

姚睿, 诸葛亦斯, 余晓, 等. 库河系统水温特性对气候变化响应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 59-70. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.005

YAO Rui, ZHUGE Yisi, YU Xiao, et al. Study on response of water temperature characteristics in reservoir-river systems to climate change [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 59-70. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.005

# 库河系统水温特性对气候变化响应研究

姚睿<sup>1,2</sup>, 诸葛亦斯<sup>2</sup>, 余晓<sup>2</sup>, 许旭明<sup>2</sup>, 聂睿<sup>2</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院  
水生态环境研究所, 北京 100048)

**摘要:**【目的】气候变化加剧, 水库热分层特性及下游河道水温的变化对水生态系统的影响成为水资源管理中的关键问题。选取龙羊峡水库探讨气候变化及水库调度对水库水温结构稳定性及下泄水温对下游河道生态的影响。【方法】利用 CE-QUAL-W2 水动力模型, 结合未来四种不同社会发展路径所代表的气候变化及两种水库调度方式, 对龙羊峡水库水温及下泄水温进行了模拟分析。【结果】结果显示: (1) 气候变暖及低水位调度下的龙羊峡水库温跃层厚度平均 15.57 m, 温跃层强度平均 0.55 °C/m, 分层稳定期周期为 244~281 d; 高水位温跃层厚度平均 20.57 m, 温跃层强度平均 0.37 °C/m, 分层稳定期周期为 251~288 d; (2) 常规发展路径(SSP-8.5)下泄水温与建库前下游河道水温温差指数在不同调度方式下分别是 45.66 °C·d 和 12.39 °C·d, 均为最小; (3) 常规发展路径(SSP-8.5)下泄水温会提前约 1 个月的时间达到花斑裸鲤的繁殖目标水温。【结论】结果表明: 气候变化对库河系统水温特性变化具有显著作用, 应对气候变化需要采取合理的调度方式。

**关键词:** 气候变化; 库河系统; 热分层; 下泄水温; 龙羊峡水库; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0059-12



听语音, 聊科研

## Study on response of water temperature characteristics in reservoir-river systems to climate change

YAO Rui<sup>1,2</sup>, ZHUGE Yisi<sup>2</sup>, YU Xiao<sup>2</sup>, XU Xuming<sup>2</sup>, NIE Rui<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** [Objective] With the intensification of climate change, the effects of thermal stratification in reservoirs and water temperature fluctuations in downstream river channels on aquatic ecosystems have become critical issues in water resource management. This study examines Longyangxia Reservoir to investigate the effects of climate change and reservoir operations on the stability of water temperature stratification and the ecological impacts of discharge water temperatures on the ecosystems of downstream river. [Methods] Using the CE-QUAL-W2 hydrodynamic model, simulations were conducted based on four socio-

收稿日期: 2024-10-21; 修回日期: 2024-12-18; 录用日期: 2024-12-31; 网络出版日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2340224)

作者简介: 姚睿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境生态修复与保护研究。E-mail: yaorui990116@163.com

通信作者: 诸葛亦斯(1981—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事河流生态环境保护与修复研究。E-mail: 50420381@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

economic pathways representing future climate change scenarios and two reservoir operation strategies. These simulations examined the water temperature and discharge water temperature of Longyangxia Reservoir. [Results] The result showed that: (1) under climate warming and low water level operations, the average thermocline thickness of Longyangxia Reservoir was 15.57 m, with an average thermocline strength of 0.55 °C/m and a stable stratification period lasting from 244 to 281 days. Under high water level operations, the average thermocline thickness was 20.57 m, with an average thermocline strength of 0.37 °C/m and a stable stratification period lasting from 251 to 288 days. (2) Under the conventional pathway (SSP-8.5), the temperature difference index between the discharge water temperature and the downstream river water temperature before reservoir construction was 45.66 °C · d and 12.39 °C · d under different operation strategies, both showing the minimum values. (3) Under the conventional pathway (SSP-8.5), the discharge water temperature reached the optimal reproduction temperature for *Gymnocypris eckloni* approximately one month earlier. [Conclusion] The result highlight that climate change significantly affects the water temperature characteristics of the reservoir-river systems, suggesting that effective operation strategies are essential for addressing climate change.

**Keywords:** climate change; reservoir-river systems; thermal stratification; discharge water temperature; Longyangxia Reservoir; influencing factors

## 0 引言

在全球气候变化日益严峻的大背景下,水资源的管理和生态系统的保护已上升为全人类共同面临的关键挑战。水库作为关键的水资源调控与供应基础设施,对于灌溉、发电和居民供水等领域具有不可估量的经济价值和社会意义<sup>[1]</sup>。随着气候变化的不断加剧,水库及下游河流作为整体的生态环境问题,尤其是热分层现象和下泄水温对下游生态的影响,引起了广泛关注。气候变化对水库热分层的直接作用,对库河系统的维护、水质保障及其可持续利用提出了严峻的问题。

气候变化目前被认为是湖泊和水库水生生态系统面临的最严峻挑战之一<sup>[2]</sup>。研究表明,水柱中的垂直梯度及其动态变化深受气象驱动因素的影响<sup>[3]</sup>,这使得湖泊的热分层对气候变化极为敏感,VALERIO等<sup>[4]</sup>对此观点给予了支持。众多研究者如SAHOO等<sup>[5]</sup>,均已证实气候变化显著影响了湖泊的热分层和混合状态<sup>[6]</sup>。张晨等<sup>[7]</sup>探讨了气候变化对湖库水环境的潜在影响,并分析了不同气候类型下湖库水环境对气候变化的响应差异。尽管湖泊与气候变化的关系受到了广泛关注,但关于水库的研究却相对较少<sup>[8]</sup>。与湖泊相比,水库对气候变化的响应存在一定差异,这主要是因为水库的蓄水和流出受到人为的积极管理<sup>[9]</sup>。调度是区分水库与湖泊的关键因素,研究水库水温时,需同时考虑气候和调度两个方面的因素。较高的气温会导致和加剧大型水体如水库的分层现象,形成具有不同特性的水层<sup>[10-12]</sup>。这种分层对水库内的养分循环产生显著影响,可能导致水库内部及下游生态系统的失衡<sup>[13]</sup>。预计气温上升还将提高水

库温度,延长分层期并加深温跃层。程海燕等<sup>[14]</sup>针对重庆市鲤鱼塘水库,研究了气候变化对稳定分层型供水水库水温的影响。王帅<sup>[15]</sup>则探讨了气候变化和水库调度对山美水库水温分层结构的影响,并分析了不同时间尺度下水温分层的变化特征。钟天凤<sup>[16]</sup>采用MIKE 3构建水库三维水温模拟模型,研究水库不同取水高程下水温垂直分层情况,分析取水口高程对库首水体温跃层强度、下泄水温、均温层位置的影响。高少泽等<sup>[17]</sup>关注了气候变化趋势下龙羊峡水库水温结构的演变及其对下游河道水温的影响。邹昊等<sup>[18]</sup>聚焦于气候变化对黄河上游龙羊峡水库水温的影响,探讨了区域气温、降水与水库水温之间的关系,以及气候变化对水温结构演变的作用。MARIOAL等<sup>[19]</sup>研究了气候变化和水库建设对河流水温的影响,并探讨了相应的管理策略。刘金等<sup>[20]</sup>研究了气候变化对珠江流域水库群在枯水期运行的影响,并评估了未来不同排放情景下水库群的多目标运行方案。

