J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):2224-2236
DOI 10.18307/2025.0642
© 2025 by *Journal of Lake Sciences*

三峡水库水位波动对香溪河库湾温差异重流的影响*

郎　韵[1,3],王玲玲[2],韩丽娟[1,3],胡孜军[1,3]**
(1:太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024)
(2:河海大学水利水电学院,南京 210098)
(3:流域水资源协同利用山西省重点实验室,太原 030024)

摘　要: 支流库湾温差异重流特性是研究其水华生消机制的重要基础。干支流水体温差引起的密度差导致干流水体在春夏季、秋季、冬季分别通过中层、表层和底层异重流倒灌进入支流库湾。三峡水库正常运行每年要经历汛前消落期、汛期、汛后蓄水期和枯水期4个阶段,水位最大日变幅可达3.0 m/d。基于经率定验证的香溪河库湾三维水动力水温数学模型,通过对不同水位波动工况进行模拟分析,揭示了库湾温差异重流的变化特性。结果表明:随着水库水位上升,长江干流异重流的倒灌流速和倒灌厚度增大,上游来流异重流的潜入流速减小;随着水库水位下降,长江干流异重流的倒灌流速和倒灌厚度减小,而上游来流异重流的潜入流速增大。水位日升幅增大,长江干流异重流的倒灌距离也随之增大,但增幅较小;水位日降幅增大,长江干流异重流的倒灌距离显著减小,2.0 m/d的水位日降幅使得长江干流倒灌距离减少40%。水位周期性波动会引起库湾水流周期性运动。较高的水位波动频率(每6 h变动1.0 m)使得干支流水体在库湾中下游区域充分混合,降低水力停留时间,有利于限制藻类的生长和聚集。短时间(≤4 d)、小幅度(≤2.0 m/d)的水位波动难以改变库湾稳定的水温分层状态,温跃层平均深度基本不超过5.0 m。
关键词: 水位日变幅;周期性波动;温度分层;异重流;支流库湾;三峡水库

The impact of water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir on thermal density flow in the Xiangxi Bay*

Lang Yun[1,3], Wang Lingling[2], Han Lijuan[1,3] & Hu Zijun[1,3]**
(1: *College of Water Science and Engineering*, *Taiyuan University of Technology*, *Taiyuan* 030024, *P. R. China*)
(2: *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *P. R. China*)
(3: *Shanxi Key Laboratory of Collaborative Utilization of River Basin Water Resources*, *Taiyuan* 030024, *P. R. China*)

Abstract: The characteristics of thermal density flow in tributary reservoirs are an important basis for understanding the mechanism of algal blooms. The density difference caused by water temperature difference between the mainstream reservoir and the tributary bay leads the mainstream of the Yangtze River flow into the tributary bay via the middle layer in spring-summer, surface layer in autumn and bottom layer in winter. The normal operation of the Three Gorges Reservoir goes through four stages every year: pre-flood drawdown season, flood season, post-flood storage season and dry season, with maximum daily water level fluctuations reaching up to 3.0 m/d. Based on a calibrated and validated three-dimensional hydrodynamic and thermal model of Xiangxi Bay, we simulated various water level fluctuation scenarios to analyze the characteristics of thermal density flow. Results show that with the rising water level, the backflow velocity and backflow thickness of the mainstream of the Yangtze River increase, while the inflow velocity of the upstream decreases. With the water level drop, the backflow velocity and backflow thickness of the mainstream of the Yangtze River decrease, while the inflow velocity of the upstream increases. The greater the daily increase of water level, the greater the backflow distance of the density flow from the mainstream of the Yangtze River. The greater the daily decrease of water level, the smaller the backflow distance of the density flow from the mainstream of the Yangtze River. The maximum decline of the

* 2024-09-26收稿;2025-03-03收修改稿。
国家自然科学基金项目(52479062,52309086)、山西省基础研究计划项目(202303021212080,202303021212065)和山西省水利科学技术研究与推广项目(2023GM22)联合资助。
** 通信作者;E-mail:huzijun@tyut.edu.cn。

backflow distance from the mainstream of the Yangtze River reaches 40% with the daily water level decrease of 2.0 m/d. Cyclical water level fluctuation can cause cyclical water flow in tributary reservoirs. High-frequency fluctuations of water level (1.0 m every 6 hours) can induce completely mixing between the mainstream reservoir and the tributary bay in the middle and lower reaches, thereby reducing hydraulic residence time and limiting the algal growth and aggregation. Short-term (≤4 d) and small-amplitude (≤2.0 m/d) water level fluctuations are insufficient to disrupt the stable thermal stratification of Xiangxi Bay, where the average thermocline depth remains below 5.0 m.

Keywords: Water level daily variation; cyclical fluctuation; temperature stratification; density flow; tributary reservoirs; Three Gorges Reservoir

水库建成蓄水后,库区部分支流在干流回水顶托作用下形成库湾。与蓄水前的天然河道相比,支流库湾的水流速度减缓,垂向紊动扩散减弱,开始出现稳定的水温分层[1-2]。支流库湾同时受到干流水库倒灌和上游来流汇入的影响,使得其水力学特性更为复杂。大量现场观测表明:干支流水温差引起的密度差使得干流水体和上游来流以异重流的形式进入库湾,在库湾内形成季节性变化的分层异重流[3-5]。在春夏季,干流水温小于库湾表层水温但大于库湾底层水温,因此干流水体以中层异重流形式进入库湾;在秋季,干流水温小于库湾水温,因此干流水体以表层异重流形式进入库湾;在冬季,干流水温大于库湾水温,因此干流水体以底层异重流形式进入库湾;上游低温水下泄使得上游来流主要以底层异重流形式进入库湾[6-8]。已有研究普遍认为,温差异重流在水华生消过程中发挥了重要作用[9-10]。一方面,异重流影响下形成的深水区水温分层较弱、浅水区水温分层较强的分层状态,为水华暴发提供了有利的水动力条件[11-12];另一方面,异重流持续携带的营养盐为水华暴发提供了物质基础[13-14]。

针对支流库湾水华频发的现状,通过水库生态调度防控水华一直是研究的热点问题[15-17]。短期水库调度能加快水体交换,增大表层流速,从而抑制藻类生长并降低上层水体中的藻类浓度[18-19]。2019 年 7－8 月在三峡水库开展的水位“抬升—稳定—下降”调度实践,验证了水库调度控制支流库湾水华的可行性[20]。水库调度引起的水位变化将直接影响支流的河口水位,进而影响支流库湾温差异重流特性。关于水库水位波动对支流库湾影响的研究主要集中于水温分层强弱[21-23]和流速大小[24]的变化规律。而水温分层与流场之间的复杂相互作用[25]需要通过温差异重流变化特性进行表征,目前尚缺乏水位波动条件下香溪河库湾温差异重流变化规律的系统认识。

