

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.013

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

龚轶青¹, 洪浩², 顾家丞², 毛劲乔¹, 张培培¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 中国长江电力股份有限公司)

摘要: 为了研究整流幕不同设置条件对河道型水库支流库湾水华关键驱动因子的影响,采用数值模拟方法,以三峡支流库湾香溪河为例,通过构建三维水动力和水温模型,模拟对比了整流幕设置前后以及不同设置位置和淹没水深条件下支流库湾流场和水温特性的变化特征。结果表明:整流幕对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的上层水体会出现水团混合现象,其上游侧的水温降低,同时水温分层现象减弱;整流幕不同设置位置条件下,支流库湾中层水体受整流幕影响较明显,其流速变化高于上层和下层水体,且整流幕设置位置越靠近库湾上游,对河口处水体流速的影响越显著,而整流幕对水温的影响效果则与设置位置关联性不大;整流幕断面的各层温差平均值随着淹没水深的增加而增大,且上层水温变幅最大,水温变化的水深范围也随淹没水深的增加而增大,可达到全垂向断面水温降低的效果。

关键词: 整流幕; 水库库湾; 流速; 水温; 设置位置; 淹没水深; 香溪河

Numerical simulation of response of flow velocity and water temperature in tributary bay of river-type reservoirs to installation of rectification curtains

Gong Yiqing¹, Hong Hao², Gu Jiacheng², Mao Jingqiao¹, Zhang Peipei¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University; 2. China Yangtze Power Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the impact of different installation conditions of rectification curtains on the crucial driving factors of algal blooms in the tributary bay of a river-type reservoir, numerical simulation methods were used. By taking the Xiangxi River, a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, as an example, a three-dimensional hydrodynamic and water temperature model was constructed to simulate and compare the changes in flow field and water temperature characteristics of the tributary bay under conditions before and after the installation of a rectification curtain, as well as under different installation positions and submerged depths. The results indicate that the rectification curtain has a significant blocking effect on water flow. Water mass mixing occurs at the upper layer at the section where the rectification curtain is installed, resulting in a decrease in water temperature on the upstream side and a reduction in water temperature stratification. Under different installation positions of the rectification curtain, the flow velocity in the middle layer of the water body changes more significantly as affected by the rectification curtain than that in the surface and the lower layers. Furthermore, when the rectification curtain is installed closer to the upstream of the tributary bay, the influence on flow velocity at the estuary is more significant. However, the effect of the rectification curtain on water temperature has little correlation with its installation position. The average temperature difference across different layers at the rectification curtain section increases with increasing submerged depth. The upper layer exhibits the largest water temperature variation. The depth range of water temperature change also expands with increasing submerged depth, ultimately achieving a reduction in water temperature across the entire vertical section.

Key words: rectification curtain; tributary bay of reservoir; flow velocity; water temperature; installation position; submerged depth; Xiangxi River

水利工程在发挥巨大综合效益的同时,其建设运行后可能带来的水生态环境问题也日益受到重视^[1-4]。与天然河道相比,水库支流库湾水动力特性复杂,可能出现水温分层现象,藻类物质也容易聚集在水体上层形成水华^[5-8]。水华暴发受到藻类本身生理特性、水体营养盐浓度、气象条件、水动力条件等诸多环境因素的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202602);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201103);中国长江电力股份有限公司科研项目(Z242302063)

作者简介: 龚轶青(1992—),男,助理研究员,博士,主要从事生态水力学研究。E-mail: yqgong@hhu.edu.cn

通信作者: 张培培(1990—),女,副教授,博士,主要从事水利工程生态效应与调控研究。E-mail: zhangpei@hhu.edu.cn

影响,其中水体的水动力特征和水温分层特性是水库支流库湾水华的关键驱动因子^[9-13]。整流幕是一种基于上层流场调控的物理控藻工程设施,通过改变局部水动力条件、水体混合及分层结构,可抑制藻类聚集和水华暴发,在大型水库库区水华防控中具有较强的应用前景。20 世纪 90 年代,Asaeda 等^[14-15]将整流幕应用于日本的 Terauchi 水库以解决水体富营养化问题,结果表明整流幕设置对水库的控藻效果较明显;而 Priyantha 等^[16]通过水库生态系统模型模拟研究证明,整流幕不同垂向淹没水深会影响下游区域的叶绿素浓度^[15]。另有研究发现,整流幕防控水华的能力受库区水动力条件影响,整流幕设置位置不同对水库水华的防控能力也不相同^[17-18]。近年来,整流幕防控水华方面的研究在国内也日益受到关注,关于整流幕治理甲藻水华的数值模型模拟研究表明,在水库设置整流幕后,水域内叶绿素浓度峰值较设置前明显下降^[19],这为防治淡水甲藻水华提供了新的思路^[20-21]。目前国内外对整流幕抑制库湾水华的作用机理了解仍不够系统和深入^[22],已有研究多侧重于通过数值模型对水库水质及水华状况进行模拟预测,而对整流幕影响下区域水动力条件、水温变化特征,以及不同设置参数对库湾水华抑制效果影响的研究仍相对不足^[23-25]。本文针对典型河道型水库支流库湾香溪河,探究整流幕影响下支流库湾水动力特征和水温分层结构的变化情况,以期为基于整流幕防控水华提供理论支撑和技术参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

香溪河是三峡水库湖北库区的最大支流,同时也是距离三峡大坝最近的一条支流(图 1),受三峡水库蓄泄调度影响较为明显。香溪河全长 97.3 km,河道宽度介于 180~400 m 之间,河口距三峡大坝 34.5 km,流域面积为 3 099 km²,属于山区季节性河流,年径流量为 19.56 亿 m³。2003 年三峡水库蓄水后,由于长江回流顶托作用,自香溪河河口至峡口镇形成库湾,回水区汛期最大流速在 0.13 m/s 以内,水流速度变慢,回水区的河流水文水动力状况发生明显改变。当支流库湾的过水面积变大时,库湾内的水体流速就会减缓,甚至处于准静止的状态,并且支流库湾与长江干流的水体交换能力也会随之减弱,再加上库湾沿岸分布着许多工矿企业(如黄磷厂),富磷泥沙随着地表径流流入水体,为库湾输送了丰富的营养盐,导致大量的营养盐在库湾中富集,导致水环境严重恶化。整流幕是河道型库湾水华防控的一种设施,适用于香溪河这类狭长型河流,尤其适用于水深较大、流速缓慢的河道、水库,对河宽无严格限制。整流幕可以根据水面水位变化垂向移动,也可以设置为不同的淹没水深(水面到整流幕底边的深度)。整流幕可以长期固定,也可以短期设置,在有通航要求的河段,还可以做成分段升降式,以减少对航运的影响。