研究表明,水库下泄水温的变化对下游栖息地的条件及生物群落有着显著影响<sup>[21]</sup>。水温在栖息地生态系统中扮演着至关重要的角色<sup>[22]</sup>。对于某些鱼类而言,水温的适宜范围是其繁殖的关键因素<sup>[23]</sup>。气温的上升导致区域性水温增加,这对冷水水生物种的长期存活构成了威胁<sup>[24]</sup>。叶舟等<sup>[25]</sup>针对浙江省滩坑水库,研究了下泄低温水对下游水生生物的影响,并探讨了满足下游生境水温需求的分层取水调度策略。曾本和等<sup>[26]</sup>聚焦于水温对拉萨裂腹鱼胚胎发育的影响,并确定了适宜的孵化水温范围。邓云等<sup>[27]</sup>分析了三峡工程蓄水后对宜昌至监利河段水温情势的影响,以及这种变化对中华鲟和四大家鱼产卵场所带来的影响。

本研究基于成熟的水动力模型 CE-QUAL-W2, 分析了龙羊峡水库水温结构的稳定性以及下泄水温对气候变化和水库调度变化的响应。以往的研究往往单独分析这两个因素的影响, 而忽略了它们之间的相互作用。一些研究在真实气候条件下探讨了取水对热分层的影响<sup>[28]</sup>, 而另一些研究则在没有考虑水库管理的情况下, 分析了气候变化对水库热分层的影响<sup>[29]</sup>。本文的目的是将气候变化和水库调度综合考量, 阐明在气候变暖的未来背景下, 这两个因素如何协同影响水库水温。通过本研究, 旨在揭示水库水温分布及热分层特性对气候变化的响应关系, 明确在气候变化背景下水库下泄水温对下游生态的影响, 并为水库管理者提供适应性管理策略, 确保水库及其下游生态系统的可持续性。

## 1 研究区概况

龙羊峡水库位于青海省境内黄河干流上游, 是龙羊峡-刘家峡河段已建梯级水电站的龙头水库, 工程以发电为主, 兼顾防洪、灌溉等综合利用。坝址处天然年平均径流量 208 亿  $\text{m}^3$ , 坝高 178 m, 水库正常蓄水位 2 600 m, 对应库容 246 亿  $\text{m}^3$ , 回水长度 108 km。龙羊峡水库及下游河道贵德水文站位置如图 1 所示。建库后, 龙羊峡水库多年平均入库流量 622.81  $\text{m}^3/\text{s}$ , 多年平均出库流量 538.06  $\text{m}^3/\text{s}$ , 龙羊峡水库自蓄水以来多年平均水位 2 565.3 m, 低水位调度期多年平均水位 2 553.1 m, 高水位调度期多年平均水位 2 580.3 m。多年平均入库水温 7.5  $^{\circ}\text{C}$ , 水库常年不结冰。龙羊峡水库地处青海省共和县和贵南县交界处, 该地区多年平均气温 4.7  $^{\circ}\text{C}$ , 最高气温 23.7  $^{\circ}\text{C}$ , 最低气温 -17.8  $^{\circ}\text{C}$ ; 多年平均降雨量 200~300 mm。龙羊峡水库上游地区人类活动较少, 为研究高海拔水库的热分层特性提供了理想条件, 同时, 水库位于黄河上游, 这里是多种冷水性鱼类的栖息地。冷水性鱼类对水温变化极为敏感, 水库的热分层状况及水库下泄水温的波动对于它们的繁殖有着直接的影响。因此, 将龙羊峡水库及下游河道作为库河系统研究对象, 不仅有助于揭示气候变化下的高海拔水库热分层特性, 同时为理解气候变化对黄河上游冷水性鱼类生态系统的影响提供了重要的科学依据。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 气温数据

基于未来四种不同社会发展路径及气候政策下的气温数据来源于第六次国际耦合模式比较计划

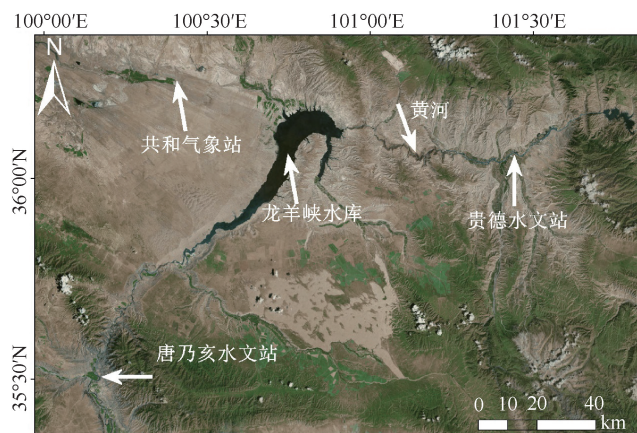


图 1 龙羊峡库河系统研究区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area of Longyangxia Reservoir-River system

(CMIP6)中的全球气候模式(BCC-CSM2-MR)输出的气温预测结果<sup>[30]</sup>。气温数据采用双线性法进行插值, 空间分辨率为 0.25 $^{\circ}$ , 时间分辨率为 1 d, 并基于概率分布的统计偏差进行了订正<sup>[31]</sup>。详细信息如表 1 所列。4 种情景下气温变化的具体趋势如图 2 所示。

表 1 未来气候变化情景详情

Table 1 Details of future climate change scenarios

情景	代表社会路径	变化趋势	与现状气温变化幅度/ $^{\circ}\text{C}$
SSP-2.6	可持续发展	上升幅度最小, 基本与现状持平	0.1
SSP-4.5	中度发展	缓慢上升后趋于稳定	1.0
SSP-7.0	局部发展	先上升后趋于稳定	2.5
SSP-8.5	常规发展	持续上升	3.2

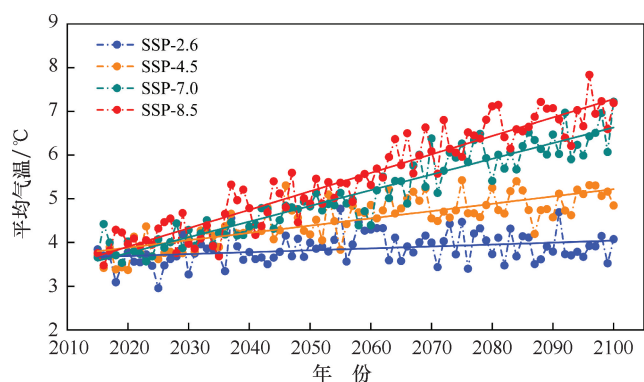


图 2 各情景下年平均气温变化趋势

Fig. 2 Variation trends of annual average temperature under different scenarios

### 2.2 CE-QUAL-W2 模型

#### 2.2.1 模型的构建

根据网格划分原则, 龙羊峡水库库区长度约为 40 km, 库区被划分为 50 $\times$ 54 (纵向 $\times$ 垂向) 个矩形单

元, 纵向网格单元长度为 844 m, 一共 50 个断面(包括上下游各一个虚拟断面); 在垂向网格处理中, 模型包括表底虚拟层内公分为 54 层, 层厚 3 m, 考虑到模型顶部高程应高于龙羊峡水库设计正常蓄水位 2 600 m, 将模型顶部设置为 2 601 m, 网格生成之后的平面、纵剖面、横剖面如图 3 所示。

### 2.2.2 模型边界条件

龙羊峡水库水动力模型主要数据涵盖水文、气象、地形、水温及水库调度资料。模型边界条件包括上下游流量、水体表面和河床底部。上游流量基于唐乃亥站多年径流量, 下游出流依据贵德站数据。气象数据来自共和气象站, 入流水温采用唐乃亥站平均水温。模型初始条件设定包括时间、水体类型、流量、水量、流速和水温, 初始流速为零, 模型计算时间向前延伸 1 a 以消除初始误差。