数值模拟是预测水位波动对支流库湾温差异重流影响的有效手段。以往的研究以一维[26-27]、平面二维[28]和立面二维[29-30]数值模型为主。而 Shi 等[31]研究发现,支流库湾与干流交汇区存在复杂的横断面漩涡,这表明支流库湾水动力过程具有明显的三维特征,有必要采用三维数值模型进行模拟[32-33]。

本文以三峡水库香溪河库湾为研究对象,通过库湾三维水动力水温数值模型模拟不同水位波动工况,探究支流库湾温差异重流对水位波动的响应规律,有助于理解水库调度如何通过影响库湾温差异重流进而控制支流水华生消,对改善库湾水环境有重要的理论意义和实用价值。

1 支流库湾三维水动力水温数值模型

香溪河库湾是长江干流上最靠近三峡大坝的较大支流,河口距离三峡大坝约 32 km,如图 1a 所示。三峡水库正常蓄水至 175 m 后,长江重庆至宜昌段的平均水力坡降仅为 0.000002[34],因此香溪河河口水位仅比坝前水位高出约 0.064 m。

1.1 计算区域及网格剖分

以香溪河整个回水区域为研究对象,上游边界为回水区末端,下游边界为香溪河与长江交汇口,即香溪河河口。采用 Delft3D 软件构建 z 坐标系下香溪河库湾三维水动力水温耦合数学模型。闭边界由地形高程 200 m 的等高线组成,计算区域地形均为实测值,如图 1b 所示。计算区域河段长约 38 km,分别在香溪河库湾下游、中游和上游取典型观测点,如图中 OP1、OP2、OP3 所示。

水平方向采用正交曲线坐标系,网格数为 192×25;垂向采用 z 坐标系,网格数为 92 层,如附图 I 所示。时间步长为 1 min。

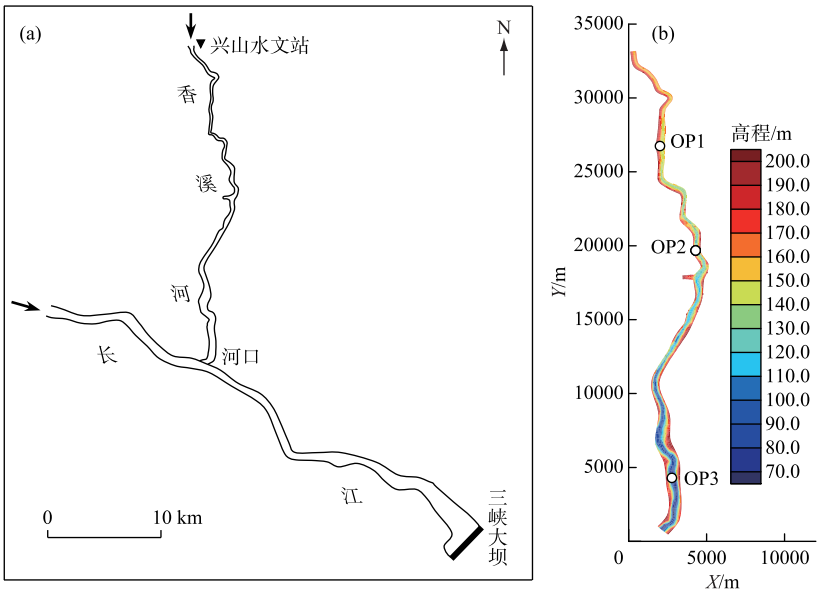


图 1 三峡水库香溪河库湾区位图(a);香溪河库湾计算区域(b)

Fig. 1 Location map of the Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir (a); Computational domain of the Xiangxi Bay (b)

1.2 初始条件及边界条件

根据 2009－2018 年《长江三峡工程生态与环境监测公报》[35],支流回水区水华主要发生在春季和秋季,选取香溪河库湾水温分层形成和发育的春季作为研究时段。春季也是三峡水库汛前消落期,水库水位逐步从正常蓄水位 175 m 降为枯期消落低水位 155 m。基于库湾稳定的水温分层状态,起始水位选取 155 m,对应的起始时刻为 2009 年 5 月 20 日。

上游边界位于兴山水文站附近,以兴山站实测流量作为上游边界条件;下游采用水位边界,近似等于三峡水库坝前水位。采用 Delft3D 的热通量模型[36]模拟香溪河库湾自由表面的热交换过程。近似认为香溪河库湾的气候与三峡库区基本一致,模拟时段主要气象参数取自三峡库区宜昌站实测值,其中风速为 1.3 m/s,风向为 45.0°,太阳辐射为 158.0 W/m^2,云量为 78.0%,气温为 21.0 ℃,相对湿度为 75.0%。水体和床面间的垂向扩散通量为零。

以兴山站实测水温作为上游水温边界条件,以香溪河河口采样点[3]的实测水温作为下游水温边界条件。采用 k-ε 紊流封闭模型来计算三维紊流。经率定,香溪河库湾三维水动力水温数值模型的主要计算参数为:粗糙高度 Z_0 = 0.15 m,风拖曳力系数[37] C_d = 1.255×10^{-3},背景水平涡粘系数 υ_H^{back} = 1.0 m^2/s,背景垂向涡粘系数 υ_V^{back} = 1.0×10^{-5} m^2/s,背景水平扩散系数 D_H^{back} = 0.1 m^2/s,背景垂向扩散系数 D_V^{back} = 1.0×10^{-5} m^2/s。典型观测点的垂向水温验证结果如附图 II 所示。

为研究不同水位波动工况对支流库湾温差异重流的影响,上游边界条件在模拟时段保持不变,等于起始时刻兴山水文站的实测值,即 47.96 m^3/s。同样地,水温边界条件也等于起始时刻对应的实测水温。香溪河库湾沿深泓线纵断面的初始流场和温度场如图 2 所示。由图可知,起始时刻香溪河库湾存在显著的温差异重流,温跃层位于库湾近表层,长江干流以中上层倒灌异重流的形式进入库湾,上游来流以底层潜入异重流的形式进入库湾并最终流出。

2 水位日变幅对库湾温差异重流的影响

2.1 计算工况

根据《三峡(正常运行期)——葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019 年修订版)[38],三峡水库蓄水最大

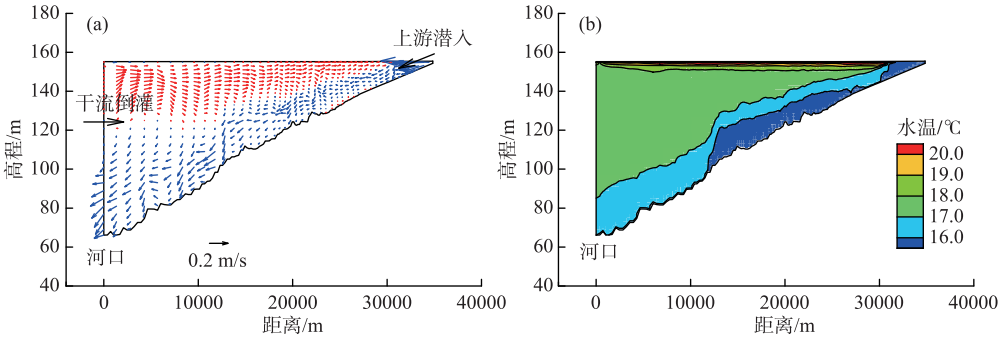


图 2 香溪河库湾沿深泓线纵断面初始流场(a)和温度场(b)