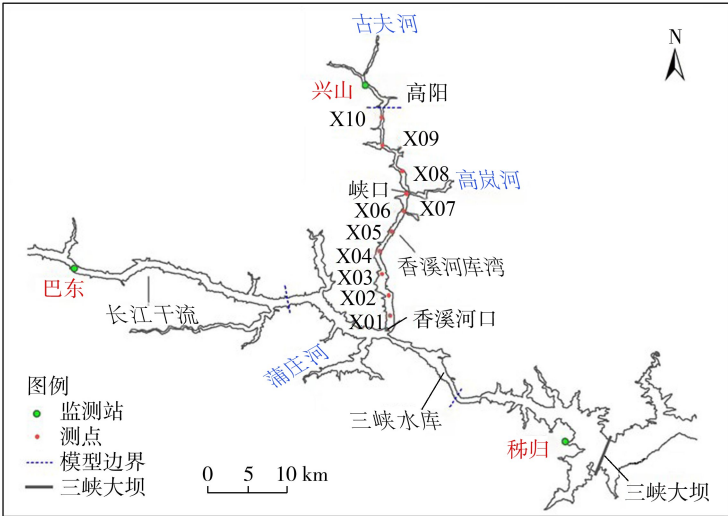


图 1 香溪河库湾位置及观测站点

Fig. 1 Location and observation stations of Xiangxi River reservoir bay

1.2 数学模型构建

1.2.1 区域网格与边界设置

本文所构建的三维水动力模型基于纳维-斯托克斯方程(N-S 方程),将水体视为不可压缩流体,引入

Boussinesq 假定,考虑温度的影响以及常温常压和重力场下的变密度流问题。瞬时参数包括压力和速度均满足 N-S 方程,将该瞬时参数分解为时间平均值和脉动值,基于 N-S 方程取时间平均后得到用均值表示的湍流运动方程式,即雷诺方程。水动力模型主要参数取值如下:水平涡黏系数为 $1\text{m}^2/\text{s}$,垂向涡黏系数为 $0.019\text{m}^2/\text{s}$,水平和垂向扩散系数均为 $0.00028\text{m}^2/\text{s}$,水体表面对太阳辐射的吸收率为 0.48 ,水体对太阳辐射的衰减系数为 0.42m^{-1} ,河床糙率为 0.024 ,水面风拖拽力系数为 $(0.49+0.536w)\times 10^{-3}$,其中 w 为水面风速。

在香溪河库湾三维水动力和水温模拟中,计算区域选取如下:①自上游高阳镇起到香溪河口为香溪河库湾段,总计算长度约 32km ,高岚河支流汇入以源项考虑;②考虑长江对香溪河的影响,自香溪河口口至上游共选取 24km 江段作为库区主流计算区域,具体见图 1。香溪河库湾及库区主流长江段的计算网格划分如图 2 所示,其中香溪河段网格数为 $415(\text{纵向})\times 9(\text{横向})$,顺水流方向的网格尺寸最小为 25m ,最大达 65m ,而垂直于水流方向的网格尺寸最小为 20m ,最大为 50m ;长江段网格数为 $321(\text{纵向})\times 9(\text{横向})$,顺水流方向的网格尺寸最小为 25m ,最大可达 120m ,垂直于水流方向的网格尺寸最小为 20m ,最大为 100m 。计算网格的正交系数范围在 $0.01\sim 0.05$ 之间。垂向上,香溪河库湾水动力模型分为 10 层,为了方便分析模型模拟结果,选取 10 个测点($X01\sim X10$)进行数据观测和分析。整流幕平面沿垂直于水流方向的计算网格线布置,即整流幕用与网格纵向重合的不透水层模拟。由于河道型水库是狭长形状,大多数情况下河道横断面的网格线近似为直线,而且整流幕一般采用柔性的不透水材料,因此也可以将整流幕设置为与横截面网格线一致。

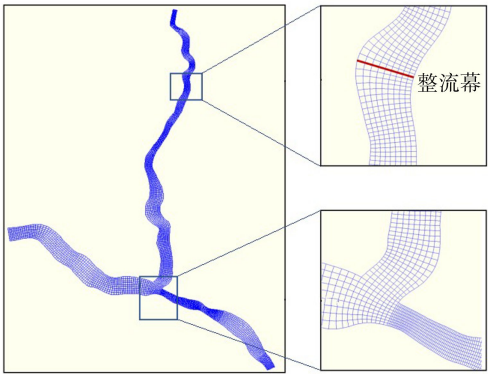


图 2 计算区域平面网格
Fig. 2 Planar grid of computational domain

香溪河和长江的上游入流选取流量边界、下游出流选取水位边界条件。水体自由表面考虑大气层的热交换和风引起的切应力。模型启动条件采用水温和水位的平均值,水温 12°C ,水位 170m 。为了尽量消除模型初始启动条件的影响,在流体力学模拟开始之前,使用从冷启动(零速度)开始的 30d 初步运行结果作为实际模型计算的初始条件。

1.2.2 模型率定与验证

1.2.2.1 水动力模型

香溪河库湾三维水动力模型的率定以 2005 年 2 月 22 日至 5 月 1 日香溪河口(即测点 $X0$)水位和平均流速的实测资料为基础,确定水动力模型的主要相关参数取值,并基于 2007 年 2 月 25 日至 5 月 1 日香溪河 $X0$ 测点的实测数据对水动力模型进行验证,结果如图 3 所示。可以看出,香溪河河口处的水位和流速模

