

丹江口水库浪河库湾水环境改善的整流幕设计与应用

龙良红^{1,2,3}, 王博文², 黄宇波¹, 任玉峰³, 纪道斌², 马 骏⁴, 徐 慧⁵

(1. 中国长江三峡集团有限公司; 2. 水利部长江上中游水库群调度运行对河流生态系统影响要素野外科学观测研究站; 3. 中国长江电力股份有限公司; 4. 湖北工业大学土木建筑与环境学院; 5. 湖北三峡职业技术学院建筑工程学院)

摘要:为系统评估整流幕设计作为物理控藻方法在改善丹江口水库浪河库湾局部水流、热分层及区域水环境方面的作用,以丹江口水库浪河库湾为对象,利用现场试验与数值模拟方法,分析了不同整流幕方案对浪河库湾水动力及水温分层的影响。结果表明:浪河回水区末端分层异重流明显,上游入流低温水以底层顺坡异重流形式流出库湾,下游倒灌水体从中上层流向上游,为整流幕水力调控改善水温分层提供了有利条件;不同流量工况下整流幕对目标区域的水力调控效果显著,相比于表层整流幕,底层整流幕可增强垂向混合,幕布越高,流场越紊乱,垂向混合越强,水温分层减弱越明显;底层整流幕可增强局部水体混合,安装前后平均流速提升至 0.02 m/s,水温平均降低 1.6℃,表层叶绿素浓度降低约 30%。

关键词:整流幕;CE-QUAL-W2;水动力过程;水环境;丹江口水库

Design and application of flow straightening screen for water environment improvement in the Langhe Bay of Danjiangkou Reservoir//Long Lianghong^{1,2,3}, Wang Bowen², Huang Yubo¹, Ren Yufeng³, Ji Daobin², Ma Jun⁴, Xu Hui⁵(1. China Three Gorges Corporation; 2. Field Scientific Observation and Research Station on the Impacts of Reservoir Group Operation in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River on River Ecosystems, Ministry of Water Resources; 3. China Yangtze Power Co., Ltd.; 4. School of Civil Engineering Architecture and Environment, Hubei University of Technology; 5. School of Architecture Engineering, Hubei Three Gorges Polytechnic)

Abstract: To systematically evaluate the role of flow straightening screen as a physical algal control method in improving local water flow, thermal stratification, and regional water environment in reservoirs, a study was conducted on the Langhe Bay of Danjiangkou Reservoir. Using field experiments and numerical simulations, the effects of different flow deflection curtain schemes on hydrodynamics and water temperature stratification were analyzed. The results show that there is a significant stratification and density current at the end of the return water area of the Langhe River. The low-temperature water entering the upstream flows out of the bay in the form of bottom slope density current, while the downstream backflow water flows upstream from the middle and upper layers, providing favorable conditions for improving water temperature stratification through hydraulic regulation of the flow straightening screen. The hydraulic control effect of the flow straightening screen on the target area is significant under different flow conditions. Compared to the surface flow straightening screen, the bottom flow straightening screen can enhance vertical mixing. The higher the screen, the more turbulent the flow field, the stronger the vertical mixing, and the more obvious the weakening of water temperature stratification. The bottom flow straightening screen can enhance local water mixing, increase the average flow velocity by 0.02 m/s after installation, reduce the average water temperature by 1.6℃, and reduce the surface chlorophyll concentration by more than 30%.

Key words: flow straightening screen; CE-QUAL-W2; hydrodynamic process; water environment; Danjiangkou Reservoir

丹江口水库作为南水北调中线工程核心水源地,其水质安全直接关系到沿线城乡饮水供给与生态功能^[1-4]。浪河作为主要入库支流之一,其下游河库过渡区因复杂的水动力条件与水体热分层耦合用,长期面临藻华频发、水质超标等水环境问题^[5-6]。尤其在夏季上游低温来流与下游倒灌水体形成分层异重流,导致回水区流速普遍较低,稳定的热分层和富营养化为藻类水华暴发提供了有利条件^[7-8]。如

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52409096,52009066);湖北省自然科学基金项目(2024AFC010);遥感科学国家重点实验室开放基金项目(OFSLRSS202413);湖北三峡职业技术学院博士项目(2025ZX04)

作者简介:龙良红(1991—),男,副教授,博士,主要从事生态水利研究。E-mail:893310859@qq.com

通信作者:徐慧(1994—),女,讲师,博士,主要从事生态水利研究。E-mail:834291544@qq.com

何通过低生态干扰的工程手段优化水动力结构、抑制水华暴发,已成为支流库湾水环境治理的共性技术问题^[9]。

整流幕作为一种水动力调控技术,理论上可以通过改变局部流场结构、促进水体垂向混合,起到抑制藻类水华和改善水质的作用^[10],然而其在复杂水库环境中的实际应用仍面临多重挑战。①国内外关于利用整流幕防控水华的应用研究较少,缺乏对其作用机理的研究。根据整流幕布设水深的差异,整流幕可布设在表层、中层和底层^[11],依据其在河道布设位置的不同,可分为上游和下游整流幕。表层整流幕因具有直接拦截水面藻类的独特优势,在国内外已有一些研究成果和应用实践^[12-14];中层和底层整流幕的研究多限于数值模拟^[15-16]或模型试验^[17],实际应用报道较少。②因河库生境和水动力条件存在显著的时空异质性,导致整流幕的布设位置与高度需根据不同环境优化设计^[18]。Priyantha等^[19]在 Terauchi 水库基于一维 DYRESM 构建物理-生态耦合模型,研究了整流幕布对该水库水温分层、藻类水华和营养盐输移的影响,发现幕布高度与藻类浓度呈负相关关系。Lee 等^[15]在 Daechong 水库利用 CE-QUAL-W2 二维水动力模型,模拟了整流幕不同安装位置对藻类水华的控制效果,提出整流幕越靠近下游,控藻效果越明显。Chung 等^[20]利用 CE-QUAL-W2 二维水动力模型,通过对比干旱年和湿润年不同水文条件下的模拟结果,得出入流弗劳德数与整流幕控藻效果不呈线性关系,甚至在部分情况下整流幕的布设反而会促进藻类生长。③在复杂的水流背景下,整流幕的调控效果还受上游来流大小的影响。为系统评估整流幕布对水环境的影响,仍需进一步明晰不同布幕方案对流场与水温分层的影响,结合研究区域的水动力条件对其作用机理进行深入分析。