Fig. 2 The initial flow field (a) and temperature field (b) in longitudinal section of the Xiangxi Bay

速率不超过 3.0 m/d,一般情况下水位下降速率汛期不超过 2.0 m/d,消落期不超过 1.0 m/d。因此,水位日变幅选取 0.5、1.0 和 2.0 m/d。

为研究水位日变幅对香溪河库湾温差异重流的影响,以水库水位保持不变作为参照工况,拟定了 7 个计算工况,如图 3 所示。工况 1-0 水位日变幅为 0,表示水位保持不变;工况 1-1、1-2 和 1-3 分别为水位日升幅工况;工况 1-4、1-5 和 1-6 分别为水位日降幅工况。水位变化的持续时间为 3 d,对应的模拟时段为 2009 年 5 月 20—23 日。除水位以外的其他计算条件均保持不变。

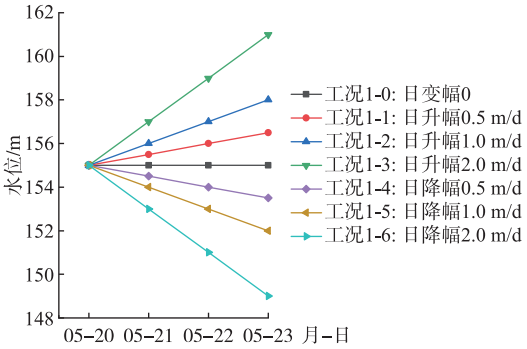


图 3 水位日变幅计算工况

Fig. 3 The calculation conditions of different water level daily variation

2.2 模拟结果

各工况下香溪河河口断面的流量随时间变化如图 4 所示。流量以流入库湾为正,流出库湾为负。在水库水位持续上升或持续下降过程中,河口断面流量随时间基本保持不变。水库水位日升幅越大,流入库湾的流量越大;水库水位日降幅越大,流出库湾的流量越大(图 4)。

水库水位持续变化 3 天后,各工况下香溪河库湾沿深泓线纵断面流场图见图 5。当水库水位上升时,长江干流异重流的倒灌流速增大,倒灌厚度也增大;上游来流异重流的潜入流速减小,潜入厚度基本不变(图 5)。当水库水位下降时,长江干流异重流的倒灌流速减小,倒灌厚度也减小;上游来流异重流的潜入流速增大。从支流库湾营养盐补给[14]的角度来看,水位持续下降有利于减少长江干流营养盐倒灌,并加快上游来流营养盐流出,从而限制藻类生长。

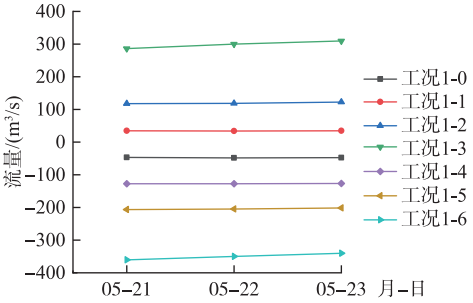


图 4 水位日变幅工况下香溪河河口断面流量

Fig. 4 The flow discharges of the Xiangxi Estuary under water level daily variation conditions

统计各工况下香溪河库湾长江干流异重流的倒灌距离和上游来流异重流的潜入距离,如表 1 所示。由表可知,长江干流异重流的倒灌距离随水库水位上升而增大,随水库水位下降而减小。以水位保持不变的工况作为参照,2.0 m 以内的水位日升幅引起长江干流异重流倒灌距离的增幅基本不超过 10%,而 2.0 m 以内的水位日降幅引起长江干流异重流倒灌距离的最大降幅接近 40%。上游来流异重流的潜入距离始终等