### 2.2.3 参数率定及结果验证

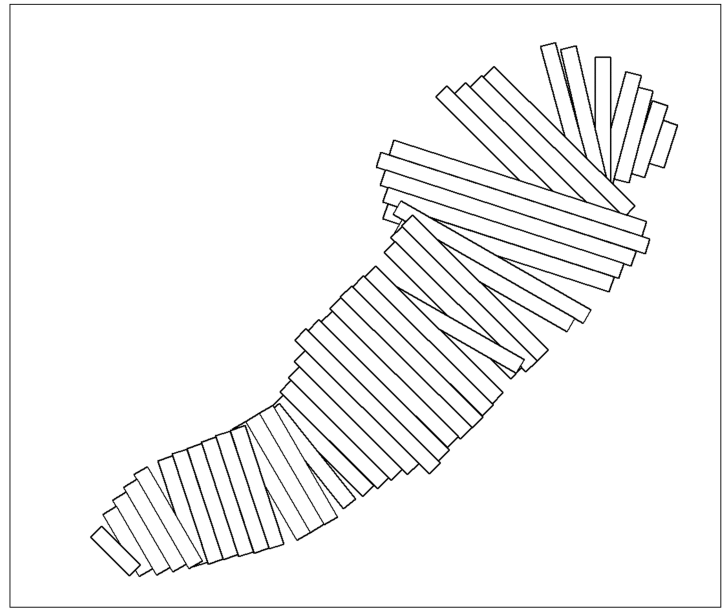
模型参数率定选取 2009—2010 年坝前垂向水温实测数据, 基于代表性和一致性原则, 通过绝对平均误差、均方根误差作为目标函数, 量化模型预测值与实际值之间的差异, 识别对模型输出敏感的参数。对每个敏感参数进行单独分析, 评估其对模拟结果的影响程度。根据敏感性分析结果, 为待率定参数设定合理的取值范围, 并依据目标函数的最小差异确定最终参数值。龙羊峡水库水动力模型的主要敏感参数取值如表 2 所列, 其他参数选取模型默认值。

采用统计量绝对平均误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 对模型计算结果进行验证。计算公式如下

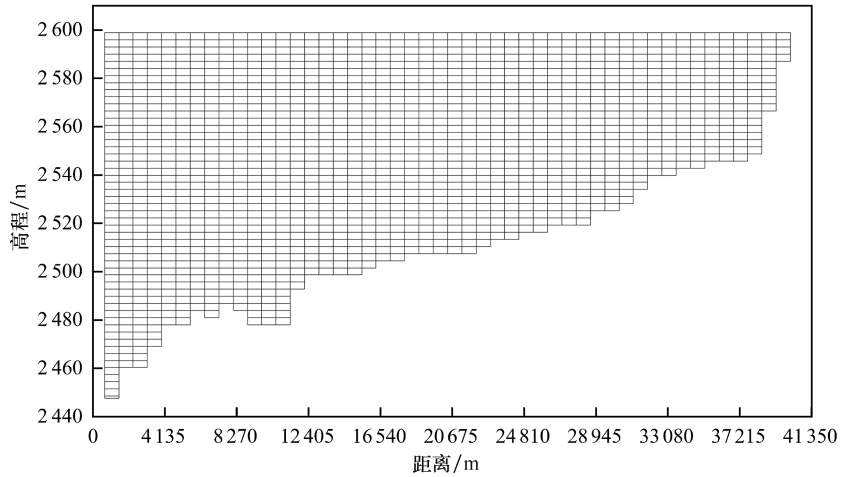
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{obs, i} - X_{mod, i}|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs, i} - X_{mod, i})^2}{n}}$$

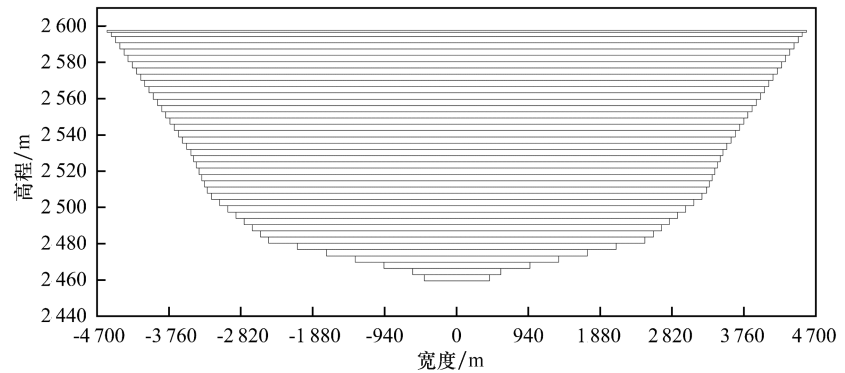
式中,  $n$  为实测值的个数;  $X_{obs, i}$  为实测值;  $X_{mod, i}$  为模拟值。



(a) 模型网格平面



(b) 模型网格纵剖面



(c) 模型网格横剖面

图 3 龙羊峡水库模型基本视图

Fig. 3 Basic views of Longyangxia Reservoir model

验证结果如图 4 所示, 冬季水温不分层的时候模拟的精度较好, 夏秋季水温强分层期间模拟精度较差, 春季弱分层期间模拟精度最高, 最小的 RMSE

表 2 龙羊峡水库水温模型参数取值

Table 2 Parameter values for Longyangxia Reservoir water temperature model

水动力参数	变量名	取值
纵向涡流黏度	AX	1.0
纵向涡流扩散系数	DX	1.0
底部热交换系数	CBHE	0.3
沉积物温度	TSED	10.0
界面摩擦系数	FI	0.015
垂向湍流闭合算法形式	AZC	W2
最大垂向涡流黏度	AZMAX	1.0
表面吸收太阳辐射	BETA	0.45
纯水消光系数	EXH2O	0.45
风遮蔽系数	WSC	0.9
动态阴影或静态阴影	SHADE	0.8

和  $MAE$  分别是  $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表层水温的模拟效果比较差, 夏季水温分层较为明显, 温跃层的深度模拟较为准确。模型的验证结果能够反映龙羊峡水库的水温分层以及年内变化规律, 整体呈现趋势较为接近, 模拟结果基本能够满足研究的需求。

### 3 结果分析

#### 3.1 坝前水温模拟

坝前垂向水温模拟计算结果如图 5 所示。气候变暖趋势下, 水库坝前年平均水温随气温上升逐渐升高。运行调度方式同样对于水温具有显著影响, 低水位调度下, 四种情景对应水温变化范围在  $9.89\sim$

$11.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 高水位调度下, 水温变化范围在  $12.16\sim 13.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 高水位调度下的年平均水温普遍高于低水位。温跃层定义为温度梯度超过  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  的水层, 其形成与消散标志热分层的开始与结束。热分层稳定周期定义为温跃层形成与消散日期之差。研究发现, 低水位调度下温跃层厚度平均  $12.57\text{ m}$ , 温跃层强度平均为  $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , 分层稳定期随气候变暖变化范围在  $244\sim 281\text{ d}$ ; 高水位温跃层厚度平均  $20.57\text{ m}$ , 温跃层强度平均为  $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , 分层稳定期随气候变暖变化范围在  $251\sim 288\text{ d}$ 。

#### 3.2 温跃层特性分析

温跃层特性分析结果如图 6 所示。图 6(a)(b) 显示不同气候变化及不同调度方式共同作用下温跃层厚度及温跃层强度的离散程度。研究发现, 高水位调度方式下温跃层厚度离散程度更高, 低水位下温跃层强度离散程度更强, 这种差异可能与水库在两种调度下的水体体积、表底水温温差相关。标准差分析结果如图 6(d) 所示, 气候变暖趋势下, 高水位水库温跃层厚度变化趋势平缓, 低水位温跃层强度变化敏感。热分层稳定周期随气候变暖呈上升趋势, 如图 6(c) 所示, 高水位分层周期普遍更长。