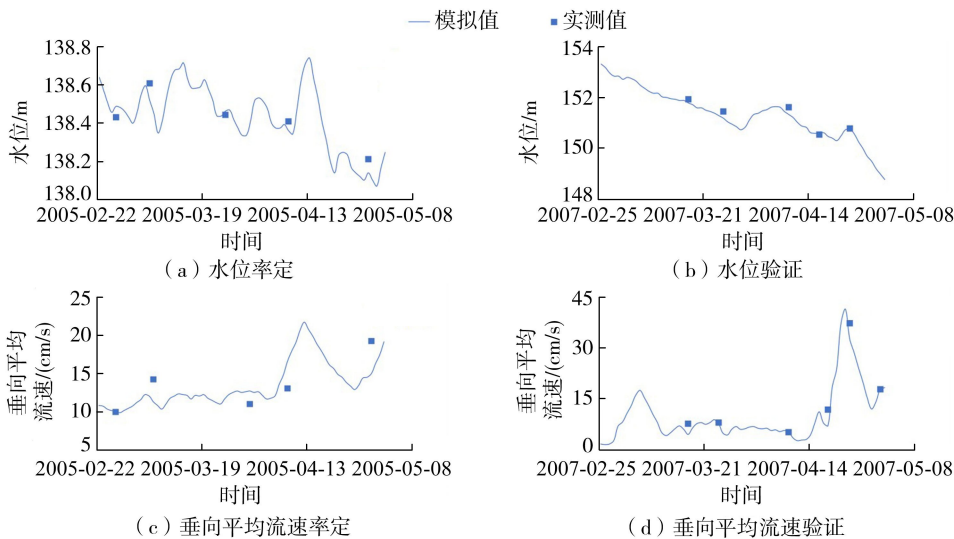


图 3 模型率定和验证结果

Fig. 3 Results of model calibration and validation

拟值与实测值基本一致,水位和流速随时间的变化趋势也相同,表明所构建的三维水动力模型可用于香溪河库湾水动力模拟研究。

香溪河库湾三维水动力模型模拟的 2009 年枯水补偿期(1 月 20 日)、汛前消落期(4 月 8 日)、汛期防洪期(7 月 5 日)和汛末蓄水期(10 月 8 日)等不同时期库湾深泓线的流速分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,整体而言,香溪河库湾的上层和下层水体流速大于中层水体流速,在三峡水库的汛前消落期和汛末蓄水期,由于三峡水库的水动力变化较为剧烈,香溪河与三峡水库交汇的河口处流速也较大。根据龙良红等^[2]对香溪河库湾水动力的研究,香溪河上游来流大多数时段以底部顺坡的形式流向干流,在三峡水库泄水期和蓄水期,干流倒灌水流从库湾中上层流向支流上游,而支流上游来流从下层以顺坡异重流的形式流向干流,存在显著的分层异重流现象,这也从另一个角度说明本文建立的三维水动力模型对香溪河库湾垂向流速模拟的合理性。

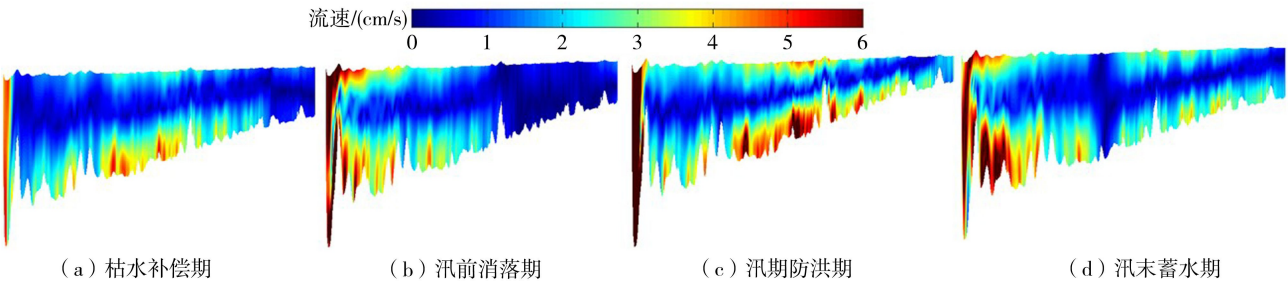


图 4 不同时期深泓线流速分布

Fig. 4 Flow velocity distribution along thalweg at different periods

1.2.2.2 水温模型

以 2007 年 4 月 1 日至 6 月 31 日香溪河库湾测点水温实测数据^[26]为基础,对比模型的上层水温分布和水温垂向分布的模拟结果。从图 5 可以看出,模拟水温与实测水温^[27]整体变化趋势一致,模拟结果可较为准确地捕捉到水温的变动过程以及上下层的水温差,尽管部分时段存在误差,但误差范围较小,可满足后续数值模拟计算需求。

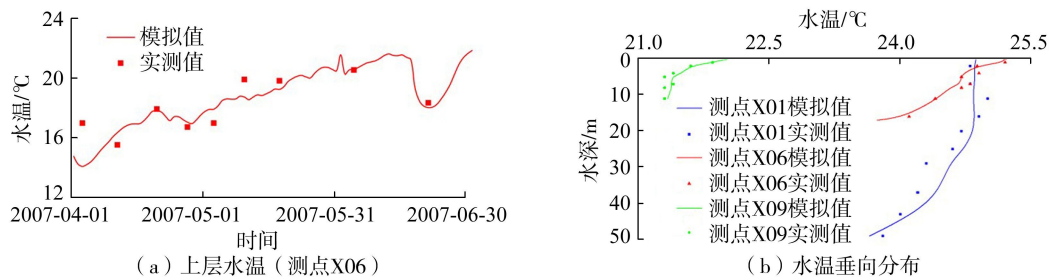


图 5 不同测点水温模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between simulated and measured water temperatures at different monitoring points

1.3 整流幕设置

为分析整流幕对香溪河库湾水动力和水温的影响,结合香溪河不同位置监测断面(图 1)的实测数据^[13]模拟分析不同整流幕设置条件下库湾水动力和水温条件的变化特征。如图 6 所示,整流幕垂直设置在水体上层,顶部与水面齐平,设置位置分别在香溪河库湾的下游测点 X02、中游测点 X04、上游测点 X08 处,在每一个监测断面处设置不同淹没水深的整流幕,分别为 1/10 河道水深(淹没水深 1)、2/10 河道水深(淹没水深 2)和 3/10 河道水深(淹没水深 3)。

2 整流幕设置位置的影响

2.1 对流场的影响

模型边界数据基于 2009 年 4 月 8 日的实测数据,整流幕设置前后及不同设置位置时香溪河库湾的流场计算结果如图 7(图中▼表示整流幕的设置位置)和图 8 所示,其中流速方向均以指向香溪河下游为正。可