针对丹江口水库支流库湾普遍存在的热分层和藻类水华现象,本文聚焦浪河库湾水华敏感区^[21],基于夏季现场监测资料,构建浪河回水区末端立面二维水动力模型,研究不同上游来流条件下不同整流幕位置及高度对浪河库湾流场和水温特性的影响,并通过工程实践验证其在水环境改善方面的效果,以期为有效水质改善、防控水华提供技术支撑。

1 研究区概况与监测模拟方法

1.1 研究区域概况

丹江口水库流域位于 $32^{\circ}36'N \sim 33^{\circ}48'N$ 、 $110^{\circ}59'E \sim 110^{\circ}49'E$ 。浪河是丹江口水库的主要入库河流之一^[22],发源于盐池河镇红山峙,是汉江的一级支流,集水面积 381 km^2 ,全长 57.3 km ,平均坡降 5.6% 。其下游入丹江口水库处设有浪河口国控断面,位于浪河镇下游^[23]。在国控断面附近代表性水域布设 4 个监测点位(图 1):回水末端(S1)、国控断面上游 300 m 处(S2)、国控断面下游 500 m 处(S3)、浪河大桥断面(S4)。

1.2 现场监测方法

于 2023 年夏季在监测点位 S1~S4 布设声学多普勒流速剖面仪(Signature 1000 ADCP, Nortek, 挪威)或点式流速仪(ADV Vector, Nortek, 挪威)测定垂向剖面流速,用于分析库湾流场空间分布特征以及断面上游来流和下游倒灌水体的分层异重流特性。ADCP 流速剖面仪监测方式为沉底探头上视,利用三脚架将其固定在河床中泓线底部,应用平均流速模式(垂向网格单元 0.5 m ,采样间隔 10 min),盲区为 0.7 m ^[24],该部分由 ADV 数据补充^[25]。ADV 点式流速仪监测方法为将其沿水深方向间隔 1 m 下放至水底,每层停留 1 min 。2023 年 8 月 19 日在 S3 断面沿河道横断面整体布设底层整流幕(不透水垂直帷幕,宽 120 m ,高 2 m ,厚 1 mm)。在

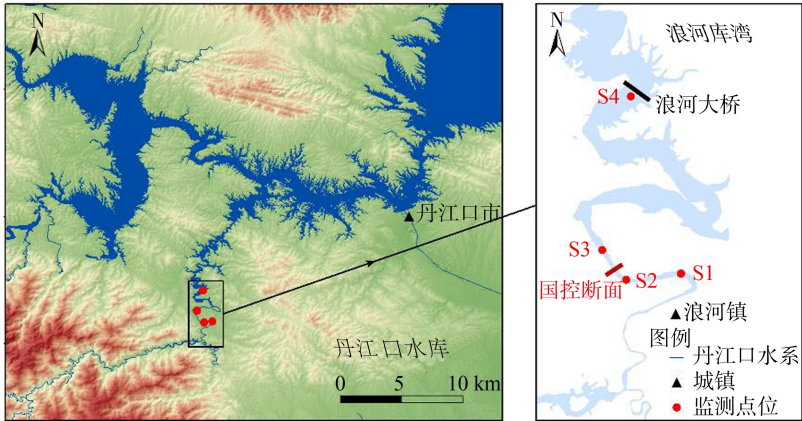


图 1 浪河库湾监测点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring sites in the Langhe Bay

8月15—22日于S2断面布设温度链(RBR-solo3-T,加拿大,精度 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$)监测剖面水温^[26],垂向分辨率0.5 m,监测频率1 Hz,时间分辨率10 min。S2断面处同步pH长时序数据由自动监测浮标(PH-W01-FB01)获取。

1.3 数值模拟方法

CE-QUAL-W2模型是由美国陆军工程兵团水道实验站(UASCE)开发、后经波特兰州立大学(PSU)改进的立面二维水流水质数值模型,主要用于模拟河湖、水库等水体水动力学和水质变化过程^[27]。该模型基于横向均匀流假设,采用纵向-垂向二维结构多层划分,能高效模拟水域的流场结构和水质输移过程,尤其适用于长而相对狭窄的、在纵向上和垂向上存在温度或浓度梯度的水体,而且作为二维模型,其在保证结果准确性的同时,也兼具更高的计算效率和可行性^[28]。丹江口水库浪河库湾为狭长深水型库湾,水体水温沿纵、垂向差异显著,横向变化较微弱,具有明显的立面二维特性,对其进行数值模拟时可忽略横向水流运动和水量交换对局部流场产生的影响,因此本研究选用该模型进行模拟分析。

2 水动力模型构建与验证

2.1 模型网格划分

根据网格划分原则,结合浪河国控断面附近3 km范围内地形条件,基于CE-QUAL-W2模型构建了浪河回水末端(0~3 km河段)的水动力-水温模型,共包括56个纵向河段和42层垂向网格,纵向网格长度50 m,垂向层厚0.2 m,共2 352个网格。模型网格划分见图2。

2.2 边界条件与初始条件

CE-QUAL-W2模型的边界条件主要包括上下游纵向边界、水体表面边界及河床底部边界^[29]。本文模型的上边界,即上游入流部分,采用流量和水温控制;下边界则采用水位和剖面水温进行约束。水体表面边界条件主要包括表面热量交换、太阳辐射

吸收、风应力、气体交换。经纬度、气温、风速和风向为气象站实测数据,露点温度通过实测气温和相对湿度折算而来,云量则由实际记录的日照小时数和当地当天的理论日照小时数来计算,气象条件输入时间间隔为1 h。底部采用无滑移边界,即河底法向边界和切向速度均为零,并忽略河床与库湾水体的热交换。

模型中给定的初始条件包括开始时间、结束时间、水体类型、入流、出流、水量、流速和水温。假定初始水位沿程不变,模型初始流速均设为零,入流条件主要为上游来水流量及来水水温,水体类型为淡水。由于上游断面水深较浅,故忽略水温分层状况,初始垂向水温所有计算单元以同一初值赋值,模型初始水温设置为30℃(8月15日观测平均值)。

2.3 参数率定

河流水动力学特征与水温分层特性受多重环境因素调控^[30],包括气象参数、出入流边界条件以及河道空间构型等。本研究基于2023年夏季8月浪河回水区实测流速、水温进行模型参数率定。模拟计算最大时间步长为3 600 s,最小时间步长为0.5 s,计算过程中自动调整适应计算的时间步长。模型主要参数取值见表1,湍流动能计算方法选择TKE模式,其他参数选取模型系统预设默认值。CE-QUAL-W2模型通过设置一系列控制参数来模拟环境变