#### 3.3 下泄水温与下游河道水温温差指数

龙羊峡水库的下泄水温受单一发电出流影响, 其发电引水口处水温即代表水库下泄水温。研究发现: 低水位调度下, 年平均下泄水温变化范围为  $8.61\sim$

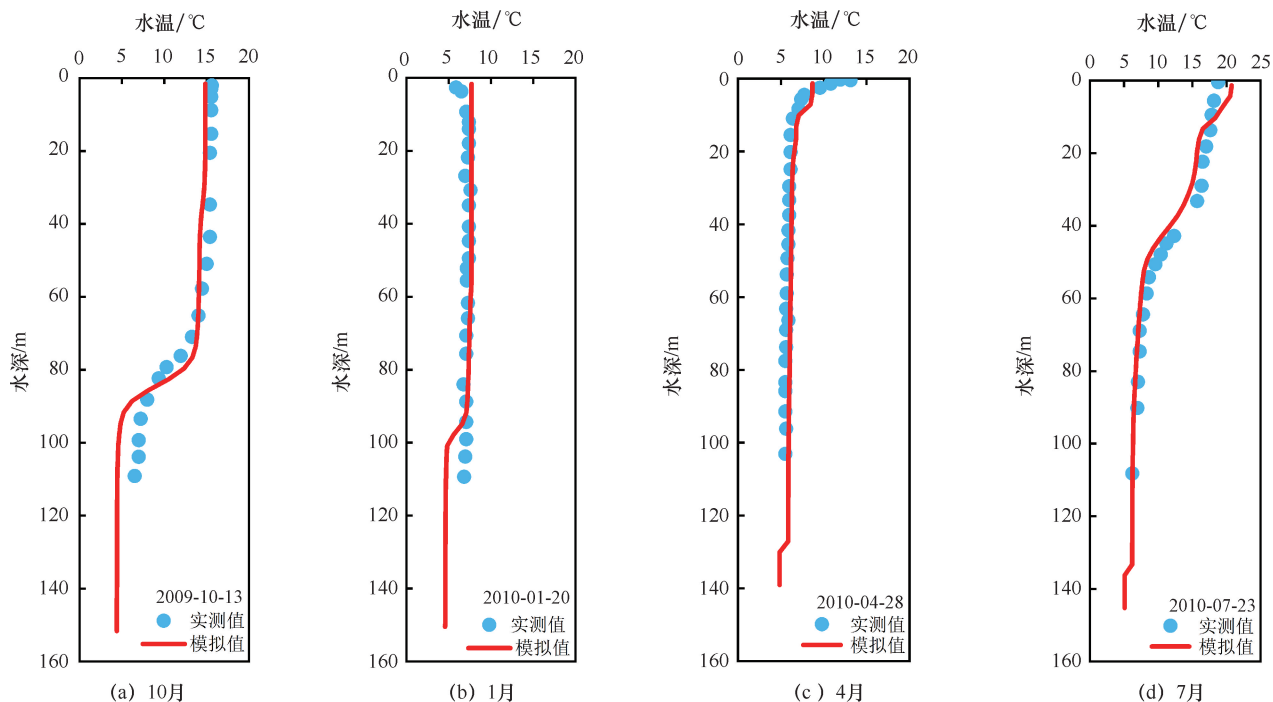


图 4 龙羊峡水库坝前水温率定结果

Fig. 4 Calibration results of water temperature at dam site of Longyangxia Reservoir

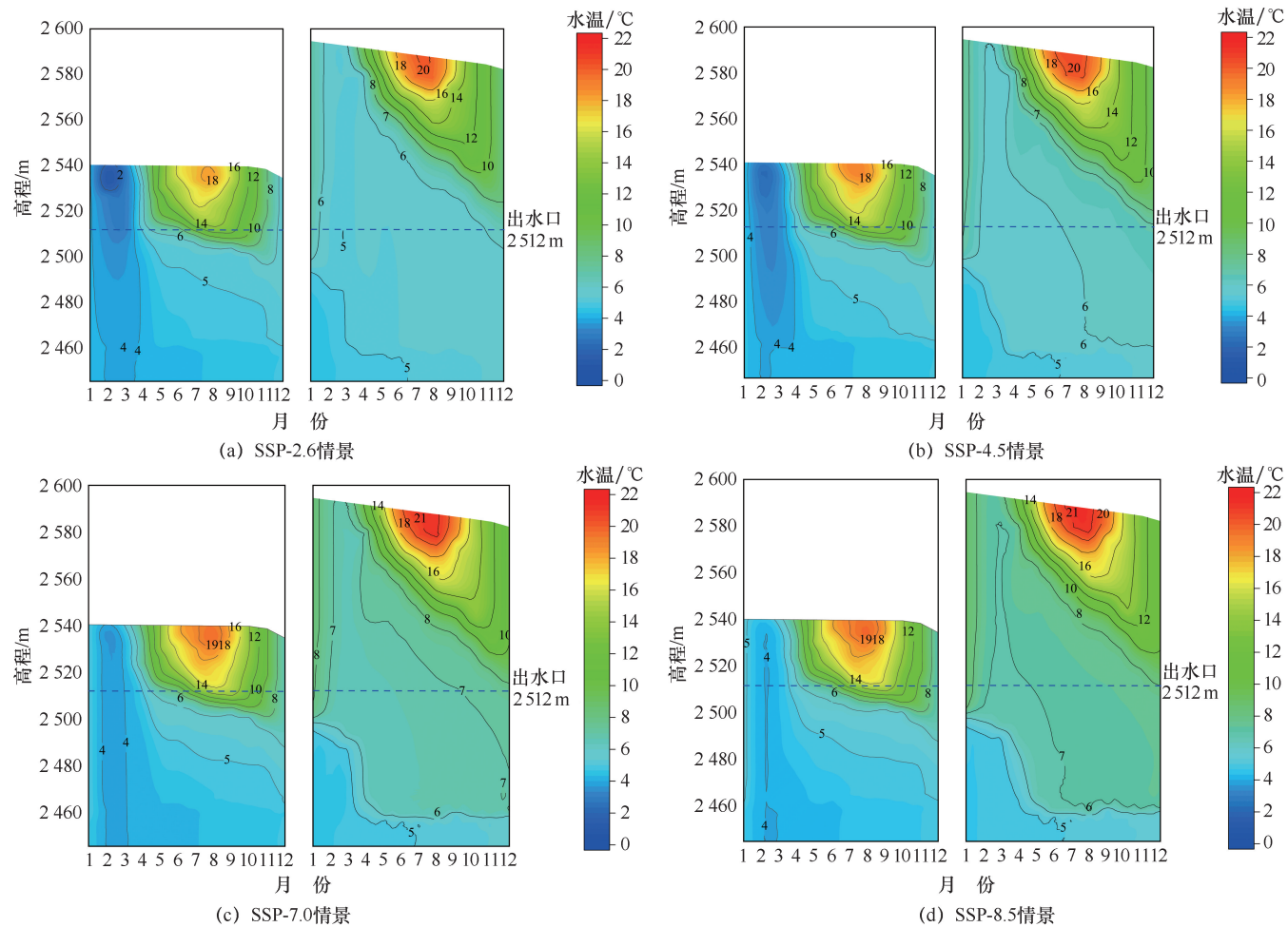


图5 各气候变化情景下龙羊峡水库坝前水温等高线

Fig. 5 Contour maps of water temperatures at dam site of Longyangxia Reservoir under different climate change scenarios

10.15℃,高水位下变化范围为5.77~7.54℃,均随气候变暖而升高。两种调度模式下,年均下泄水温与建库前后贵德站多年平均水温的温差呈现相反趋势。低水位时,下泄水温与建库前后的温差分别增大0.25~1.79℃和0.19~1.73℃;高水位时,温差分别-2.59~-0.82℃和-2.65~-0.88℃范围内减小。气候变暖,不同调度方式年内最低及最高下泄水温的出现时间不同程度提前,具体模拟结果如表3所列。

