrangian water temperature model for advection-dominated river systems [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45 (12): 193-204.
- [28] DUGDALE S J, HANNAH D M, MALCOLM I A. River temperature modelling: a review of process-based approaches and future directions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 97-113.
- [29] MOHSENI O, STEFAN H G, ERICKSON T R. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34 (10): 2685-2692.
- [30] OZAKI N, FUKUSHIMA T, HARASAWA H, et al. Statistical analyses on the effects of air temperature fluctuations on river water qualities [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17 (14): 2837-2853.
- [31] LING F, FOODY G M, DU H, et al. Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with Landsat ETM+ thermal infrared images [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9 (11): 1175.
- [32] HANNAH D M, GARNER G. River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century [J]. *Progress in Physical Geography*, 2015, 39 (1): 68-92.
- [33] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应 [J]. *地理学报*, 2009, 64 (11): 1331-1341. (CHEN Yaning, XU Changchun, YANG Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64 (11): 1331-1341. (in Chinese))
- [34] 陈启慧, 纪璐, 李琼芳, 等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响 [J]. *水资源保护*, 2024, 40 (2): 90-99. (CHEN Qihui, JI Lu, LI Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (2): 90-99. (in Chinese))
- [35] 黄坤, 马龙, 吉力力·阿不都外力. 基于小波分析的巴尔喀什湖水位变化特征及其影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37 (3): 570-579. (HUANG Kun, MA Long, GILI Abudu. Characteristics and influencing factors of water level change in Balkhash Lake based on wavelet analysis [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37 (3): 570-579. (in Chinese))

(下转第 232 页)

- 新建筑,2022(1):49-54. (GONG Cong, WU Hong, HU Changjuan. Ecological function optimization strategy of urban public open space based on green infrastructure network; a case study of central Nanjing [J]. New Construction,2022(1):49-54. (in Chinese))
- [20] 丁金华,孙琦,钱晶. 基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究:以吴江东北片区为例[J]. 西北林学院学报,2022,37(6):183-191. (DING Jinhua,SUN Qi,QIAN Jing. Research on the construction of rural green infrastructure network of water network based on MSPA-InVEST model;a case study of northeast Wujiang area [J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(6):183-191. (in Chinese))
- [21] 葛希辰. 双碳视角下 MSPA 在乡村绿色基础设施格局优化中的应用:以徐州市睢宁县为例[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [22] SEGURA-BARRERO R , LANGEMEYER J , BADIA A , et al. The food-water-climate nexus of green infrastructure: examining ecosystem services trade-offs of peri-urban agriculture [J]. Science of the Total Environment, 2024, 951; DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2024. 175799.
- [23] 胡凯,许航,张怡蕾,等. 分散式农村生活污水处理设施运营模式探讨[J]. 水资源保护,2017,33(2):63-66. (HU Kai, XU Hang, ZHANG Yilei, et al. Study of operation modes for decentralized domestic sewage treatment facilities in rural areas [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):63-66. (in Chinese))
- [24] 项诚. 景观基础设施视角下乡村景观营建策略研究:以池州市栗坑村为例[D]. 南京:南京林业大学,2022.
- [25] 冯矛. 嘉陵江流域多尺度绿色基础设施规划研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.

(收稿日期:2024-06-28 编辑:胡新宇)

(上接第 215 页)

- [15] 张哲铭,李晓瑜,姬建. 基于 LS-SVM 的 TBM 掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):373-379. (ZHANG Zheming, LI Xiaoyu, JI Jian. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2021,49(4):373-379. (in Chinese))
- [16] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14(LIU Di,SUN Jiaqian,YU Zhongbo. Multi layer soil moisture inversion based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2024,52(3):7-14. (in Chinese))
- [17] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (WANG Hongrui, WEI Haoshan, HU Litang, et al. Improved SVM-AR model and application based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020,48(6):488-497. (in Chinese))
- [18] 邓韶辉,王晓玲,石祖智,等. 基于 FIG 和 GWO-SVM 的灌浆功率时序预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):426-432. (DENG Shaohui, WANG Xiaoling, SHI Zuzhi, et al. Time series prediction of grouting power based on FIG and GWO-SVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020,48(5):426-432. (in Chinese))
- [19] 杨丹. 区域洪水灾害风险特征及其演化态势分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
- [20] 唐红亮,谢宇宁,王冬,等. 基于突变理论和模糊数学的湖库型水源地风险评价[J]. 中国农村水利水电,2024(2):178-185. (TANG Hongliang, XIE Yuning, WANG Dong, et al. Risk assessment of lake-reservoir water source based on mutation theory and fuzzy mathematics [J]. China Rural Water Resources and Hydropower,2024(2):178-185. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-30 编辑:胡新宇)

(上接第 225 页)

- [36] GATIEN P, ARSENAULT R, MARTEL J L, et al. Using the ERA5 and ERA5-Land reanalysis datasets for river water temperature modelling in a data-scarce region[J]. Canadian Water Resources Journal,2023,48(2):93-110.
- [37] 刘锋,严冬,范文晓,等. 近 50 年来新疆阿克苏河流域平原区气候变化周期分析研究[J]. 新疆农业大学学报,2021,44(2):117-122. (LIU Feng, YAN Dong, FAN Wenxiao, et al. Analysis of climate change cycle in Aksu River Basin, Xinjiang in recent 50 years [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021,44(2):117-122. (in Chinese))
- [38] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的未来气候变化下汉江流域干旱特征研究[J/OL]. 水资源保护. [2024-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240520.1608.009.html>. (WANG Lei,ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. Drought characteristics in Hanjiang River Basin under future climate change based on CMIP6 [J/OL]. Water Resources Protection. [2024-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240520.1608.009.html>. (in Chinese))
- [39] MCGUIRE C R, NUFIO C R, BOWERS M D, et al. Elevation-dependent temperature trends in the Rocky Mountain Front Range: changes over a 56 and 20-year record[J]. Plos One, 2012, 7(9):12-13.

(收稿日期:2024-06-12 编辑:胡新宇)