表1 模型主要参数取值

Table 1 Main parameter values of model

水动力参数	变量名缩写	取值
纵向涡流黏滞系数(m^2/s)	AX	1.0
纵向涡流扩散系数(m^2/s)	DX	1.0
底部热交换系数($\text{W}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)	CBHE	0.3
沉积物温度($^{\circ}\text{C}$)	TSED	17.0
界面摩擦系数	FI	0.04
最大垂向涡流黏度(m^2/s)	AZMAX	1.0
水面太阳辐射吸收系数	BETA	0.45
纯水中太阳辐射消光系数	EXH ₂ O	0.45
风遮蔽系数	WSC	0.9
动态光遮蔽系数	Dynsh	0.7

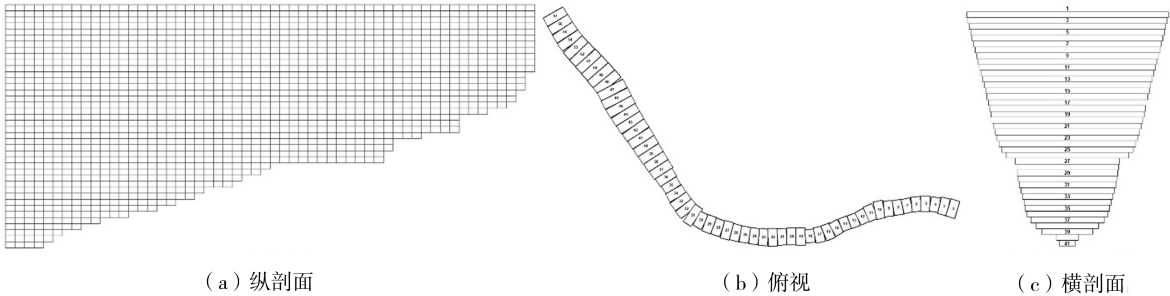


图2 模型网格划分

Fig.2 Model grid division

量^[31],其中纵向涡流黏滞系数与风遮蔽系数对流场结构具有直接控制作用,并进一步影响热能迁移与污染物扩散过程。水面太阳辐射吸收系数和纯水中太阳辐射消光系数可直接影响水温,并通过热力学反馈机制反向作用于水体的水动力条件。风遮蔽系数用于修正测点风速与河道实际风速的差异。动态光遮蔽系数用于考虑植被、地形阴影效应。沉积物温度设定为研究区域多年年平均气温。纵向涡流黏滞系数、纵向涡流扩散系数等不敏感参数采用模型默认值输入。

2023 年夏季 8 月 13 日浪河回水区上游重要断面流速与水温验证结果见图 3。由图 3 可知,虽然结果存在一定误差,但整体而言,垂向分布的模拟结果与实测结果趋势相同。对比垂向流速,S2 断面模拟结果较优,确定系数(R^2)为 0.86,平均绝对误差及均方根误差较小,分别在 0.004、0.005 m/s 以内;S3 断面模拟精度较差, R^2 为 0.54,最大平均绝对误差和均方根误差分别为 0.05、0.003 m/s,但整体而言,流速模拟结果在可接受范围内。对比垂向水温,S2 与 S3 断面 R^2 分别为 0.77、0.91,其中 S3 断面结果更优,其整体平均绝对误差和均方根误差均小于

0.7℃。模型流速、水温验证结果表明所建模型能够较好地反演浪河回水区上游河段断面的流场和水温变化,满足后续整流幕设计数值模拟研究。

3 结果与分析

3.1 浪河库湾水动力背景分析

观测时段内,浪河库湾重点监测断面水平流速和水温垂向分布见图 4,水平流速以下游流向上游为正。浪河大桥断面 S4 位于库湾中游,水流微弱($-0.01\sim 0.01$ m/s),近表层流速整体以正向水流为主。S3 断面呈现显著分层流态:底层 1 m 厚水体流速为负,中上层为逆向流($-0.03\sim 0.05$ m/s),平均流速为 0.02 m/s,极值达 0.09 m/s。S2 断面流态与 S3 断面类似,底层 1 m 厚水体流向下游,中上层为逆向流($-0.04\sim 0.05$ m/s),平均流速为 0.02 m/s,极值达 0.10 m/s。库湾上游回水区分层异向流特征最显著,上游来水以底层顺坡异重流形式下泄,下游丹江口干流从中上层倒灌入库湾。

从 S4 断面至回水末端 S1 断面,库湾水深由 17 m 递减至 2.7 m,水温范围为 22.04~33.61℃,表层平均温度为 33.02℃。S4 断面斜温层分布于 5~

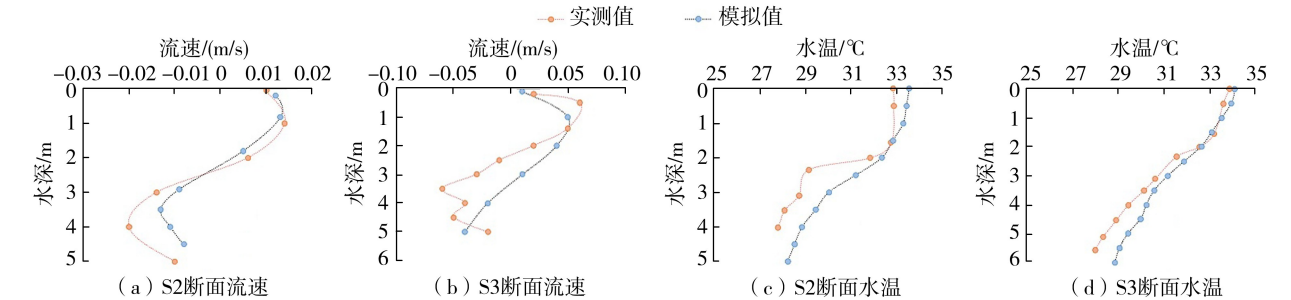


图 3 重要断面流速与水温验证结果

Fig. 3 Validation results of flow velocity and water temperature at key monitoring sections