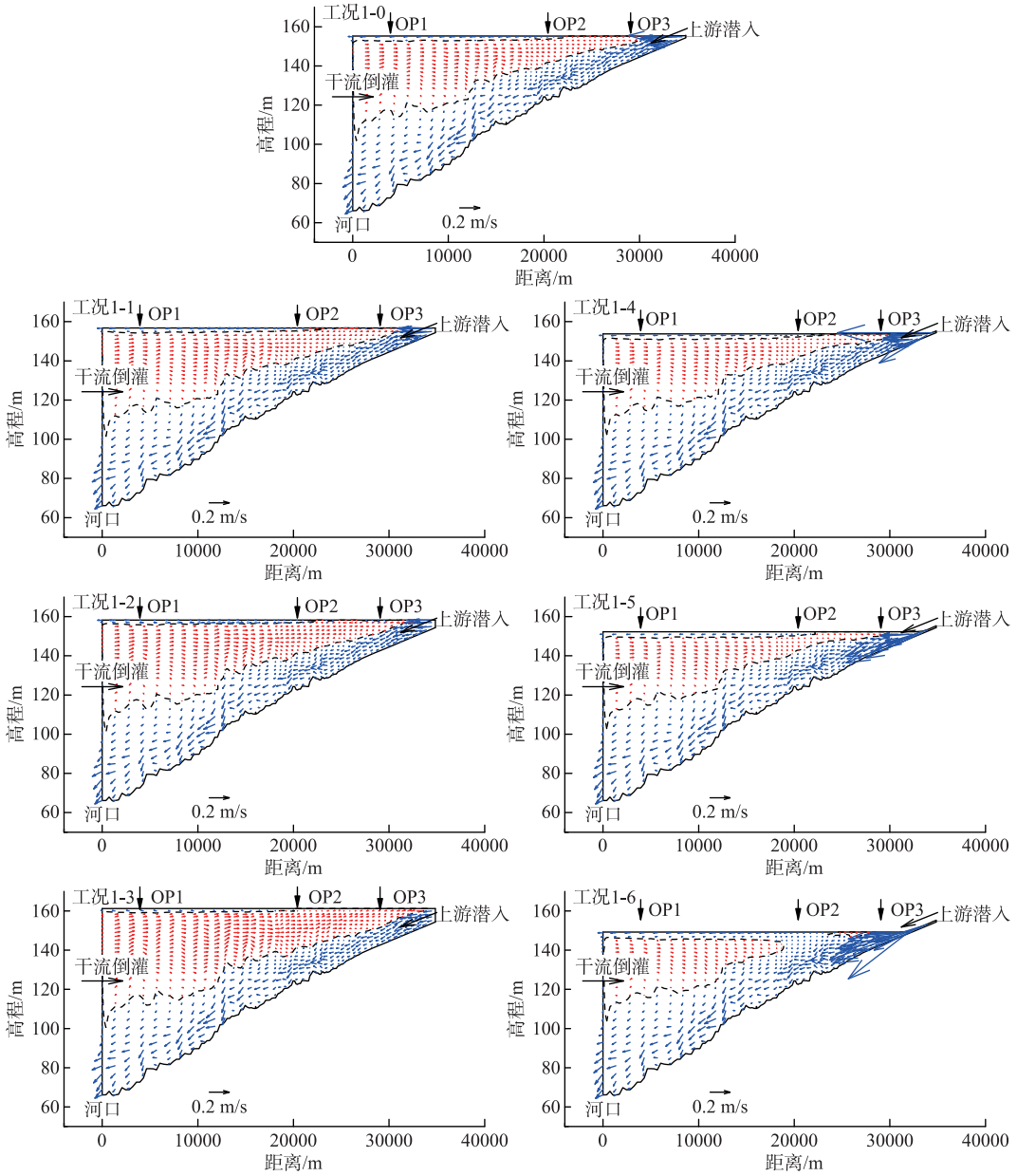


图 5 水位日变幅工况库湾沿深泓线纵断面流场图

(红色矢量表示长江干流倒灌异重流,蓝色矢量表示上游来流潜入异重流,矢量长度表示流速大小。黑色虚线表示长江干流倒灌异重流和上游来流潜入异重流的分界面)

Fig. 5 The flow field in longitudinal section of the Xiangxi Bay under water level daily variation conditions (The red vectors represent the backflow of the main stream of the Yangtze River, the blue vectors represent the upstream inflow of the Xiangxi Bay. The length of the vectors indicates the flow velocity. The black dotted line marks the interface between the backflow of the main stream of the Yangtze River and the upstream inflow of the Xiangxi Bay)

于库湾的纵向长度,不受水库水位变化的影响。总的来说,水库水位变动对香溪河库湾异重流的影响主要体现在长江干流倒灌异重流。

水库水位持续变化 3 d 后,各工况下香溪河库湾沿深泓线纵断面温度场如图 6 所示。由图可知,香溪河库湾存在稳定的垂向水温分层结构,表层水体受太阳热辐射作用,形成了表层温跃层;底层水体受上游低温来水的影响,始终保持较低水温。因此,水库水位变动对垂向水温分布的影响主要体现在中层水体,而表层和底层的水温基本保持不变。当水库水位上升时,中层水体厚度增大;当水库水位下降时,中层水体厚度减小,甚至出现均温分布(如工况 1-6 的库湾上游观测点 OP3)。

将垂向温度梯度≥0.2 ℃/m 的水层称为温跃层[39]。温跃层平均深度是指温跃层中心线所在深度,即温跃层顶面水深和底面水深的平均值。统计各工况下香溪河库湾典型观测点的温跃层平均深度如表 2 所示。下游观测点 OP1 的温跃层平均深度随水库水位上升而减小,随水库水位下降而增大;上游观测点 OP3 的温跃层平均深度随水库水位上升而增大,随水库水位下降而减小(表 2)。这是因为随水库水位上升过程,流入库湾的流量增大(图 4),即长江干流从中层倒灌的流量增大,这使得下游区域中层水体厚度增大,表层和底层水体厚度减小,因此下游观测点 OP1 位于表层的温跃层平均深度也有所减小;受水库水位上升的影响,上游区域的水体深度明显增大,而上游来流从底层潜入库湾的水体厚度基本不变,因此上游观测点 OP3 中上层水体厚度增大,即位于表层的温跃层平均深度也有所增大。中游观测点 OP2 的温跃层平均深度介于 OP1 和 OP3 之间。总体上,2.0 m 以内的水库水位日变幅对香溪河库湾水温分层结构的影响较小。温跃层始终位于库湾表层,温跃层平均深度基本不超过 5.0 m。

表 1 水位日变幅工况库湾温差异重流的倒灌(潜入)距离

Tab. 1 The backflow and inflow distance of thermal density flow under water level daily variation conditions

计算工况	长江倒灌距离/km	上游潜入距离/km
工况 1-0	31.0	37.0
工况 1-1	31.7	37.0
工况 1-2	32.4	37.0
工况 1-3	34.2	37.0
工况 1-4	30.6	37.0
工况 1-5	30.0	37.0
工况 1-6	18.9	37.0

表 2 不同计算工况香溪河库湾典型观测点的温跃层平均深度*

Tab. 2 The average depth of thermocline at typical observation points in the Xiangxi Bay under different calculation conditions

计算工况	温跃层平均深度/m		
	OP1	OP2	OP3
工况 1-0	1.87	2.44	3.89
工况 1-1	1.82	2.57	4.67
工况 1-2	1.74	2.24	5.33
工况 1-3	1.60	2.46	6.69
工况 1-4	1.87	2.33	3.17
工况 1-5	1.95	2.34	2.49
工况 1-6	2.04	2.42	—

*“—”表示没有温跃层。

3 水位波动形式对库湾温差异重流的影响

3.1 计算工况

为满足昼高夜低的用电需求,三峡电站开展的日调度使得下泄流量呈现显著的日波动模式,导致支流库湾水位也出现日波动现象[23]。Sha 等[27]和 He 等[30]分别采用一维和立面二维水动力模型研究了水库水位波动对支流库湾水动力的影响,结果表明水位波动可以显著增强干支流水体交换,有效改善库湾水动力条件。由此可以推断,水库水位波动也会影响支流库湾温差异重流。

为研究水位波动形式对香溪河库湾温差异重流的影响,以水位保持不变作为参照工况,拟定 4 种水位波动形式,计算工况如表 3 和图 7 所示。各工况的水位日变幅均为 1.0 m/d。水位波动的持续时间为 4 d,对应的模拟时段为 2009 年 5 月 20－24 日。除水位以外的其他计算条件均保持不变。

表 3 水位波动形式计算工况

Tab. 3 The calculation conditions of different water level fluctuations

计算工况	水位波动形式
工况 2-0	水位保持不变
工况 2-1	6 h 水位变动 1.0 m
工况 2-2	12 h 水位变动 1.0 m
工况 2-3	24 h 水位变动 1.0 m