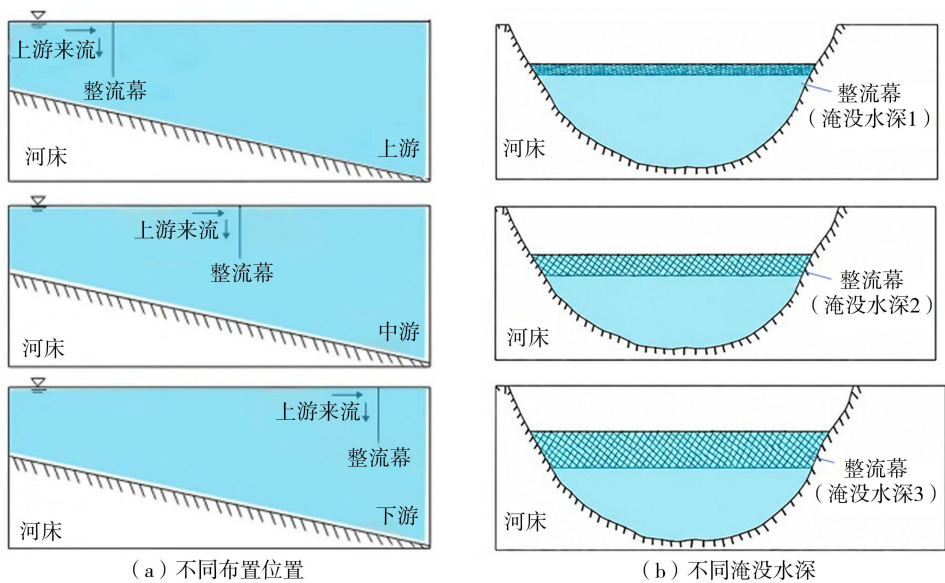


图 6 不同整流幕设置条件示意图

Fig. 6 Different installation conditions of rectification curtain

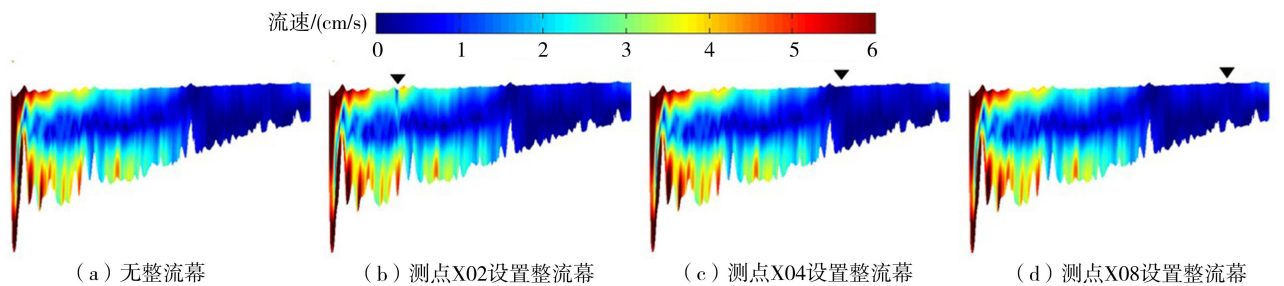


图 7 不同整流幕设置位置下深泓线流速分布

Fig. 7 Flow velocity distribution along thalweg under different installation positions of rectification curtain

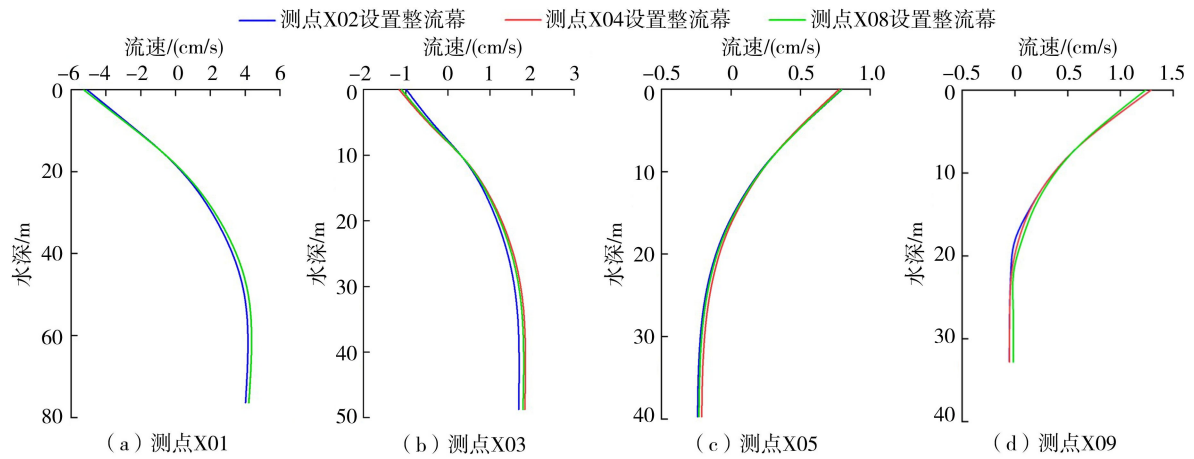


图 8 不同整流幕设置位置下的垂向流速分布

Fig. 8 Vertical flow velocity distribution under different installation positions of rectification curtain

以看出,香溪河库湾水体的流速受整流幕设置位置的影响不大,随着水深的增加,中层水体的流速逐渐增大,流速在中层水体达到最大值,沿程测点 X01、X03、X05 和 X09 的水体最大流速分别为 4.3、1.8、0.2、0.1 cm/s。香溪河库湾下层水体的流速与上层水体的流速一致,受整流幕的设置位置影响不大,并且整流幕设置位置越靠近上游区域,河口处的最大流速越大,水体掺混效果越明显。

分析其原因,未设置整流幕时,由于温度分层及分层异重流的存在,香溪河库区水体流速分布不均匀,且受长江干流的顶托作用,香溪河库湾形成一定范围的回水区,使得上游流速缓慢。设置整流幕后,由于上层

水体行泄通道被阻隔,整流幕断面处的水体流速显著降低。以 X02 断面为例,未设置整流幕时其上下游流速均大于 2 cm/s,而设置整流幕后,该断面处流速降低到基本静止状态。而整流幕以下,由于过流面积减小,水体流速相应增大,从而形成一段相对高速的流动区,局部流速最高可达到 5.1 cm/s。由图 7 可以看出,香溪河河口长江干流区域的水体从上层倒灌进入香溪河库湾,下层的水体从香溪河库湾流入长江干流;香溪河上游区域的水体通过上层流入再由下层水体回流,产生下层水体从进水口流出的现象,但其流速较小。结合香溪河库湾水体流场特点可知:①整流幕设置在下游测点 X02 处时,上层上游来流在整流幕断面附近流向下游,与低温水掺混;下游长江河口的倒灌水流在整流幕断面附近向上流动,与上层水体掺混后流回下游,部分水体则流向下游,与低温水掺混。②整流幕设置在中游测点 X04 处时,整流幕断面上游侧水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在整流幕断面附近向水体下层流动,并与下层水体掺混流向下游;整流幕下游侧来自长江河口的部分中层倒灌水流在整流幕断面附近向水体上层移动,并流回下游,整流幕下游侧上层倒灌水流向水体下层流动,并与下层上游来流掺混流向下游。③整流幕设置在上游测点 X08 处时,整流幕断面上、下游侧的水体上层均出现了水团混合现象,上游来流在整流幕附近向水体下层流动,而下游侧水流在整流幕附近向水体上层流动,最终流回下游。这样的流场特征使香溪河库湾上层和下层水体的流速在不同位置较为均匀,受整流幕的设置位置影响不大;而中层水体由于掺混作用流速增大,且随着水深的增加,水体掺混更为剧烈,流速逐渐增大。