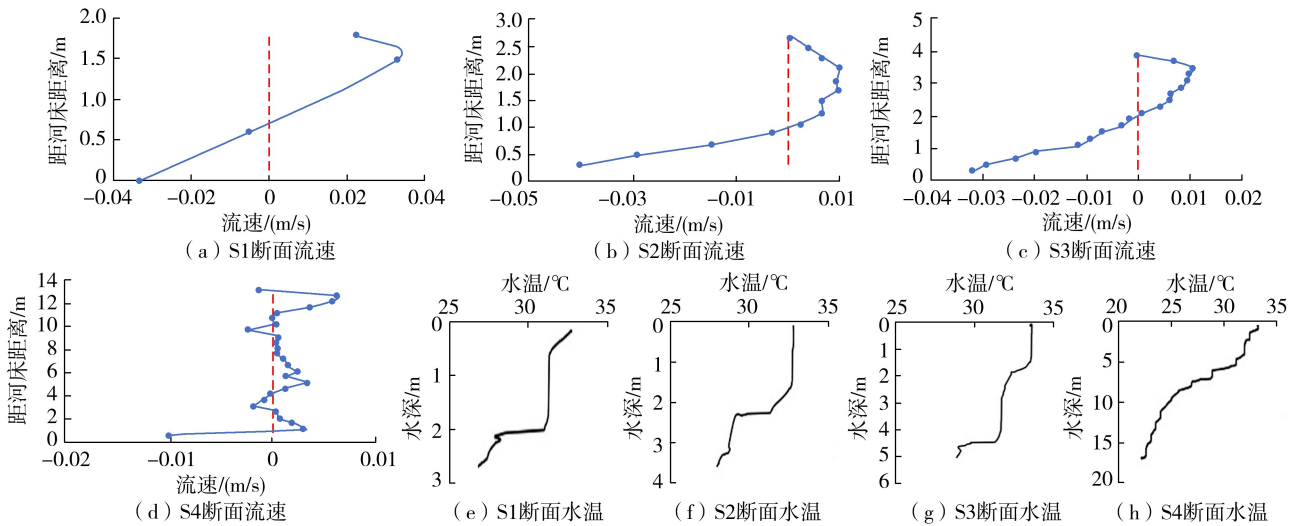


图 4 重点监测断面平均流速及水温垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of average flow velocity and temperature at key monitoring sections

16 m 水深区间, S3、S2 和 S1 断面水温分层显著。S3 和 S2 断面上层 1.80 m 内水温趋于混合, 平均温度分别为 33.00℃ 和 32.77℃。S3 至 S1 河段温跃层位于水深 1.80~2.20 m 处, 温跃层上下界面温差分别为 1.40、2.00 和 2.70℃。浪河库湾监测河段水温分层明显, 为水华暴发提供了有利条件。

3.2 整流幕设计与模拟效果分析

整流幕采用不透水垂直柔性帷幕, 材料为高强度聚乙烯 (HDPE) 防渗膜, 厚度为 1 mm, 具有良好的耐久性和抗水流冲击能力。表层整流幕布设于水面附近, 通过两岸牵绳或浮筒固定; 底层整流幕则布设于河床底部, 通过配重块固定在河床中, 不会随水流发生明显的运动和变形。整流幕布设示意图 5。

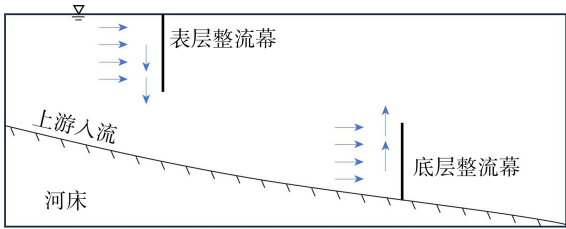


图 5 整流幕设计示意图

Fig. 5 Schematic diagram of flow straightening screen

为探究不同上游来水流量条件及整流幕参数 (位置和高度) 对国控断面附近水域水动力调控的效果, 基于浪河回水末端水动力-水温模型, 构建了多维度数值模拟方案: 包括对照组 (无整流幕)、上游区 (国控断面上游 500 m 处布设底层整流幕, S2 断面布设底层整流幕)、下游区 (S3 断面分别布设表层、底层整流幕), 并根据实际水深调整整流幕高度, 分析重要断面的流场、水温变化; 同时, 叠加不同上游来水流量工况, 分析不同入流变化对整流幕水力调控的影响。共设置 15 种工况, 最终形成包含位置-高度-流量三维度组合的模拟情景, 整流幕模拟工况设计见表 2。

3.2.1 不同入流条件下整流幕对水动力的影响

针对上游不同入流条件, 本文设置 0.25、1.0、3.0 m³/s 三级特征流量工况, 分别对应枯水期、平水

表 2 整流幕模拟工况设计					
Table 2 Simulation condition design of flow straightening screen					
工况	整流幕位置	形式	高度/m	上游来水流量/(m ³ /s)	
1~3				0.25, 1.0, 3.0	
4~6	S2 断面	底层	2	0.25, 1.0, 3.0	
7~9	S3 断面	表层	2	0.25, 1.0, 3.0	
10~12	国控断面上游 500 m	底层	1, 2, 3	1.0	
13~15	S3 断面	底层	1, 2, 3	1.0	

期及丰水期的典型入流条件, 开展数值模拟试验。不同入流条件下无整流幕工况时水温及流场模拟结果见图 6。分析可知, 受太阳辐射影响, 近表层水体水温较高, 达到 34~35℃, 底层水温在 28~29℃, 温跃层出现在分层流的界面附近。因上游来流水温较低, 以底层顺坡异重流的形式流向下游; 而下游丹江口水库水体从中层倒灌流向上游, 表层水体受风力和环流影响从上游流向下游, 回水区流速整体偏小, 在 0.05 m/s 以内。如图 6(b) 所示, 当上游来水流量增加时, 库湾水体整体上呈现 2 个环流过程。回水区水温分层明显增强, 国控断面处表底温差达到 5℃左右。上游来水流量继续增大时, 底层低温水流速增大, 低温水层厚度增加, 但表层水体受影响较小, 水体仍然处于明显分层状态。综合分析发现, 不同上游来水流量对模拟区域内的流场和水温影响主要集中于底层水域, 表层水体 (0~1 m) 水温仍然维持在较高的稳定状态。因分层异重流的存在, 仅增大浪河上游流量无法有效增强国控断面上层水体流动与混合。

在三级特征流量工况下, 分别于 S2 断面布设底层整流幕, S3 断面布设表层整流幕进行数值模拟, 整流幕高度为 2 m。由图 7 可见, 布设底层整流幕后, 上游低温水流以顺坡异重流形式向下传输时, 底层冷源被整流幕有效拦截。随着入流量从 0.25 m³/s 增至 3.0 m³/s, 整流幕上游底部低温水层厚度由 1.5 m 扩展至 3.0 m, 最低水温也由 29.4℃降低至 28.0℃, 同时在垂向掺混影响下, 中上层水体降温显现。整流幕下游区域流速随入流量增加逐步