为描述下泄水温在不同气候及调度作用下与下游河道建库前多年平均水温之间的差异,将下泄水温与下游河道建库前多年平均水温年内变化曲线之间的积分值定义为温差指数。由于高水位下泄水温坦化现象显著,与实际河道水温季节性变化规律偏差较大,所以选择高水位与低水位的下泄水温均值作为常规调度方式下的下泄水温,如图7所示。常规调度下温差指数分别为48.41℃·d、48.47℃·d、47.82℃·d以及45.66℃·d,常规发展路径(SSP-8.5)下温差指数最小;低水位下温差指数分别为

18.50℃·d、16.91℃·d、14.11℃·d及12.39℃·d,常规发展路径(SSP-8.5)下温差指数最小。总体来说,常规发展路径下气候变化最为剧烈,但对于缩小下泄水温与下游河道水温温差具有促进作用,同时低水位调度会加速这个过程。

### 3.4 下泄水温对下游河道生态影响分析

龙羊峡水库下游土著鱼类适宜繁殖目标水温与下泄水温及建库前后下游河道多年平均水温对比分析如图8所示。该地区的鱼类以冷水鱼为主,龙羊峡-刘家峡河段的鱼类共有35种,其中鲤科鱼类最多达到16种,其次为鳅科鱼类13种<sup>[32]</sup>。对其中三种鱼类繁殖周期及适宜水温进行调查,极边扁咽齿鱼繁殖期为4—6月,适宜产卵水温要求在6~11℃<sup>[33]</sup>;花斑裸鲤进行人工繁殖试验得到其繁殖水温在9~14℃,产卵周期一般在4—5月,偶尔会延迟至6—7月<sup>[34]</sup>;厚唇裸重唇鱼产卵周期一般为4—6月,产卵适宜水温约8℃<sup>[35]</sup>。研究发现,建库后水温达到鱼类繁殖目标水温较建库前推迟约1个月;常规调度下,

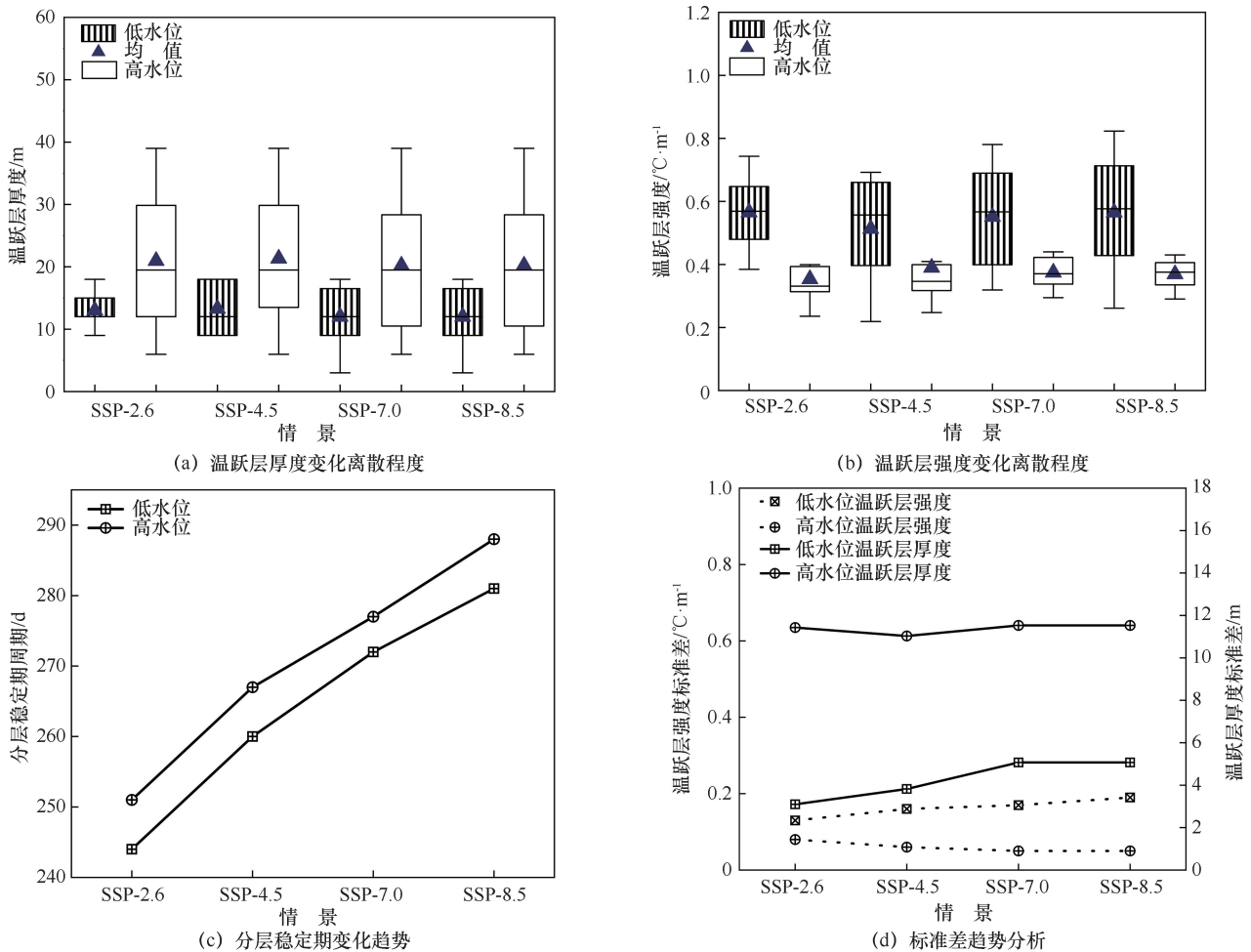


图 6 水库水温结构稳定性分析

Fig. 6 Stability analysis of water temperature stratification in reservoir

表 3 各情景下泄水温模拟结果

Table 3 Simulation results of discharge water temperatures under different scenarios

调度方式	情景	最低温出现时间	最低水温/ °C	最高温出现时间	最高水温/ °C	平均水温/°C	与建库前平均水温温差/°C	与建库后平均水温温差/°C
低水位	SSP-2.6	3 月	2.98	8 月	14.65	8.61	0.25	0.19
	SSP-4.5	2 月	3.13	8 月	15.42	8.84	0.48	0.42
	SSP-7.0	2 月	3.76	8 月	16.28	9.58	1.22	1.16
	SSP-8.5	2 月	4.07	7 月	16.77	10.15	1.79	1.73
高水位	SSP-2.6	3 月	5.04	1 月	6.63	5.77	-2.59	-2.65
	SSP-4.5	3 月	5.67	12 月	7.89	6.38	-1.98	-2.04
	SSP-7.0	3 月	6.55	12 月	8.61	7.18	-1.18	-1.24
	SSP-8.5	3 月	6.93	12 月	8.98	7.54	-0.82	-0.88

常规发展路径(SSP-8.5)相较其他发展路径的水库下泄水温更早到达目标水温;低水位调度下,所有气候变化情景的下泄水温均能满足扁咽齿鱼及厚唇裸重唇鱼繁殖目标水温的需求,常规发展路径(SSP-8.5)下泄水温达到花斑裸鲤的繁殖目标水温较其他几种情景能够提前约1个月的时间。研究表明,下泄水温与下游河道水温温差指数越小,鱼类繁殖目标水温越能提前到达。

## 4 结果讨论

### 4.1 库河系统中双重作用下水库水温结构稳定性响应特性

气候变化及水库调度共同作用对龙羊峡水库热分层特性的影响显著,水库水温结构的稳定性与温跃层厚度、温跃层强度及热分层稳定期的周期之间存在密切的相关性<sup>[14]</sup>。通过综合热分层特性指标来判断