综上所述,整流幕的设置对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在其断面附近流向下游,与低温水掺混,下游河口的倒灌水流或流向下游,与低温水掺混,或向上层流动,与上层水体掺混后再流回下游。整流幕设置位置对香溪河库湾水体流速影响不大,而设置位置越靠近香溪河上游区域对河口处水体流速影响越大。设置整流幕的 3 个典型断面中,X08 断面各层流速差平均值最大,即越靠近香溪河库湾上游,各层水体的流速变幅越大,水体掺混效果越明显,整流幕对水体流速的影响越显著。

2.2 对水温的影响

由图 9 和图 10 可以看出,设置整流幕后,整流幕断面上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时上游侧的水温分层现象减弱,分层水体深度较下游侧明显减小,甚至会出现水温分层消失的现象。香溪河库湾下游 X02 断面,上层水深 8 m 范围内水温有明显降低,断面各层温差平均值为 0.012℃,中游 X04 断面各层温差平均值为 0.024℃,上游 X08 断面各层温差平均值为 0.046℃。通过对比整流幕分别设置在香溪河库湾上、中、下游时不同水库调度时期沿程不同测点的水温垂向分布发现,不同整流幕设置位置时水体水温垂向分布基本相同(图 10)。这是因为设置整流幕后,水体上层水流在整流幕断面附近流向下游,与下层低温水掺混,使整流幕断面上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时上游侧的水温分层现象减弱甚至消失。由于是采用淹没水深 1 的整流幕比较整流幕设置位置的影响,整流幕淹没水深较小,对整个库湾水体的影响不大,所以除上层水体外其他各层的水温变化不大。而水体水温垂向分布与整流幕在库湾的设置位置关联性也不明显。

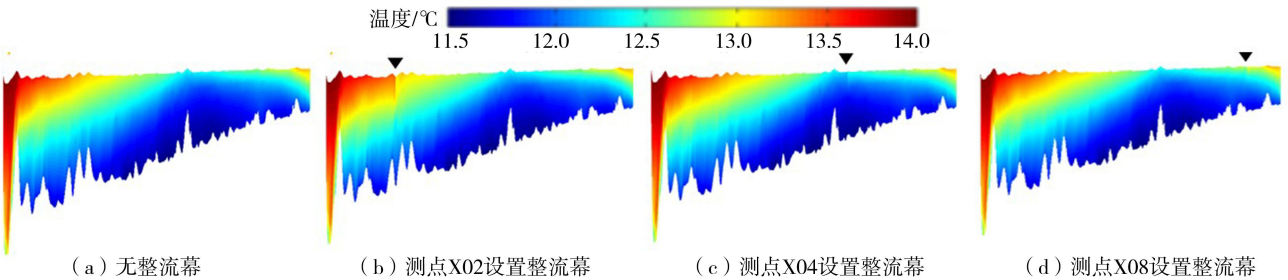


图 9 不同整流幕设置位置下深泓线上的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution along thalweg under different installation positions of rectification curtain

3 整流幕淹没水深的影响

3.1 对流场的影响

由图 11~13 可以看出,当整流幕设置在香溪河库湾下游(断面 X02 处)时,整流幕下游侧(测点 X01)由于香溪河河口处长江干流的水体从上层倒灌进入香溪河库湾,下层的水体从香溪河库湾流入长江干流,受到

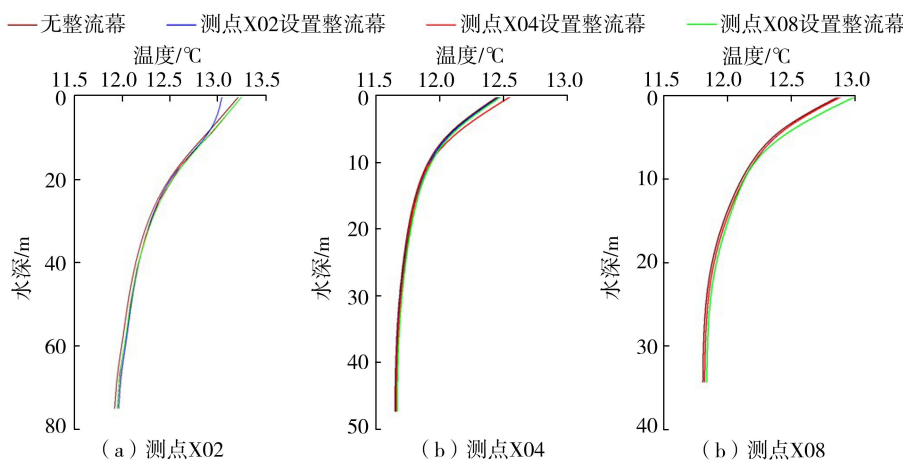


图 10 不同整流幕设置位置下的水温垂向分布

Fig. 10 Vertical water temperature distribution under different installation positions of rectification curtain

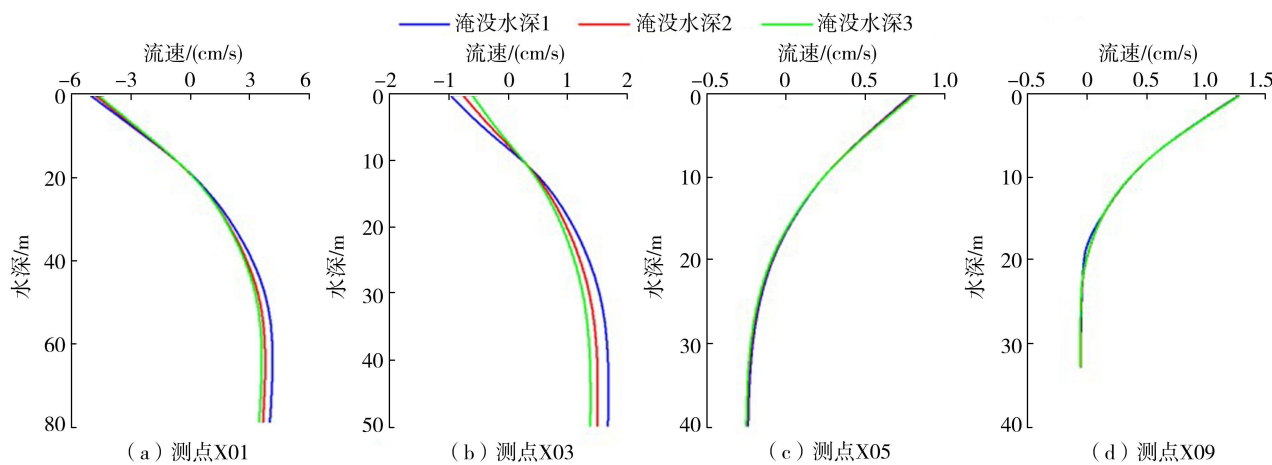


图 11 测点 X02 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 11 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X02 when rectification curtain is installed