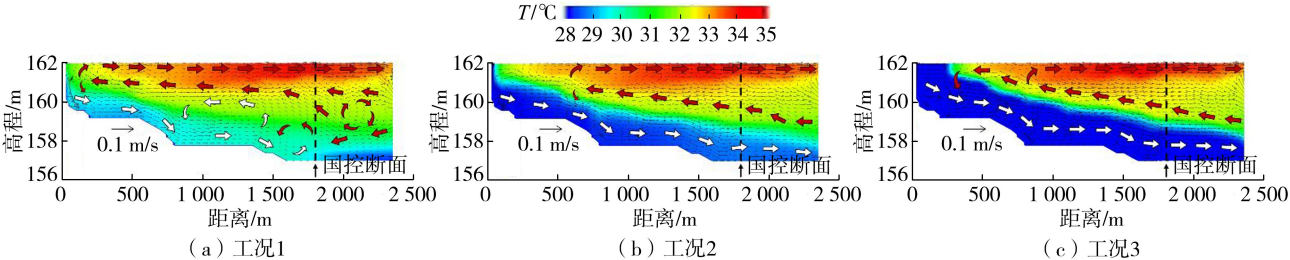


图 6 不同入流条件下无整流幕工况时水温及流场模拟结果

Fig. 6 Simulation results of water temperature and flow field under different inflow conditions without flow straightening screen

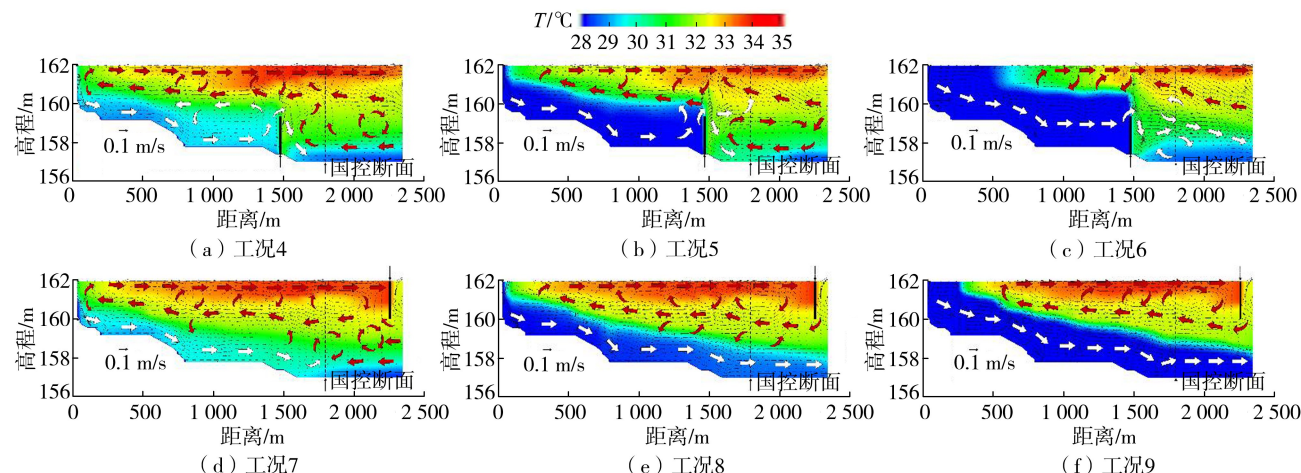


图7 不同入流条件下整流幕位置对水温 and 流场的影响

Fig.7 Influence of flow straightening screen position on water temperature and flow field under different inflow conditions

增大,水体混合增强,水温分层减弱,表层水温降幅达1.2~1.8℃(相对无幕工况)。如图7(d)、(f)所示,下游表层整流幕的布置阻碍了表层水体流动,使太阳辐射主导的热输入过程增强,表层水温始终处于33.0~34.0℃。不同入流条件下,下游表层整流幕工况对模拟区域内的流场、水温的影响仅局限于底层,上游流量越大,底层水体流速越大,底层水温越低且低温层厚度越大。综合分析可知,不同流量工况下,底层整流幕对目标区域的流场和热分层调控明显,表层整流幕对表层水体热分层影响较小。

3.2.2 不同整流幕位置及高度对水动力的影响

为探究不同底层整流幕位置及高度对流场和水温的影响,本文进一步模拟了底层整流幕不同高度(1、2、3 m)、不同位置(国控断面上游500 m与下游500 m处)对库尾水流、水温的影响,结果见图8。与图7(b)对比,上游低温来流到达底层整流幕之后,低温水被幕布阻隔,并在幕布上侧形成环流。整流

幕处河道相当于被束窄,断面流速显著增大,整流幕上游侧水体垂向混合增强,且整流幕越高,流场越紊乱,垂向混合越强,水温分层越弱,表层水温越低。整流幕下游侧水体环流模式和水温分层也发生明显变化,表层水体流速增大,下层水体形成多个环流。整体上,整流幕弱化了上下游800 m附近水域的水温分层,底层水温升高明显,表层水温有一定降低。分析可得,在所设三级幕布高度工况下,不同整流幕高度对下游水温分层的影响并不显著。

当底层整流幕设置在国控断面下游时,上游低温来水沿底流方向迁移受阻,垂向上形成逆时针环流。如图8(d)~(f)所示,当幕布高度逐级增加时,底部低温水层厚度同步增加。表层水体在垂向环流的影响下水温也明显降低,当整流幕高度增至3 m时,表层水温较无幕工况降低1.0~1.5℃。与下游表层布幕方案(图7(d)~(f))相比,底层整流幕对水温分层的调控优势更为明显。当幕高超过断面水