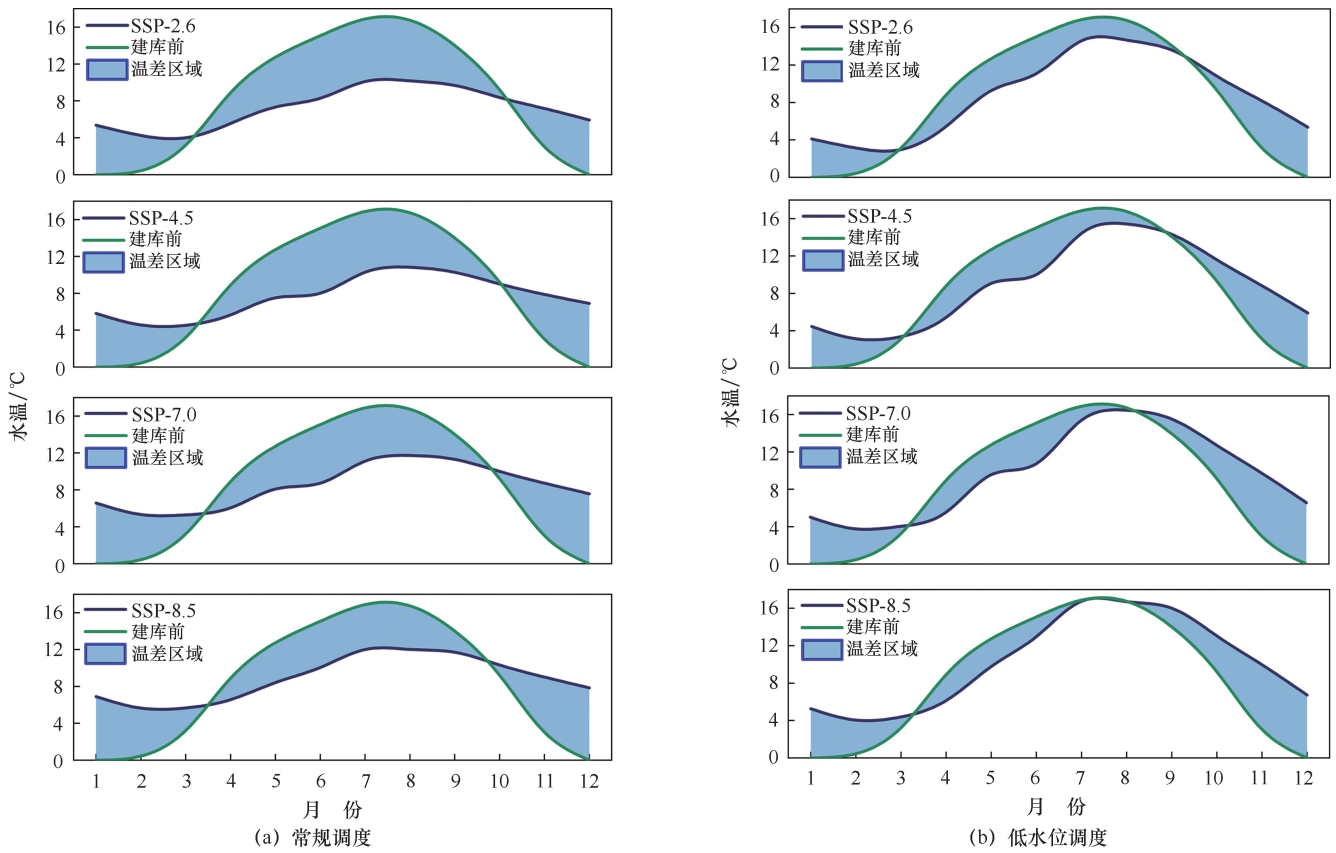


图7 水库下泄水温与建库前贵德站多年平均水温年内变化曲线

Fig. 7 Annual variation curves of reservoir discharge water temperatures and multi-year average water temperatures at Guide Station before reservoir construction

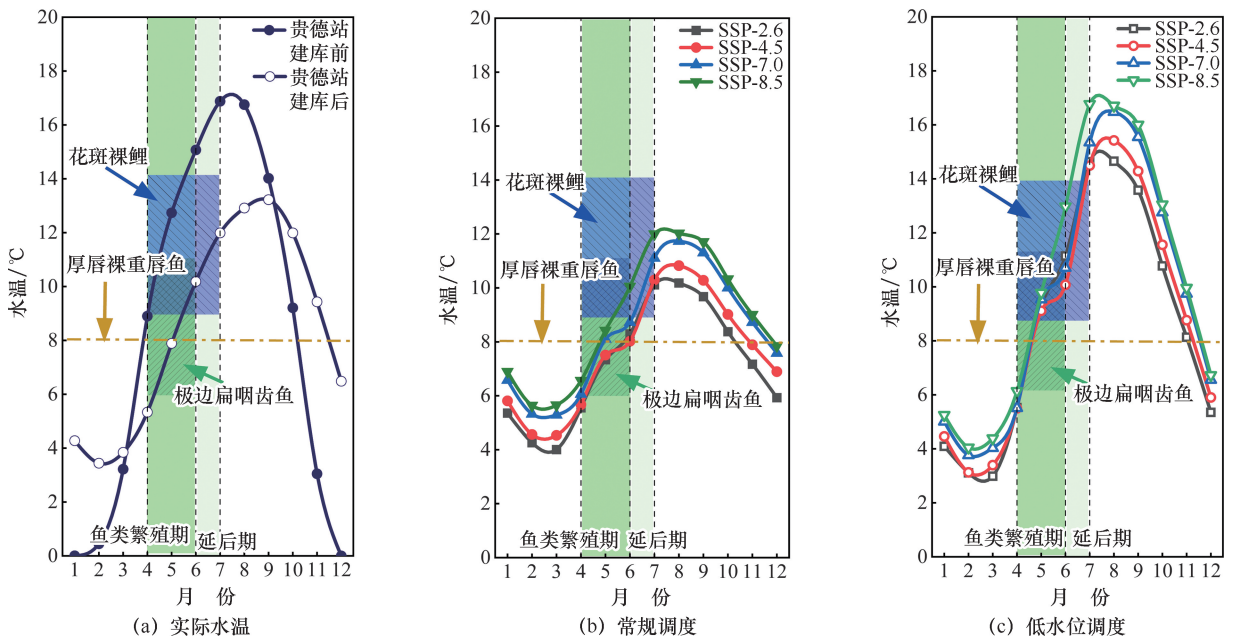


图8 土著鱼类生殖繁衍适宜水温对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of suitable water temperature for indigenous fish reproduction