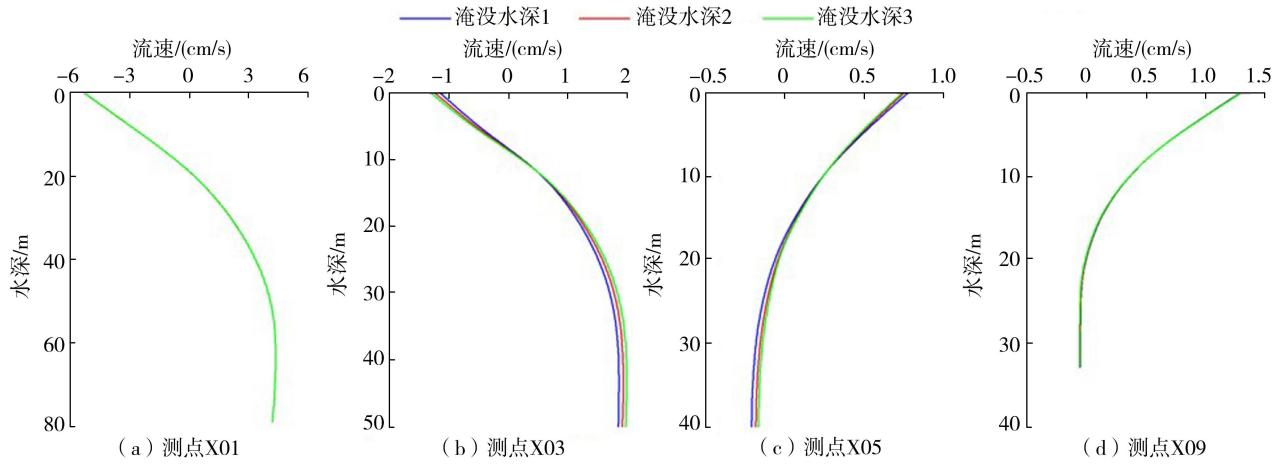


图 12 测点 X04 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 12 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X04 when rectification curtain is installed

整流幕的拦截,水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小;整流幕上游侧(测点 X05 和 X09)下层的水体直接从库湾上游流入长江干流,因此水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小。当整流幕设置在香溪河库湾中游(测点 X04 处)时,整流幕下游侧(测点 X03)水体流速随着整流幕淹没水深的增加而增大,整流幕上游侧(测点 X05)的水体流速则随着整流幕淹没水深的增加而减小。当整流幕设置在香溪河库湾上游(测点 X08 处)时,整流幕下游侧(测点 X05)水体垂向流速随着整流幕淹没水深的增加而增大;整流幕上游侧

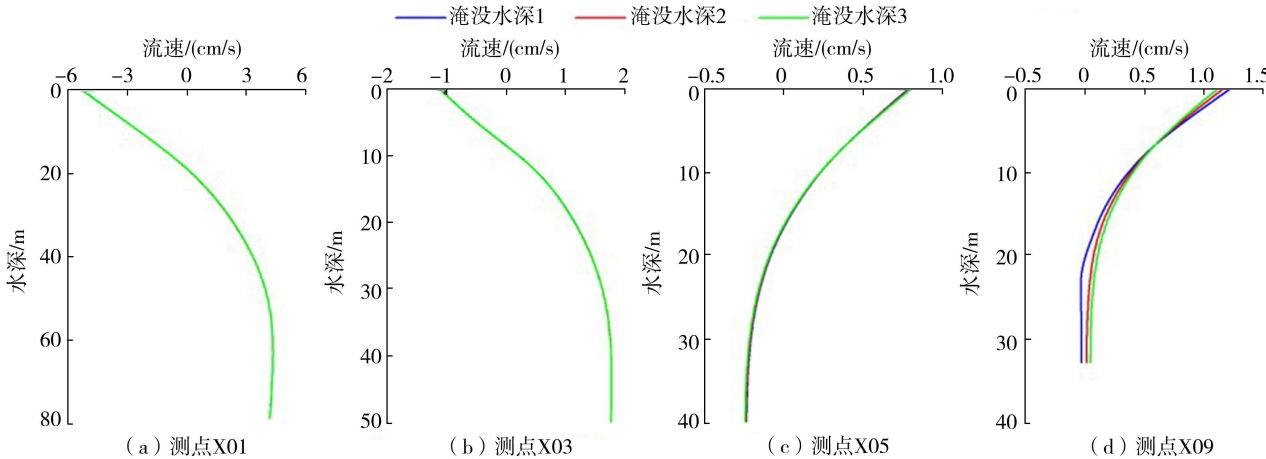


图 13 测点 X08 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 13 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X08 when rectification curtain is installed

(测点 X09) 上层的水体流速随整流幕淹没水深的增加而减小, 中下层的水体流速随着整流幕淹没水深的增加而增大。

3.2 对水温的影响

为更好地分析整流幕不同设置条件对香溪河库湾水温的影响, 模拟了整流幕不同设置位置和淹没深度下香溪河库湾水温的全年变化过程, 结果如图 14 所示。相比不设置整流幕的情况, 香溪河库湾下游测点 X02 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 230、278、228 d 水温降低, 均为汛前消落期(4—6 月)逐日温差平均值(整流幕设置前后每日水温变化的平均值)最大, 当设置淹没水深 1、2 的整流幕时, 汛末蓄水期(10—12 月)逐日温差平均值最小, 当设置淹没水深 3 的整流幕时, 枯水补偿期(1—3 月)逐日温差平均值最小。中游测点 X04 设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 303、325、327 d 水温降低, 均为汛期防洪期(7—9 月)逐日温差平均值最大, 汛末蓄水期最小。上游测点 X08 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 176、175、162 d 水温降低, 均为汛期防洪期逐日温差平均值最大、枯水补偿期最小。从不同条件下香溪河库湾逐日温差平均值可以看出, 相比不设置整流幕的情况, 整流幕设置位置越靠近香溪河库湾的上游, 逐日温差平均值越大, 整流幕对水温的影响越明显; 在同一个断面处, 整流幕淹没水深越大, 逐日温差平均值就越大, 并且汛前消落期和汛期防洪期整流幕对水温的影响较明显, 水温变幅较大, 尤其是汛期防洪期。