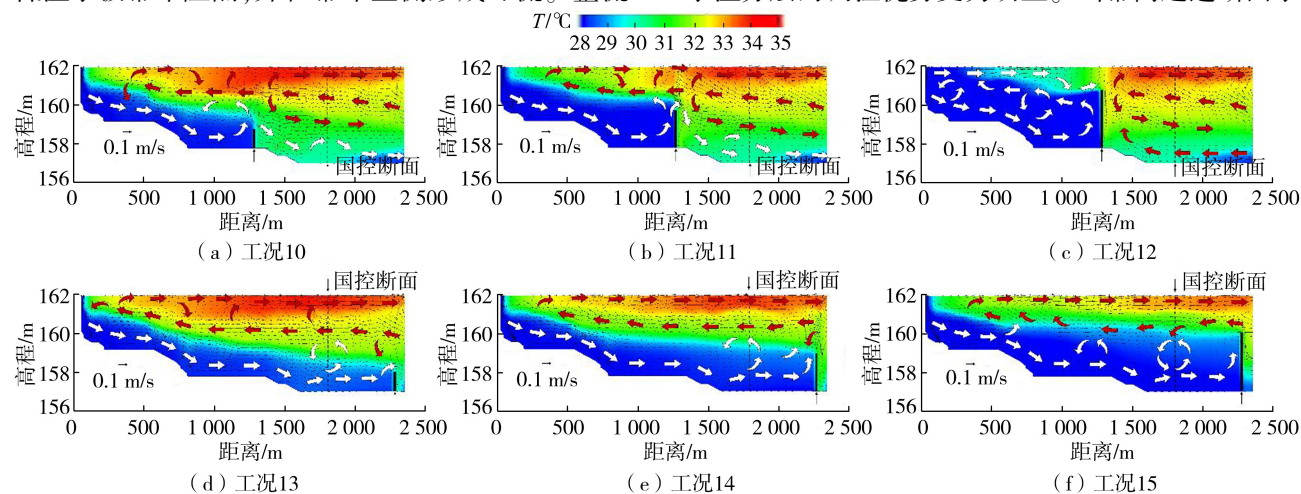


图8 国控断面上下游底层整流幕不同高度工况下水温及流场模拟结果

Fig.8 Simulation results of water temperature and flow field at different heights of flow straightening screen at upstream and downstream of national control section

深一半时,低温水滞留效率可提升约 30%,底层拦截引发的水体扰动可有效打破自然分层结构,而表层整流幕虽可起到抑制表层高温水体热输入及拦截表层藻华的作用,但是对于驱动水体垂向掺混效能相对较差。

3.3 整流幕安装与效果评估

基于上述数值模拟结果,本文综合考虑整流幕布设位置、幕布高度、现场整流幕安装施工条件,于 2023 年 8 月 19 日在国控断面下游 500 m 处(S3)沿河道横断面整体布设了底层整流幕,高度 2 m。图 9 为整流幕安装前后国控断面上下游附近剖面水平流速变化。监测结果表明,整流幕安装前后国控断面下游 300 m 处均表现出分层异向流,即上层水体倒灌流向上游,下层水体流向下游。相比而言,受底层整流幕影响,整流幕安装之后底部流速有所降低,中层变化不大,但上层水体流速有所增大,流向上游的倒灌水体流速增加到 0.02 m/s。国控断面上游 300 m 处趋势相同,但上层流速增加有所降低。

为评价整流幕对水环境的调控效果,于 2023 年 8 月 20—25 日定期开展了整流幕附近水域的水环境监测,监测结果见图 10。底层整流幕对水环境特征产生了一定影响,特别是底层 2 m 整流幕的附近水体。整流幕上侧水温比下侧低 0.5~1℃,下游侧水温分层明显减弱,pH 差异达到 0.2~0.5,DO 质量浓度差异在 0.2 mg/L 左右。此外,帷幕上侧浊度、电导率更高,而叶绿素的差异主要体现在上层水体,整流幕上侧叶绿素质量浓度偏低,降低约 30%。整体而言,整流幕安装之后,上游底层顺坡异重流被阻隔,底部冷水堆积,同时形成环流,加强水体的垂向混合,不利于藻类生长。

图 11 为 S2 断面剖面水温与 pH 分层变化过程实测结果,观测期间水温总体变化范围为 26.5~34.8℃,pH 在 6.9~10.3 波动。8 月 13—19 日近表层水体呈现显著热分层,分层强度最大值为 1.6℃/m,从 8 月 20 日开始,受底层整流幕的影响,国控断面附近水温分层逐渐减弱,底部低温水维持

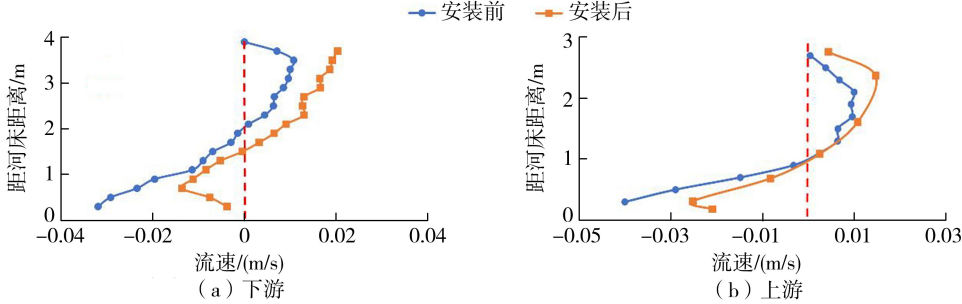


图 9 国控断面上下游附近剖面水平流速变化

Fig. 9 Changes in horizontal flow velocity in profiles near upstream and downstream of national control section

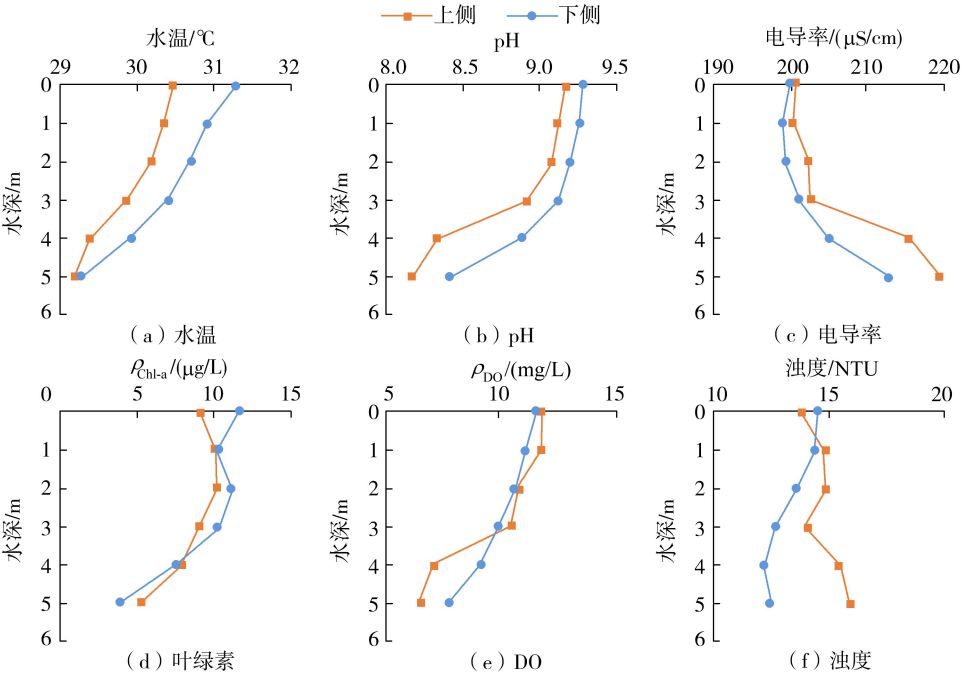


图 10 整流幕上下侧水环境特征对比

Fig. 10 Comparison of water environment characteristics at upper and lower sides of flow straightening screen