未来气候变化及水库调度方式改变下水库水温结构稳定性, 实际上, 在综合分析中定义这些指标的权重是

相对较少研究的, 根据不同的研究目的对确定权重有所不同。故本研究采用逐一统计分析各指标的方法来

评估气候变化和水库调度对水库水温结构稳定性的影响。本研究发现,气候变暖趋势剧烈及高水位调度共同作用下,龙羊峡水库水温结构稳定性最强。宋策等<sup>[36]</sup>研究发现,水库调度是影响龙羊峡水库水温结构变化的最主要原因,水位是决定水库水温分层形态变化最主要因素。高水位运行时,内部水温变化较小;低水位运行时,内部水温受入流水温影响较大,变幅较大。高少泽等<sup>[17]</sup>研究发现,龙羊峡水库水温结构受气候变暖和水库运行共同影响,呈现出夏季和秋季分层、冬季和春季混合的特征,分析了龙羊峡水库年内水温结构变化规律。本研究则关注更大时间尺度上的未来气候变化对水库水温结构稳定性的影响,同时考虑水库调度的共同作用。邹昊等<sup>[18]</sup>研究表明,气候变化对龙羊峡水库水温结构演变具有重要影响,但这种影响并不由气象因子直接作用于库区水温,在年内变化上,气温与降水通过对入库水温的影响,从而间接影响到库区坝前水温结构<sup>[18]</sup>。这与宋策等研究保持较为一致的前置条件,入库水温会受到气候变化的作用,对于分析年内水温结构变化可能会产生较大的影响,但在本研究中,时间跨度在未来气候变暖趋势下,且在模型计算设置中将模拟时间往前延申一年,入库水温对库区水温结构的影响可以忽略不计。薛刚<sup>[37]</sup>利用 MIKE3 水动力模型模拟龙羊峡水库水温结构及对下游河道水温影响,研究发现龙羊峡水库水温呈现稳定分层特征,受水库运行水位影响显著。邹昊<sup>[38]</sup>基于机器学习模型(GA-SVR)模拟龙羊峡水库水温分层结构,研究发现龙羊峡水库水温分层结构受气候变化影响显著,呈现周期性变化,坝前水温主要分为三种类型,混合等温型、过渡型和分层明显型。上述研究发现中较多关注在单一因素影响下会对其内部水温及层化结构产生影响,事实龙羊峡水库作为人工调节能力强,海拔高受气候变化影响显著的大型水库,运行调度方式的改变对于水体内部热交换会产生巨大作用。气候的变化对于水体内部的热交换可能是有限的,但是水库调度才是改变水体温度变化及层化结构的主导因素。

程海燕等<sup>[14]</sup>研究发现气候变暖会提前鲤鱼潭水库水温分层开始时间,延迟分层结束时间,延长分层周期,并增强水库热稳定性,从而减弱水体的垂向混合能力。王帅<sup>[15]</sup>研究发现气候变暖会显著增加山美水库的水温,表层增温幅度大于底层,热分层深度变浅,厚度增大,强度增强,分层时间延长。上述研究与本研究中关注气候变化对龙羊峡水库的热分层特性有相同之处,但是本研究中水库调度方式的不同对于

热分层强度及厚度却表现出不一致的变化,高水位热分层强度在相同气候变化下低于低水位调度,主要原因是在两种调度模式下温跃层上边界及下边界温差相差甚小,所以呈现温跃层厚度与强度的相反趋势,但对于温跃层分层周期并不会产生改变。综合结果得到,高水位及气候变化剧烈的情景下,水库水温结构稳定性最强。

较高的水温结构稳定性并不意味着对水库生态系统起着积极的作用。有研究指出,全球变暖导致水温升高,进而影响水体的稳定度、溶解氧含量以及水生生物的生存和繁殖<sup>[7]</sup>。对于大型水库而言,水温的分层结构变化对水质有重要影响。水温的变化会影响水体的物理和化学性质,进而对水生生物的生存繁殖和水环境系统的生态平衡产生影响<sup>[39]</sup>。在本文研究中,我们也关注龙羊峡水库下泄水温对于下游生态的影响。由于水库为单一出流,高水位调度引起的水温结构稳定性增加,导致下泄水温缺乏季节性规律,可能成为下游生态问题的重要因素。

#### 4.2 库河系统中下游河道温差指数对鱼类的影响

量化龙羊峡水库下泄水温与下游河道多年平均水温之间的偏差,研究发现,高水位调度下的水库下泄水温呈坦化现象,改变了河道天然水温年内季节性变化规律,这与唐旺等研究结论相一致,表明水库在高水位运行时,库区水温分布不受当年入流水温过程的影响,其对下游水温的影响效应最大,尤其是夏季低温水的影响效应极为显著<sup>[40]</sup>。本研究使用温差指数量化下泄水温与下游河道水温之间的差异。研究发现,气候变化最为剧烈的常规发展路径(SSP-8.5)情景,下泄水温与下游河道水温温差指数最小,水温最为接近。叶舟等<sup>[25]</sup>研究表明,水库蓄水会导致下泄水温低于天然水温。气候变暖趋势加剧导致水温上升,减缓了因水库建设而带来的低温水下泄,总体上使水库下泄水温与建库前河道水温更为接近。

叶舟等<sup>[25]</sup>研究发现采用分层取水方案后,鼋自然保护区处夏季各月下泄水温可以保持在 18℃ 以上,满足鼋的产卵期需求。郝好鑫等<sup>[39]</sup>发现水库蓄水后向家坝站附近重要鱼类适宜产卵水温时间延迟 30~40 d。邓云等<sup>[27]</sup>发现三峡水库蓄水后导致下游中华鲟和四大家鱼产卵场的特征水温出现时间明显推迟约 1 个月,对它们的繁殖产生不利影响。本研究发现,龙羊峡水库蓄水后水温达到鱼类繁殖目标水温较建库前推迟约 1 个月,这与邓云、郝好鑫等研究结果较为一致。气候变暖加速了龙羊峡水库下泄水温更早达到鱼类繁殖目标水温,同时在低水位调度下,水库

下泄水温较为接近建库前河道多年平均水温。与叶舟采取的分层取水方式不同, 本研究考虑通过调整调度方式来适应下游水温变化的需求。

## 5 结论

本研究通过模拟分析龙羊峡水库的热分层特性及下泄水温, 深入探讨了未来气候变化及水库调度共同作用下水库水温结构稳定性及下泄水温对下游河道生态影响, 得到以下几点结论。

(1) 高水位调度及常规发展路径(SSP-8.5)气候变化情景下, 龙羊峡水库水温结构稳定性最强, 但高水位调度导致的高水温结构稳定性并未对库河系统产生积极影响;

(2) 常规发展下路径(SSP-8.5)龙羊峡水库下泄水温与下游建库前多年平均水温偏差最小, 两种调度方式下温差指数分别为  $45.66\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  和  $12.39\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , 低水位调度方式会加速这个过程;

(3) 低水位调度在四种情景气候变化下, 都能够确保龙羊峡水库下泄水温按时达到下游土著鱼类繁殖目标水温的要求, 在常规发展路径(SSP-8.5)下, 下泄水温提前约1个月达到花斑裸鲤繁殖目标水温。

## 参考文献(References):

- [1] 许拯民, 莫修旭, 雷冠军, 等. 大凌河白石水库生态调度放流对策模型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(8): 125-133.
- XU Zhenmin, MO Xiuxu, LEI Guanjun, et al. Study on the ecological dispatch and flow release strategy model of Daling River Baishi Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(8): 125-133.
- [2] READ J S, WINSLOW L A, HANSEN G J, et al. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology [J]. Ecological Modelling, 2014, 291(5): 142-150.
- [3] TROLLE D, NIELSEN A, ANDERSEN H E, et al. Effects of changes in land use and climate on aquatic ecosystem: Coupling of models and decomposition of uncertainties [J]. Science of The Total Environment, 2019, 657(3): 627-633.
- [4] VALERIO G, PILOTTI M, BARONTINI S, et al. Sensitivity of the multiannual thermal dynamics of a deep pre-alpine lake to climatic change [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(5): 767-779.
- [5] SAHOO G B, SCHLADOW S G, REUTER J E, et al. The response of Lake Tahoe to climate change [J]. Climatic Change, 2013, 116: 71-95.
- [6] FENOCCHI A, ROGORA M, SIBILLA S, et al. Forecasting the evolution in the mixing regime of a deep subalpine lake under climate change scenarios through numerical modelling (Lake Maggiore,

Northern Italy, Southern Switzerland) [J]. Climate Dynamics, 2018, 51: 3521-3536.