3.2 模拟结果

受水库水位周期性波动的影响,香溪河河口断面流量也

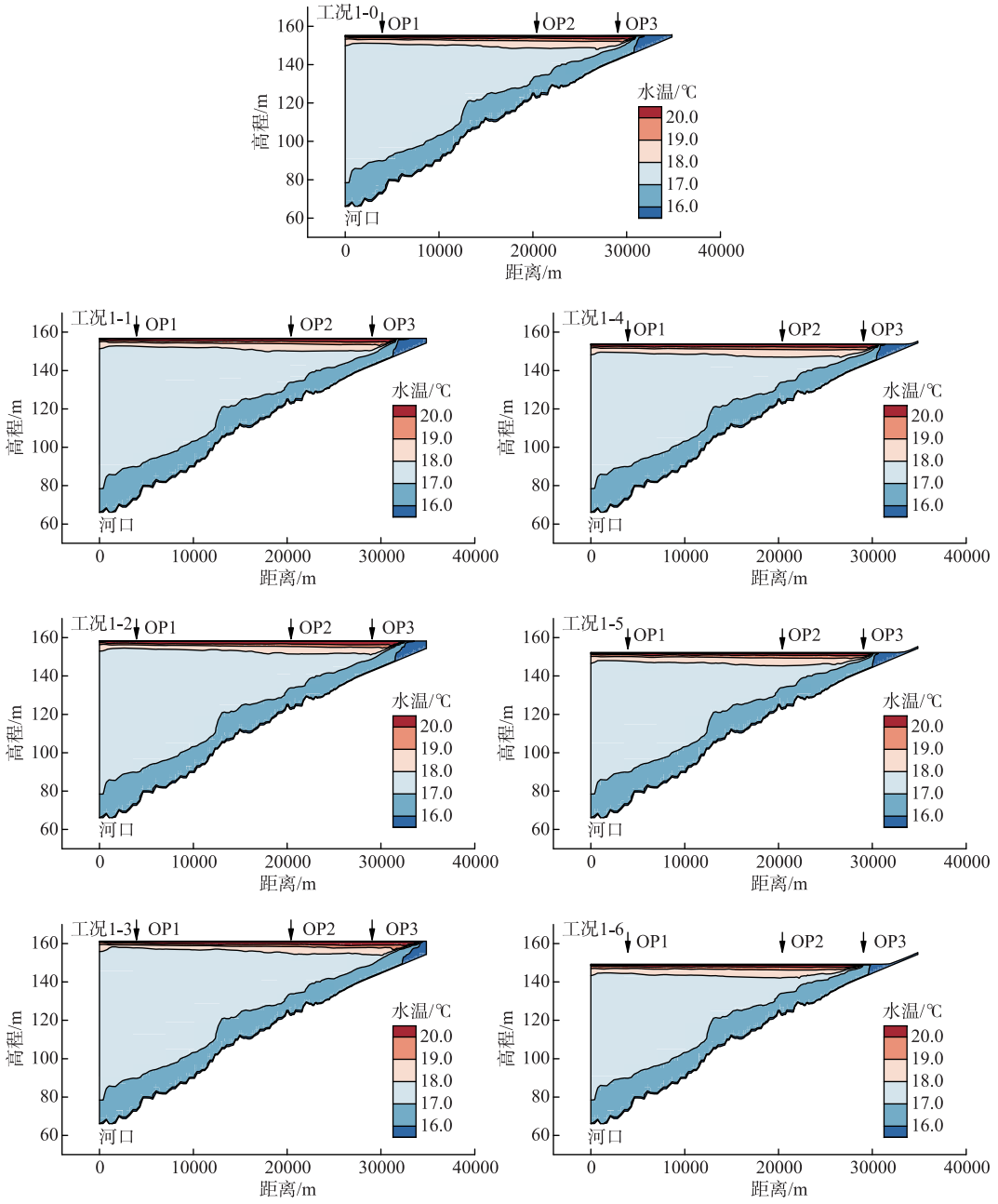


图 6 水位日变幅工况库湾沿深泓线纵断面温度场图

Fig. 6 The temperature field in longitudinal section of the Xiangxi Bay under water level daily variation conditions

呈现周期性波动(图 8)。在水库水位上升过程中,河口断面流量以流入库湾为主;当水库水位由升转降时,河口断面流量从流入转为流出;在水库水位下降过程中,河口断面流量以流出库湾为主;当水库水位由降转升时,河口断面流量从流出转为流入。随着水库水位波动的频率加快,河口断面最大流入、流出量明显增大。

由 2.2 节可知,香溪河库湾长江干流异重流和上游来流异重流的水动力特性与流入(流出)库湾的流量密切相关。受河口断面流量周期性波动的影响,长江干流异重流和上游来流异重流也将出现周期性波动。图 9 显示了工况 2-1 下库湾中游观测点 OP2 的纵向流速随时间变化情况。可以发现,当河口断面出现最大流入量时,长江干流异重流的倒灌流速达到最大,上游来流异重流的潜入流速降到最低;当河口断面出现最大流出量时,上游来流异重流的潜入速度达到最大,长江干流倒灌异重流暂时消失。这表明,河口断面出现最大流入、流出量时刻,对应着长江干流异重流和上游来流异重流分别出现最大和最小流速的时刻。

因此,在研究水库水位波动形式对香溪河库湾水动力特性的影响时,应对比各工况河口断面出现最大流入、流出量时刻,香溪河库湾沿深泓线纵断面流场如图 10 所示。随水位波动频率的加快,长江干流异重流的最大倒灌流速和倒灌厚度增大,长江干流异重流的最小倒灌流速和倒灌厚度减小甚至消失;上游来流异重流的最大潜入流速和潜入厚度增大,上游来流异重流的最小潜入流速和潜入厚度减小甚至消失(图 10)。较高的水位波动频率(6 h 水位变动 1.0 m)使得库湾内长江干流和上游来流异重流周期性出现又周期性消失,这将显著增大干支流间的水体交换,减小水力停留时间[40],有利于抑制藻类的生长和聚集。

受水库水位周期性波动的影响,长江干流异重流的倒灌距离和上游来流异重流的潜入距离也将出现波动。统计水位波动过程中长江干流异重流和上游来流异重流的最大和最小倒灌(潜入)距离,如表 4 所示。由表可知,长江干流异重流最大倒灌距离随水库水位波动频率加快而略有增大,最小倒灌距离随水位波动频率加快而明显减小;上游来流异重流最大潜入距离总是等于库湾纵向总长,最小潜入距离随水位波动频率加快而明显减小。与水位持续不变的工况相比,水库水位波动使得长江干流异重流最小倒灌距离的降幅高达 100%,上游来流异重流最小潜入距离的降幅高达 89%。总的来说,较高的水位波动频率(6 h 水位变动 1.0 m)能显著改变香溪河库湾异重流的最小倒灌(潜入)距离,使得长江干流异重流和上游来流异重流倒灌(潜入)范围发生大幅度波动,在库湾内形成周期性的往复流动。

表 4 水位波动工况下库湾温差异重流的倒灌(潜入)距离

Tab. 4 The backflow and inflow distance of thermal density flow under water level fluctuation conditions

计算工况		长江倒灌距离/km	上游潜入距离/km
工况 2-0		30.9	37.0
工况 2-1	最大	32.9	37.0
	最小	0	4.10
工况 2-2	最大	31.1	37.0
	最小	12.6	37.0
工况 2-3	最大	31.0	37.0
	最小	20.0	37.0