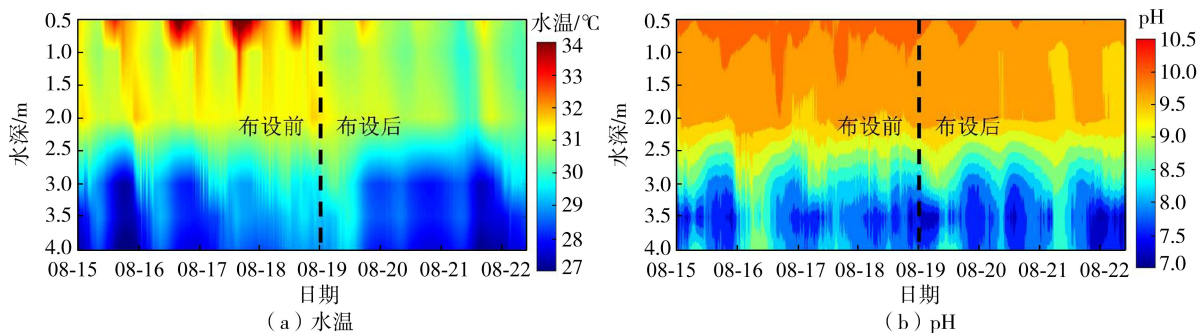


图 11 S2 断面剖面水温与 pH 分层变化过程实测结果

Fig. 11 Actual test results of layered change process of water temperature and pH value in S2 section profile

在 28℃ 左右,厚度有所增加。S2 断面 pH 总体表现为表层高于底层,如图 11(b) 所示。结合图 11(a) 水温变化分析可知,该断面 pH 变化与水温呈显著正相关。水温升高有助于蓝藻水华暴发,进而促进水体 pH 由中性转为碱性。从 8 月 20 日开始,水体混合增强,水温分层减弱,水华消退,使上层水体 pH 显著降低至 9.5 以下,表明通过改变水体流态与分层强度能有效改善水体 pH。安装整流幕之后,国控断面水温和 pH 分层出现了明显的下降趋势,水温平均降低 1.6℃,pH 平均降低 0.3。整流幕对国控断面水流、水温和水质的改善效果较为明显。

4 结 论

a. 浪河回水区存在明显的分层异重流和热分层现象,上游低温水体以底层顺坡流出库湾,下游倒灌水流从中上层逆向流动,为基于整流幕进行流场、水温调控提供了有利条件。

b. 整流幕对回水区末端流场和水温分布影响显著。底层整流幕可增强垂向混合,幕高越高,流场越紊乱,垂向混合越强,水温分层越弱,表层水温降低越明显。表层整流幕虽阻隔上层流动,形成局部环流,但对水温分层整体影响较小。

c. 通过安装底层整流幕可增强水体混合,平均流速提升至 0.02 m/s,水温平均降低 1.6℃,表层叶绿素质量浓度降低约 30%,pH 降低 0.3,整流幕能有效改善库湾局部水环境问题。

参考文献:

[1] 黄进,王伟,田野,等.南水北调中线工程水源区环境规制对经济高质量发展的影响[J].水资源保护,2024,40(4):148-156. (Huang Jin, Wang Wei, Tian Ye, et al. Impact of environmental regulations on high-quality economic development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 148-156. (in Chinese))

[2] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等.南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (Chen Xiaonan, Jin Yanguo, Xu Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (5): 46-55. (in Chinese))

[3] 田巍,陈庆伟,吴险峰,等.南水北调工程水质安全保障工作实践与对策建议[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(1):47-58. (Tian Wei, Chen Qingwei, Wu Xianfeng, et al. The practices and recommendations for water quality safety assurance in the South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23 (1): 47-58. (in Chinese))

[4] 刘付立,黄玄敏,潘璐,等.丹江口水库洪水期水质变化特征及影响因素分析[J].人民长江,2024,55(增刊2):33-37. (Liu Fuli, Huang Xuanmin, Pan Lu, et al. Characterization of water quality changes during flooding of Danjiangkou Reservoir and analysis of influencing factors [J]. Yangtze River, 2024, 55 (Sup2): 33-37. (in Chinese))

[5] 曹俊启,陈昱霖,杨涵,等.丹江口水库库湾水体营养状态评价[C]//2024中国水利学术大会论文集(第四分册).郑州:黄河水利出版社,2024:215-221.

[6] Xin Xiaokang, Zhang Hong, Lei Pei, et al. Algal blooms in the middle and lower Han River: characteristics, early warning and prevention [J]. Science of the Total Environment, 2020, 706: 135293.

[7] 张运林,蔡永久,彭凯,等.南水北调东线沿线湖泊生态环境面临的挑战与保护对策[J].湖泊科学,2024,36(5):1289-1302. (Zhang Yunlin, Cai Yongjiu, Peng Kai, et al. Challenges and protection strategies of ecological environment of lakes along the Eastern Route of the South to North Water Diversion Project [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36 (5): 1289-1302. (in Chinese))

[8] Piezer K, Li L, Jeon Y, et al. The application of potassium permanganate to treat cyanobacteria-laden water: a review [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021,