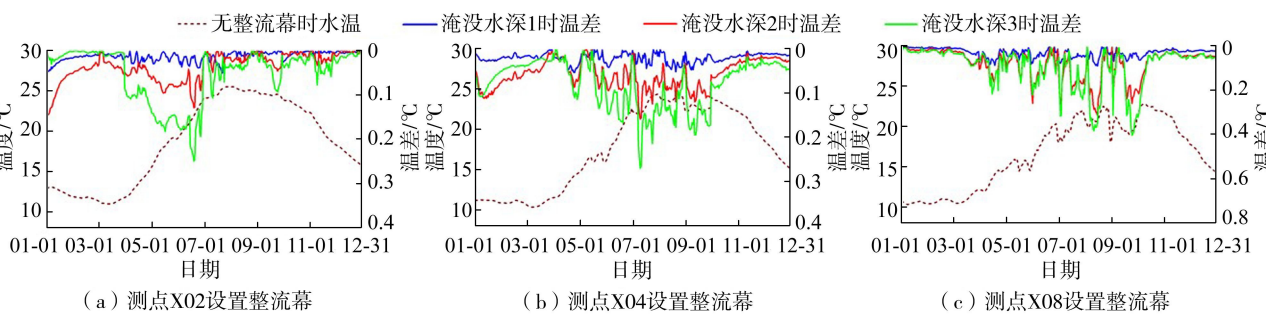


图 14 不同设置条件下香溪河库湾 2009 年水温变化过程

Fig. 14 Water temperature variation process of Xiangxi River reservoir bay in 2009 under different installation conditions

香溪河库湾下游测点 X02 设置淹没水深 1 的整流幕后, 全年降温时段集中在 1—3 月、8 月中下旬、9 月中下旬和 10—12 月; 设置淹没水深 2 的整流幕后, 全年降温时段集中在 1—9 月和 12 月; 设置淹没水深 3 的整流幕后, 全年降温时段集中在 2—3 月和 4 月中下旬至 9 月。中游测点 X04 设置整流幕后, 全年降温时段集中在 1—3 月和 5 月中下旬至 12 月。上游测点 X08 设置整流幕后, 全年降温时段集中在 7—12 月。整体来看, 设置整流幕后降温时段主要集中在汛前消落期和汛期防洪期。

选取 2009 年 7 月 5 日(汛期防洪期)为代表分析整流幕淹没水深对香溪河库湾水温垂向分布的影响, 结果如图 15 所示。相比不设置整流幕的情况, 香溪河库湾下游测点 X02 设置淹没水深 1 的整流幕时上层

6.8 m 水深范围内水温降低,设置淹没水深 2、3 的整流幕时上层 13.6 m 水深范围内水温降低,3 种整流幕淹没水深下断面各层温差平均值均在 0.01℃ 左右,均为上层 6 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.04、0.05、0.05℃;中游测点 X04 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕时上层 11.2、18.7、22.5 m 水深范围内水温降低,3 种整流幕淹没水深下断面各层温差平均值分别为 0.06、0.07、0.09℃,均为上层 4 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.23、0.31、0.37℃;上游测点 X08 在 3 种淹没水深下基本全断面降温,各层温差平均值分别为 0.07、0.25、0.38℃,均为上层 7 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.3、0.8、1.1℃。

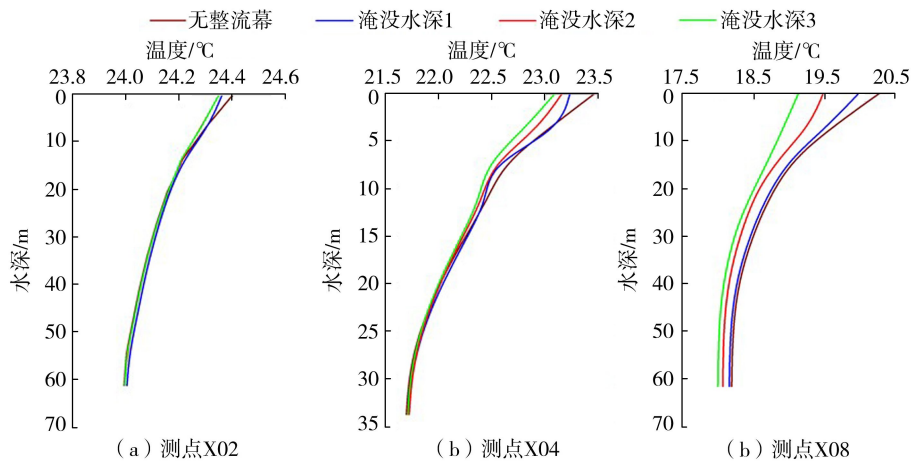


图 15 不同整流幕淹没水深下的水温垂向分布

Fig. 15 Vertical water temperature distribution at different submerged depths of rectification curtain

综上所述,整流幕对断面水温影响明显,整流幕淹没水深越深,断面各层温差平均值越大,除上层水温变幅较大外,中层和下层水温变幅基本相同,3 个典型观测断面中,上游测点 X08 断面各层温差平均值最大,即越靠近库湾上游,整流幕对水温的影响越明显。这是因为整流幕阻隔了上下游水体的流动,断面上层的水体向下层掺混,使上层高温水的温度降低,整流幕淹没水深越深,水体向下层流动的距离越远,掺混越剧烈,因而断面各层温差越大。上游断面由于水动力较弱,设置整流幕后增加了水体的垂向紊动,这一变化对于上游断面原先近似静止的水体影响可能就更为显著,因而越靠近库湾上游,整流幕对水温的影响越明显。

4 结 论

- a. 整流幕对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在其断面附近被迫流向下层,与低温水掺混,下游河口的倒灌水流或流向下层,与低温水掺混,或向上层流动,与上层水体掺混后再流回下游。整流幕设置后其上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时水温分层现象减弱,甚至会出现水温分层消失的现象。
- b. 整流幕设置位置对香溪河库湾中层水体影响较明显,其流速变化高于上层和下层水体,设置位置越靠近香溪河上游区域水体流速变化越大,并且其断面处各层平均流速差也越大。整流幕阻断了水体上层,使上层温度较高的水体与下层水体进行置换,整流幕的设置位置影响置换水体的体积和置换时间的长短,但对香溪河库湾的水温垂向分布特征影响较小。
- c. 随着整流幕淹没水深的增加,在整流幕设置断面的下游侧,由于整流幕减小了过水区域的面积,水体流速增大;在整流幕设置断面的上游侧,由于整流幕对水流的阻隔作用,水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小。整流幕断面的各层温差平均值随着淹没水深的增加而增大,且在汛期防洪期最明显,上层水温变幅最大,其他各层水温变幅大致相同。

参考文献:

[1] 戴会超,毛劲乔,蒋定国. 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):118-125. (Dai Huichao,Mao Jinqiao,Jiang Dingguo. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(5):118-125. (in Chinese))

[2] 龙良红,黄宇擎,徐慧,等. 近 20 年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究:回顾与展望[J]. 湖泊科学,2023,35(2):

383-397. (Long Lianghong, Huang Yubo, Xu Hui, et al. Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: review and prospect[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 383-397. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 尚淑丽, 顾正华, 曹晓萌. 水利工程生态环境效应研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 14-19. (Shang Shuli, Gu Zhenghua, Cao Xiaomeng. Review of research on ecological and environmental effects of water conservancy projects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 14-19. (in Chinese))

[5] Li Yuanyi, Sun Jian, Lin Binliang, et al. Thermal-hydrodynamic circulations and water fluxes in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124319.