- [7] 张晨, 来世玉, 高学平, 等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 691-700.
- ZHANG Chen, LAI Shiyu, GAO Xueping, et al. Advances in research on the potential impact of climate change on the water environment of lakes and reservoirs [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 691-700.
- [8] LEWIS JR, WILLIAM M, MC J R, et al. Effects of climatic change on temperature and thermal structure of a mountain reservoir [J]. Water Resources Research, 2019, 55(3): 1988-1999.
- [9] HAYES N M, DEEMER B R, CORMAN J R, et al. Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2017, 2(2): 47-62.
- [10] BI W, WENG B, YUAN Z, et al. Evolution characteristics of surface water quality due to climate change and LUCC under scenario simulations: a case study in the Luanhe River Basin [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(8): 1724.
- [11] WINTON R S, CALAMITA E, WEHRLI B. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification [J]. Biogeosciences, 2019, 16(8): 1657-1671.
- [12] FELDBAUER J, KNEIS D, HEGEWALD T, et al. Managing climate change in drinking water reservoirs: Potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies [J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(1): 1-17.
- [13] SPEARS B M, CARVALHO L, PERKINS R, et al. Long-term variation and regulation of internal phosphorus loading in Loch Leven [J]. Hydrobiologia, 2012, 681(1): 23-33.
- [14] 程海燕, 脱友才, 许维忠, 等. 气候变暖对稳定分层型供水水库水温影响研究[J]. 人民长江, 2022, 53(10): 22-30.
- CHENG Haiyan, TUO Youcai, XU Weizhong, et al. Study on the impact of climate warming on the water temperature of stable stratified water supply reservoirs [J]. Yangtze River, 2022, 53(10): 22-30.
- [15] 王帅. 气候变化和水库调度对山美水库不同时间尺度热分层结构的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2022.
- WANG Shuai. The impact of climate change and reservoir operation on the thermal stratification structure of Shanmei Reservoir at different time scales [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2022.
- [16] 钟天凤. 水库水温分层受取水口高程的影响分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(11): 28-31.
- ZHONG T F. Analysis of the influence of reservoir water temperature stratification on water intake elevation [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(11): 28-31.
- [17] 高少泽, 权全, 魏显贵, 等. 气候变暖趋势下龙羊峡水库水温结构模拟研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 115-119.

- GAO Shaoze, QUAN Quan, WEI Xiangui, et al. Simulation study on the water temperature structure of Longyangxia Reservoir under the trend of climate warming [J]. *Yellow River*, 2021, 43(9): 115-119.
- [18] 邹昊, 权全, 王雅宜, 等. 气候变化对龙羊峡水库水温的影响 [R]. 中国环境科学学会科学技术年会. 合肥: 中国环境科学学会, 2018.
- ZOU Hao, QUAN Quan, WANG Yayi, et al. The Impact of Climate Change on the Water Temperature of Longyangxia Reservoir [R]. Annual Meeting of the Chinese Society for Environmental Sciences. Hefei: Chinese Society for Environmental Sciences, 2018.
- [19] KEDRA M, WIEJACZKA L. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 626: 1474-1483.
- [20] LIU J, WANG S, JIA W, et al. Impact of climate change on reservoir operation during the dry season in the Pearl River Basin [J]. *Water*, 2023, 15(21): 37-49.
- [21] BURRIS V L, MCGINNIS D F, LITTLE J. Predicting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators [J]. *Water Research*, 2002, 36(18): 4605-4615.
- [22] JEPPESEN E, BRUCET S, NASELLI-FLORES L, et al. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 750: 201-227.
- [23] AUSTIN J A, COLMAN S M. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(6). DOI: 10.1029/2006GL029021.
- [24] 应碧茜. 极端干旱条件下长江口某电厂温排水影响研究 [J]. *水利发展研究*, 2025, 25(2): 103-110.
- YING Bixi. Study on the impact of thermal drainage from a power plant in the Yangtze River estuary under extreme drought [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(2): 103-110.
- [25] 叶舟, 龚梦园. 基于下游生境水温需求的水库分层取水调度研究 [J]. *人民长江*, 2022, 53(6): 105-110.
- YE Zhou, GONG Mengyuan. Research on reservoir layered water intake scheduling based on downstream habitat water temperature requirements [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(6): 105-110.
- [26] 曾本和, 龚君华, 刘海平, 等. 拉萨裂腹鱼胚胎适宜孵化水温研究 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(2): 96-103.
- ZENG Benhe, GONG Junhua, LIU Haiping, et al. Study on the suitable incubation water temperature for the embryos of *Schizothorax lacustris* in Lhasa [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(2): 96-103.
- [27] 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.
- DENG Yun, XIAO Yao, TUO Youcai, et al. Analysis of the impact of the Three Gorges project on the water temperature regime in the Yichang to Jianli river section [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 551-560.
- [28] WEBER M, RINKE K, HIPSEY M, et al. Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 96-105.
- [29] MIAO L, YUNLIN Z, KUN S, et al. Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 659(1): 614-624.
- [30] 龙鸿元, 王丽霞, 张珈玮, 等. 基于CMIP6气候情景的泾河流域水文模拟及预测 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(2): 89-103.
- LONG Hongyuan, WANG Lixia, ZHANG Jiawei, et al. Hydrological simulation and prediction of the Jinghe River basin based on CMIP6 climate scenarios [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(2): 89-103.
- [31] 何佩鸿, 胡琴. CMIP6模式对青藏高原极端温度的模拟能力评估及其未来预估 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2024, 39(1): 81-92.
- HE Peihong, HU Qin. Evaluation of the CMIP6 models' capability in simulating extreme temperatures over the Tibetan Plateau and their future projections [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2024, 39(1): 81-92.
- [32] 卓玉, 李钧乐, 李英钦, 等. 龙羊峡水库鱼类多样性空间分布格局 [J]. *水生生物学报*, 2024, 48(3): 504-512.
- ZHUO Yu, LI Junle, LI Yingqin, et al. Spatial distribution pattern of fish multidimensional diversity in Longyangxia Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(3): 504-512.
- [33] 张艳萍, 娄忠玉, 苏军虎, 等. 极边扁咽齿鱼人工繁殖技术 [J]. *水产学报*, 2010, 34(11): 1698-1703.
- ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, SU Junhu, et al. Artificial reproduction technology of the Extreme Edge Flatpharyngeal fish [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(11): 1698-1703.
- [34] 董艳珍, 邓思红, 肖文渊. 花斑裸鲤的人工繁殖试验 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2016, 37(1): 8-10.
- DONG Yanzhen, DENG Sihong, XIAO Wenyuan. Artificial reproduction experiment of the Spotted Naked Carp [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2016, 37(1): 8-10.
- [35] 潘文光, 石文良, 杨志, 等. 黄河上游茨哈峡至羊曲河段生态调度目标鱼类筛选 [J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 120-126.
- PAN Wenguang, SHI Wenliang, YANG Zhi, et al. Selection of target fish species for ecological regulation in the upper reaches of the Yellow River from Cihaxia to Yangqu River section [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(1): 120-126.
- [36] 宋策, 周孝德, 辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河

道水温影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 421-428.

SONG Ce, ZHOU Xiaode, XIN Xiangwen. Evolution of the water temperature structure in Longyangxia Reservoir and its impact on the downstream river water temperature [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 421-428.

[37] 薛刚. 黄河上游大型水库水温数值模拟及下泄低温水研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

XUE Gang. Numerical Simulation of Water Temperature in Large Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River and research on the release of low-temperature water [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[38] 邹昊. 基于机器学习模型的龙羊峡水库水温分层结构模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

ZOU Hao. Study on the Simulation of Water Temperature Stratification Structure in Longyangxia Reservoir Based on Machine Learning Models

[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

[39] 郝好鑫, 杨霞, 杨梦斐, 等. 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 247-257.

HAO Haoxin, YANG Xia, YANG Mengfei, et al. The impact of the lower Jinsha River cascade reservoirs on water temperature and suitable spawning time for fish [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 247-257.

[40] 唐旺, 周孝德, 袁博. 不同类型水库对库区及河道水温的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 184-188.

TANG Wang, ZHOU Xiaode, YUAN Bo. The impact of different types of reservoirs on water temperature in the reservoir area and river channel [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 184-188.

(责任编辑 王璐)