- 148;400-414.
- [9] 姚金忠,范向军,杨霞,等. 三峡库区重点支流库区水华现状、成因及防控对策[J]. 环境工程学报,2022,16(6): 2041-2048. (Yao Jinzhong, Fan Xiangjun, Yang Xia, et al. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(6): 2041-2048. (in Chinese))
- [10] 黄明海,刘凤丽,金峰. 水华发生过程水动力学控制方法探讨[C]//第八届全国环境与生态水力学学术研讨会论文集. 北京:中国水利学会,2008:339-345.
- [11] 啜明英,马骏,杨正健,等. 整流幕在防控水库水华中的应用研究综述[J]. 长江科学院院报,2018,35(10):15-20. (Chuo Mingying, Ma Jun, Yang Zhengjian, et al. Review on the application of curtain weirs to controlling algal blooms of reservoirs [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 15-20. (in Chinese))
- [12] Asaeda T, Priyantha D G N, Saitoh S, et al. A new technique for controlling algal blooms in the withdrawal zone of reservoirs using vertical curtains [J]. Ecological Engineering, 1996, 7(2): 95-104.
- [13] 黄苗,曹小欢. 大型水库局部藻华控制技术探讨[J]. 人民长江, 2009, 40(7): 27-29. (Huang Zhuo, Cao Xiaohuan. Discussion on algae bloom control in local area of large reservoir [J]. Yangtze River, 2009, 40(7): 27-29. (in Chinese))
- [14] 文刚,陈晓杰,刘艺凯,等. 水库水源周期性水质问题与近自然修复技术研究进展[J]. 环境工程, 2025, 43(3): 147-166. (Wen Gang, Chen Xiaojie, Liu Yikai, et al. Research progress on periodic water quality problems of reservoir water sources and near natural restoration technologies [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(3): 147-166. (in Chinese))
- [15] Lee H S, Chung S W, Choi J K, et al. Feasibility of curtain weir installation for water quality management in Daecheong Reservoir [J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 19(1/2/3): 164-172.
- [16] 朱木兰,陈飞勇,金峰,等. 水库甲藻水华与防治效果数值模拟[J]. 人民长江, 2007, 38(11): 157-159. (Zhu Mulan, Chen Feiyong, Jin Feng, et al. Numerical simulation of algal blooms in reservoirs and their control effects [J]. Yangtze River, 2007, 38(11): 157-159. (in Chinese))
- [17] Shammaa Y, Zhu D Z. Experimental study on selective withdrawal in a two-layer reservoir using a temperature-control curtain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(4): 234-246.
- [18] 啜明英,马骏,刘德富,等. 整流幕对香溪河库湾水温特性影响数值模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 2101-2113. (Chuo Mingying, Ma Jun, Liu Defu, et al. Numerical simulation of the influence of curtain weirs on characteristics of water temperature in Xiangxi Bay [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 2101-2113. (in Chinese))
- [19] Priyantha D G N, Asaeda T, Saitoh S, et al. Modelling effects of curtain method on algal blooming in reservoirs [J]. Ecological Modelling, 1997, 98(2/3): 89-104.
- [20] Chung S W, Lee H, Jung Y. The effect of hydrodynamic flow regimes on the algal bloom in a monomictic reservoir [J]. Water Science and Technology, 2008, 58(6): 1291-1298.
- [21] 秦蒙琳. 展开湖泊治理生动实践的美丽篇章[N]. 云南日报, 2024-10-24(008).
- [22] 孟江槐,肖尚斌,康满春,等. 丹江口水库浪河库湾夏季溶存 CH₄ 特征[J]. 中国环境科学, 2024, 44(11): 6302-6312. (Meng Jianghuai, Xiao Shangbin, Kang Manchun, et al. The characteristics of dissolved CH₄ in the Langhe Bay of the Danjiangkou Reservoir in summer [J]. China Environmental Science, 2024, 44(11): 6302-6312. (in Chinese))
- [23] 王有琴,郑杨,张波,等. 丹江口库区的生态补偿需求与机制[J]. 湖北理工学院学报, 2021, 37(6): 9-12. (Wang Youqin, Zheng Yang, Zhang Bo, et al. Ecological compensation demand and mechanism in Danjiangkou reservoir area [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2021, 37(6): 9-12. (in Chinese))
- [24] Muste M, Kim D, González-Castro J A. Near-transducer errors in ADCP measurements; experimental findings [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(5): 275-289.
- [25] 兰庭飞,吴昊,唐杰平,等. 基于新型高频声学多普勒流速剖面仪的河口近底部边界层观测初探[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 640-649. (Lan Tingfei, Wu Hao, Tang Jieping, et al. A preliminary study on in situ bottom boundary layer measurement near the seabed of estuaries by using a novel high-frequency Acoustic Doppler Current Profiler [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 640-649. (in Chinese))
- [26] Wang Jinxiu, Kong Fanzhou, Wang Yunfeng, et al. Newly recorded bloom-forming dinoflagellate *Gymnodinium impudicum* in Haizhou Bay, Yellow Sea, China [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(6): 2430-2445.
- [27] Tak Y H, Kim Y D, Chong S, et al. Analysis of water quality impact for water intake in Jinyang Reservoir using CE-QUAL-W2 [J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2015, 48(10): 857-868.
- [28] 卜英. 不同调度方案下三峡库区垂向二维水动力模型研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [29] 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. (Liu Youzhi, Xiang Jianfang, Chen

Wenfu, et al. Analysis of the water temperature evolution of long and narrow reservoir from impoundment to first operating period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11):1412-1422. (in Chinese))

[30] 肖洋,姚晨欣,张涛涛,等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11. (Xiao Yang, Yao Chenxin, Zhang Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))

[31] 任玉峰,胡光洋,杨中华,等. 溪洛渡水库分层取水对向家坝库区水温的影响分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 128-132. (Ren Yufeng, Hu Guangyang, Yang Zhonghua, et al. Analysis of effect of stratified water withdrawal in Xiluodu reservoir on water temperature in Xiangjiaba reservoir area [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4): 128-132. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-21 编辑:徐娟)

+++++

(上接第 190 页)

[24] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

[25] Anav A, Friedlingstein P, Beer C, et al. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: a review [J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(3): 785-818.

[26] Zhang Ke, Kimball J S, Running S W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation [J]. WIREs Water, 2016, 3(6): 834-853.

[27] Loveland T R, Belward A. The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover; first results [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3289-3295.

[28] Li Qingliang, Shi Gaosong, Wei Shangguan, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267-5286.

[29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

[30] Xu Haojie, Zhao Chuanyan, Wang Xinping. Spatiotemporal differentiation of the terrestrial gross primary production response to climate constraints in a dryland mountain ecosystem of northwestern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276-277: 107628.

[31] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 141-149. (Chen Yongzhe, Cui Yanhong, Zhang Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 141-149. (in Chinese))

[32] Kang Xiaoming, Hao Yanbin, Cui Xiaoyong, et al. Variability and changes in climate, phenology, and gross primary production of an alpine wetland ecosystem [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 391.

[33] Nie Chong, Huang Yuefei, Zhang Shuo, et al. Effects of soil water content on forest ecosystem water use efficiency through changes in transpiration/evapotranspiration ratio [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308: 108605.

[34] Zhang Jingting, Ren Wei, An Pingli, et al. Responses of crop water use efficiency to climate change and agronomic measures in the semiarid area of northern China [J]. PloS One, 2015, 10(9): e0137409.

[35] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.

[36] 焦珂伟,高江波,吴绍洪等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238. (Jiao Kewei, Gao Jiangbo, Wu Shaohong, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2229-2238. (in Chinese))

[37] Zhu Qian, Jiang Hong, Peng Chuanghui, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2414-2429.

(收稿日期:2025-03-14 编辑:施业)