[6] Long Lianghong, Chen Peng, Xu Hui, et al. Recent changes of the thermal structure in Three Gorges Reservoir, China and its impact on algal bloom in tributary bays[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109465.

[7] 徐慧, 龙良红, 纪道斌, 等. 三峡水库泄水-蓄水过程香溪河库湾水流振荡特性[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 264-273. (Xu Hui, Long Lianghong, Ji Daobin, et al. Study on characteristic of the flow oscillation in release and filling periods in the Xiangxi tributary of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 264-273. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 等. 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2694-2706. (Jin Xiaolong, Deng Xueliang, Dai Rui, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of algal blooms and its driving factors in Chaohu lake based on multi-source datasets[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2694-2706. (in Chinese))

[10] 胡莲, 郑志伟, 杨志, 等. 三峡水库小江回水区水华暴发期浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1025-1035. (Hu Lian, Zheng Zhiwei, Yang Zhi, et al. Community structure of phytoplankton in different water layers and its relationship with environmental factors during the period of algal bloom in Xiaojiang River backwater area of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(4): 1025-1035. (in Chinese))

[11] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1452-1464. (Wen Chengcheng, Huang Tinglin, Kong Changhao, et al. Analysis of mechanism and start-up thresholds of seasonal algal blooms in a northern eutrophic stratified reservoir[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1452-1464. (in Chinese))

[12] 田晶, 郭生练, 王俊, 等. 汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 196-203. (Tian Jing, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Identification and threshold analysis of key factors of algal bloom in middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 196-203. (in Chinese))

[13] 吴娟, 朱跃龙, 金松, 等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 542-551. (Wu Juan, Zhu Yuelong, Jin Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 542-551. (in Chinese))

[14] Asaeda T, Pham H S, Priyantha D G N, et al. Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: a numerical analysis[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(3): 395-404.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Chung S W, Lee H, Jung Y. The effect of hydrodynamic flow regimes on the algal bloom in a monomitic reservoir[J]. Water Science & Technology, 2008, 58(6): 1291-1298.

[18] Lee H S, Chung S W, Choi J K, et al. Feasibility of curtain weir installation for water quality management in Daechong Reservoir[J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 19(1/2/3): 164-172.

[19] 文刚, 王茹, 温成成, 等. 淡水甲藻水华形成原因及原位控制研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2239-2253. (Wen Gang, Wang Ru, Wen Chengcheng, et al. A review on the formation mechanism and in-situ control of freshwater dinoflagellate bloom[J]. China Environmental Science, 2023, 43(5): 2239-2253. (in Chinese))

proportion of power system[J]. Yangtze River,2025,56(S1):284-289. (in Chinese))

[10] 李斌,于富盛,郑旭,等. 高温下橡胶应力松弛行为对封隔器密封性能的影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2153-2159. (Li Bin,Yu Fusheng,Zheng Xu,et al. Effects of rubber stress relaxation on packer sealing performance at high temperature [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2020,37(5):2153-2159. (in Chinese))

[11] 李昕龙,原霞,王玉帅,等. 高速冲击下金属橡胶动态力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(3):265-273. (Li Xinlong,Yuan Xia,Wang Yushuai,et al. Research on dynamic mechanical properties of metal rubber under high-speed impact [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2024,45(3):265-273. (in Chinese))

[12] Zheng Xu,Li Bin,Fei Gensheng. Evaluation of sealing performance of a compression packer at high temperature[J]. Science Progress,2022,105(1):1-24.

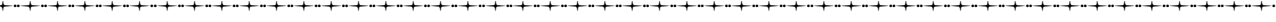
[13] 田宇. 压力容器吊装孔密封结构的泄漏机理研究与仿真分析[D]. 武汉:华中科技大学,2021.

[14] 陈凯杰,邱中辉,陈蔚芳,等. 丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立[J]. 热能动力工程,2024,39(8):183-192. (Chen Kaijie,Qiu Zhonghui,Chen Weifang,et al. Establishment of constitutive model of nitrile butadiene rubber over a wide strain rate range[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(8):183-192. (in Chinese))

[15] 宋义虎,李承宇. 橡胶复合材料的 Mullins 效应[J]. 工程塑料应用,2024,52(6):70-81. (Song Yihu,Li Chengyu. Mullins effect of rubber composites[J]. Engineering Plastics Applications,2024,52(6):70-81. (in Chinese))

[16] 王婷婷,吴尚,徐帅帅,等. 模拟研究橡胶的压缩永久变形[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2024,48(6):70-77. (Wang Tingting,Wu Shang,Xu Shuashuai,et al. Simulated study of compression permanent deformation of rubber[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition),2024,48(6):70-77. (in Chinese))

(收稿日期:2025-01-14 编辑:熊水斌)



(上接第110页)

[20] 黄茁,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))

[21] 张琪,缪荣丽,刘国祥,等. 淡水甲藻水华研究综述[J]. 水生生物学报,2012,36(2):352-360. (Zhang Qi,Miao Rongli,Liu Guoxiang,et al. The review of the studies on freshwater dinoflagellate bloom[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2012,36(2):352-360. (in Chinese))

[22] 邢领航,贺蔚,张健,等. 隔水幕分层取水研究进展及应用现状[J]. 长江科学院院报,2020,37(3):18-25. (Xing Linghang, He Wei,Zhang Jian,et al. Present research and application of temperature-control curtain in stratified reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(3):18-25. (in Chinese))

[23] 贺蔚. 深水水库隔水幕布改善出库水温效果及受力机理研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[24] 王鸿洋,杨霞,马骏,等. 三峡水库汛期中小洪水调度对支流水华的影响[J]. 水力发电学报,2021,40(7):61-72. (Wang Hongyang,Yang Xia,Ma Jun,et al. Influence of regulating small and medium floods on algal blooms in tributaries of Three Gorges Reservoir in flood season[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):61-72. (in Chinese))

[25] 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):2101-2112. (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):2101-2112. (in Chinese))

[26] 刘德富,黄钰铃,纪道斌,等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[27] 刘流. 三峡水库支流库湾水温分层及其对水华的影响[D]. 宜昌:三峡大学,2012.

(收稿日期:2025-01-03 编辑:熊水斌)