以中游观测点 OP2 为例,工况 2-1 库湾水温垂向分布随时间变化情况如图 11 所示。由图可知,受河口断面流量周期性波动的影响,表层等温线也存在周期性波动。当河口断面出现最大流入量时,表层等温线处于最高点;当河口断面出现最大流出量时,表层等温线处于最低点。表层水体的数条等温线中,距离水表面越近,等温线的波动幅度越小。统计各工况下表层 18 ℃等温线的波动幅度,工况 2-0 的波动幅度为 0 m,工况 2-1 的波动幅度为 2.04 m,工况 2-2 的波动幅度为 1.69 m,工况 2-3 的波动幅度为 1.32 m。可以发现,水库水位波动频率越快,表层等温线的波动幅度就越大。

对比各工况河口断面出现最大流入、流出量时刻,香溪河库湾沿深泓线纵断面温度场见附图Ⅲ。由图可知,1.0 m 以内的日水位周期性波动对香溪河库湾内垂向水温分布影响较小,库湾内仍存在稳定的水温分层结构,即温跃层始终位于表层。

4 结论

支流库湾特殊的温差异重流与水华生消过程密切相关,深入研究温差异重流特性有助于更好地理解水库调度(水位波动)对支流水华生消的控制机制。本研究基于经率定验证的香溪河库湾三维水动力水温数值模型,模拟了水库水位波动对库湾温差异重流的影响,结果如下:

1)起始时间对应的长江干流、上游来流与香溪河库湾水体之间的温度差,决定了库湾内温差异重流的形式,2.0 m/d 以内的水位日变幅和 1.0 m/d 的水位周期性波动均不能够改变长江干流中上层倒灌异重流和上游来流底层潜入异重流。

2)水位日升幅越大,流入库湾的流量增大,长江干流异重流的倒灌流速、倒灌厚度和倒灌距离越大,上

游来流异重流的潜入流速越小;水位日降幅越大,流出库湾的流量减小,长江干流异重流的倒灌流速、倒灌厚度和倒灌距离越小。

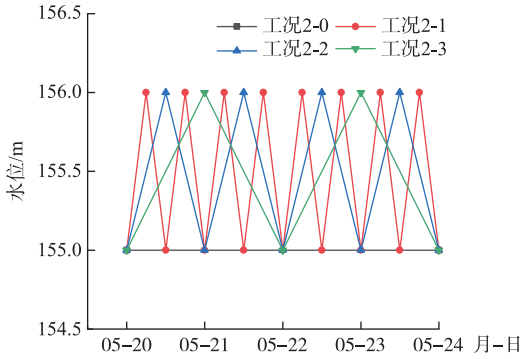


图 7 不同计算工况水位波动形式

Fig. 7 The water level fluctuations under different calculation conditions

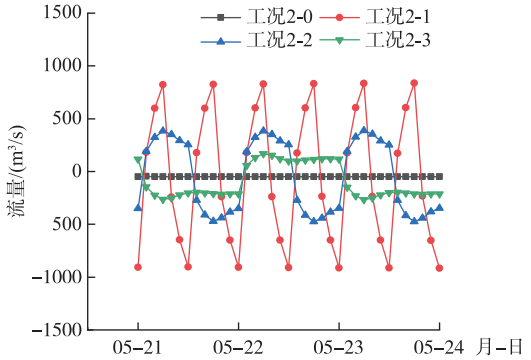


图 8 水位波动工况下香溪河河口断面流量

Fig. 8 The flow discharges of the Xiangxi Estuary under water level fluctuation conditions

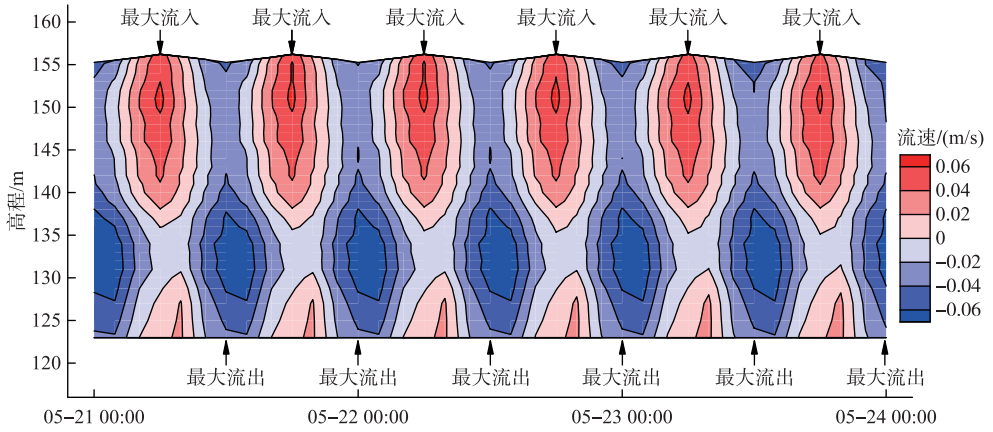


图 9 工况 2-1 库湾中游观测点 OP2 纵向流速随时间的变化
(红色表示长江干流倒灌异重流,蓝色表示上游来流潜入异重流)

Fig. 9 The longitudinal flow velocity over time at the midstream observation point (OP2) of Condition 2-1
(Red area indicates the backflow of the main stream of the Yangtze River, and blue area indicates the upstream inflow of the Xiangxi Bay)

3)水位日变幅对库湾表层和底层水温基本没有影响,表面温跃层平均深度在 5.0 m 以内。中层水体厚度随水库水位上升而增大,随水库水位下降而减小。

4)水位周期性波动使得长江干流异重流和上游来流异重流也发生周期性波动。水位波动频率越快,流入库湾的最大流量增大,长江干流异重流最大倒灌流速、倒灌厚度和倒灌距离增大,上游来流异重流最小潜入流速、潜入厚度和潜入距离减小;同时流出库湾的最大流量也增大,上游来流异重流最大潜入流速、潜入厚度增大,长江干流异重流最小倒灌流速、倒灌厚度和倒灌距离减小。

5)水位周期性波动频率越快,库湾表层等温线的波动幅度越大。但 1.0 m 的日水位周期性波动还不足以打破库湾稳定的水温分层。

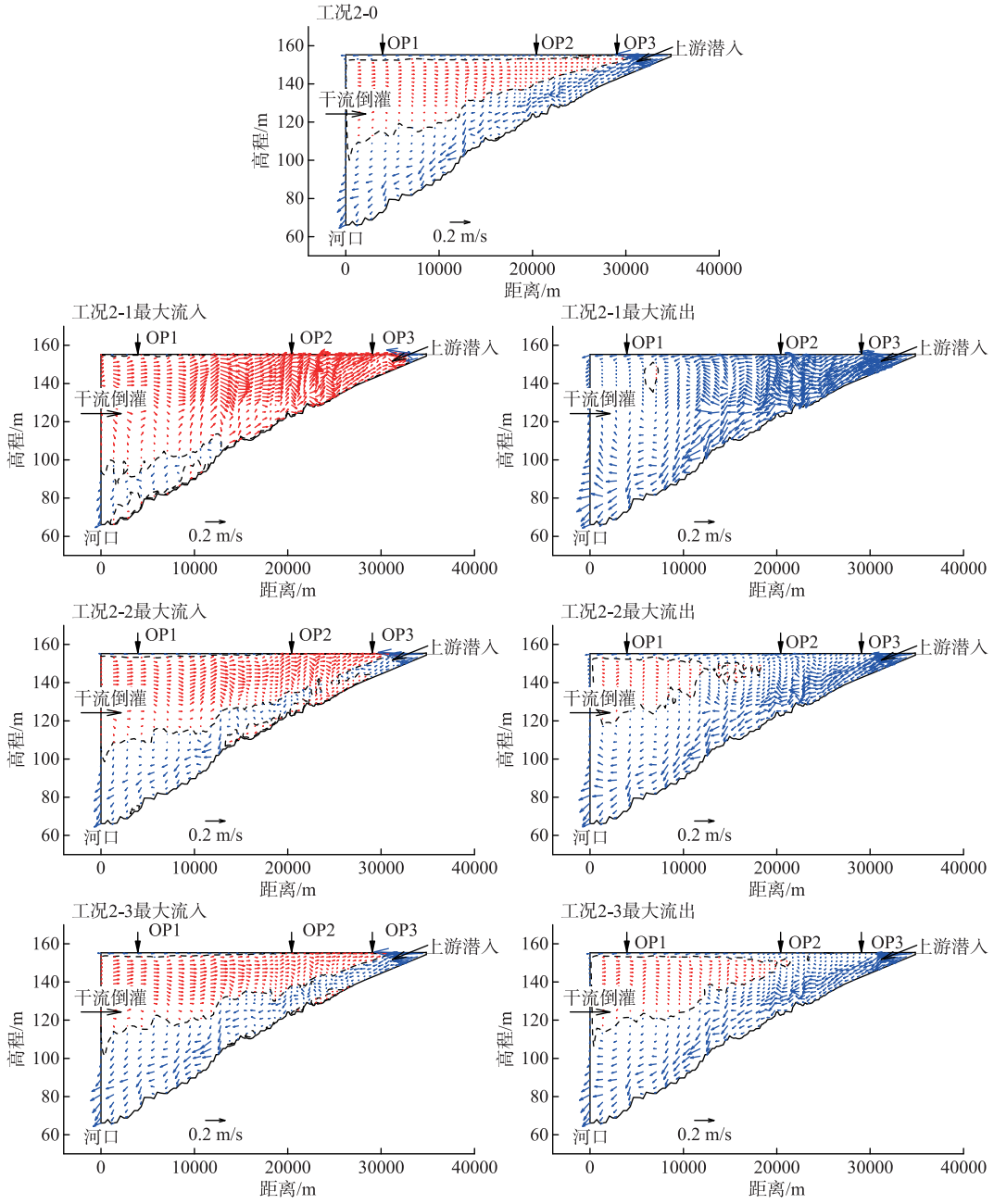


图 10 水位波动工况库湾沿深泓线纵断面流场图

Fig. 10 The flow field in longitudinal section of the Xiangxi Bay under water level fluctuation conditions

5 附录

附图Ⅰ~Ⅲ见电子版(DOI:10.18307/2025.0642)。

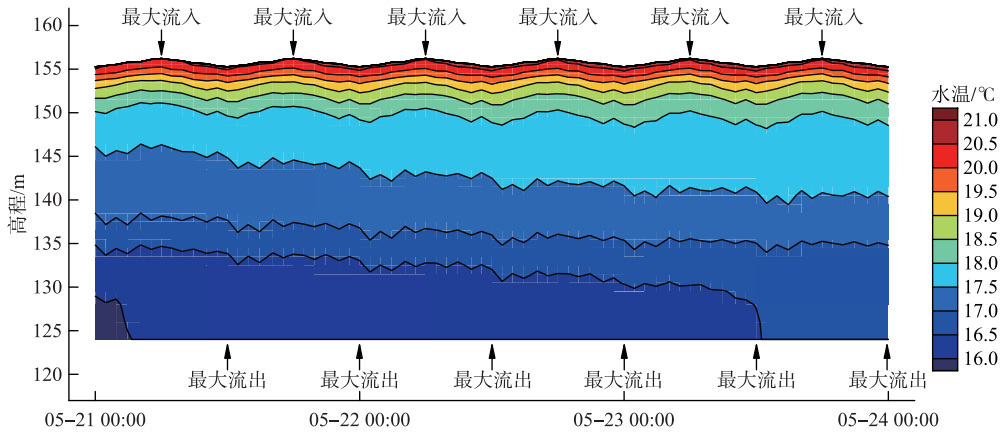


图 11 工况 2-1 库湾中游观测点 OP2 水温垂向分布随时间变化

Fig. 11 The vertical distribution of water temperature over time at the midstream observation point (OP2) of Condition 2-1

6 参考文献

[1] Huo J, Cui YJ, Song LX *et al*. Seasonal stratification of waters in the Shennong Stream of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1166-1174. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201904.003. [霍静, 崔玉洁, 宋林旭等. 三峡水库神农溪库湾水体季节性分层特性. 生态学杂志, 2019, **38**(4): 1166-1174.]

[2] Wang YY, Xu T, Cui YJ *et al*. Seasonal thermal stratification in Shennong Bay and its effect on algae blooms. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(4): 19-26. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.04.003. [王耀耀, 徐涛, 崔玉洁等. 神农溪水体季节热分层特征及其对水华影响. 水生态学杂志, 2020, **41**(4): 19-26.]

[3] Huang JW, Ji DB, Song LX *et al*. Characteristics and effects of different density flows in tributaries of Three Gorges reservoir in summer. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(4): 63-74. DOI: 10.11660/slfdxb.20190407. [黄佳维, 纪道斌, 宋林旭等. 三峡水库夏季不同支流倒灌特性及其影响分析. 水力发电学报, 2019, **38**(4): 63-74.]

[4] Ma JC, Yang ZJ, Cheng B *et al*. Analysis of differences and causes of water exchange between mainstream and tributaries in different reservoirs. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, **52**(10): 862-869. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2019-10-003. [马金川, 杨正健, 程豹等. 不同水库干支流水体交换差异及成因分析. 武汉大学学报: 工学版, 2019, **52**(10): 862-869.]

[5] Zhang BH, Cui YJ, Ji DB *et al*. Spatial-temporal distribution and threshold of density flow in the tributaries of the Three Gorges Reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (5): 62-69. [张必昊, 崔玉洁, 纪道斌等. 三峡水库支流库湾分层异重流成因定量化分析. 中国农村水利水电, 2022, (5): 62-69.]

[6] Ji DB, Liu DF, Yang ZJ *et al*. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir. *Scientia Sinica: Pysica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(1): 101-112. [纪道斌, 刘德富, 杨正健等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.]

[7] Yang ZJ, Xu P, Liu DF *et al*. Hydrodynamic mechanisms underlying periodic algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir. *Ecological Engineering*, 2018, **120**: 6-13. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.003.

[8] Long LH, Ji DB, Yang ZJ *et al*. Density-driven water circulation in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *River Research and Applications*, 2019, **35**(7): 833-843. DOI: 10.1002/rra.3459.

[9] Li PY, Yao Y, Lian JJ *et al*. Effect of thermal stratified flow on algal blooms in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2021, **601**: 126648. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126648.

[10] Long LH, Huang YB, Xu H *et al*. Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: Review and prospect. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 383-399. DOI: 10.18307/2023.0202. [龙良红, 黄宇擘, 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. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 383-399.]

[11] Liu L, Liu DF, Johnson DM *et al*. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130. DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.029.

[12] Song Y, Shen L, Zhang LL *et al*. Study of a hydrodynamic threshold system for controlling dinoflagellate blooms in reservoirs. *Environmen-*

tal Pollution, 2021, **278**: 116822. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116822.

[13] Holbach A, Norra S, Wang LJ *et al*. Three Gorges Reservoir: Density pump amplification of pollutant transport into tributaries. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(14): 7798-7806. DOI: 10.1021/es501132k.

[14] Yang ZJ, Cheng B, Xu YQ *et al*. Stable isotopes in water indicate sources of nutrients that drive algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 205-213. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.266.

[15] Li J, Yin W, Jia HY *et al*. Study on the ecological regulation of algal bloom control in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 740-751. DOI: 10.18307/2022.0304. [李建, 尹炜, 贾海燕等. 汉江中下游水华防控生态调度研究. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 740-751.]

[16] Li Y, Fang LC, Cao GR *et al*. Reservoir regulation-induced variations in water level impacts cyanobacterial bloom by the changing physiochemical conditions. *Water Research*, 2024, **259**: 121836. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121836.

[17] Huang YB, Cao GR, Fan XJ *et al*. Influence of reservoir operation in flood season on water bloom of Xiaojiang River. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(1): 52-58, 74. [黄宇波, 曹光荣, 范向军等. 汛期水库调度对小江水华的影响. 长江科学院院报, 2024, **41**(1): 52-58, 74.]

[18] Song Y, You LH, Chen M *et al*. Key hydrodynamic principles for controlling algal blooms using emergency reservoir operation strategies. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**: 116470. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116470.

[19] Gai B, Sun J, Lin BL *et al*. Vertical mixing and horizontal transport unravel phytoplankton blooms in a large riverine reservoir. *Journal of Hydrology*, 2023, **627**: 130430. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130430.

[20] Yao JZ, Fan XJ, Yang X *et al*. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(6): 2041-2048. DOI: 10.12030/j.cjee.202112199. [姚金忠, 范向军, 杨霞等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策. 环境工程学报, 2022, **16**(6): 2041-2048.]

[21] Zhao XX, Ji DB, Long LH *et al*. Effect of water level fluctuation in flood season on thermal stratification and water quality in Xiangxi Bay. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(2): 31-41. DOI: 10.11660/slfdxb.20210204. [赵星星, 纪道斌, 龙良红等. 汛期水位波动对香溪河库湾热分层特性及水质的影响. 水力发电学报, 2021, **40**(2): 31-41.]

[22] Tian P, Li YL, Li YJ *et al*. Effects of the Three Gorges Reservoir operation on vertical distribution of chlorophyll a and environmental factors in tributaries. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 295-305. DOI: 10.13227/j.hjkx.202105201. [田盼, 李亚莉, 李莹杰等. 三峡水库调度对支流水体叶绿素 *a* 和环境因子垂向分布的影响. 环境科学, 2022, **43**(1): 295-305.]

[23] Yan JB, Ji DB, Yang ZY *et al*. Influence of tributary oscillation driven by daily operation of Three Gorges Reservoir on vertical water temperature structure of tributary. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(11): 89-93, 101. DOI: 10.11988/ckyyb.20220510. [闫金波, 纪道斌, 杨忠勇等. 三峡电站日调度驱动的支流振荡对支流水温垂向结构的影响. 长江科学院院报, 2022, **39**(11): 89-93, 101.]

[24] Wang X, Fan XJ, Yang X *et al*. Response of water quality to changing hydrological conditions in Xiangxi Bay. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(11): 2393-2402. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202311014. [王旭, 范向军, 杨霞等. 香溪河库湾水质对水文条件变化的响应. 长江流域资源与环境, 2023, **32**(11): 2393-2402.]

[25] Li J, Liang RF, Deng Y *et al*. Flow field of thermally stratified reservoir. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2014, **47**(5): 395-400. [李嘉, 梁瑞峰, 邓云等. 水库水温分层的流场分析. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, **47**(5): 395-400.]

[26] Wang LL, Dai HC, Cai QH. Numerical simulation of the ecological operation schedule in Xiangxi River. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2009, **37**(4): 111-114. DOI: 10.13245/j.hust.2009.04.010. [王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河生态调度方案的数值模拟. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, **37**(4): 111-114.]

[27] Sha YK, Wei YP, Li WP *et al*. Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2015, **528**: 230-237. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.020.

[28] Xin XK, Li E, Yang X *et al*. Influence of reservoir regulation on vertically-averaged velocity in the Xiangxi tributary bays of the Three Gorges Reservoir. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2019, **4**(3): 18-24. [辛小康, 李恩, 杨霞等. 干支流水库调度对三峡库区香溪河库湾垂线平均流速影响研究. 三峡生态环境监测, 2019, **4**(3): 18-24.]

[29] Li GH, Yang X, Chen HC *et al*. Preliminary study on hydrodynamic regulation of algal bloom in Xiangxi River Bay. *Yangtze River*, 2017, (10): 18-23, 29. [李光浩, 杨霞, 陈和春等. 三峡水库香溪河库湾水华水动力调控初步研究. 人民长江, 2017, (10): 18-23, 29.]

[30] He W, Feng SY, Bi YH *et al*. Influences of water level fluctuation on water exchange and nutrient distribution in a bay: Evidence from the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *Environmental Research*, 2023, **222**: 115341. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115341.

[31] Shi LD, Sun J, Lin BL *et al*. Hydro-thermodynamic processes at a large confluence under reservoir regulation. *Water Resources Research*, 2022, **58**(12): e2022WR033315. DOI: 10.1029/2022WR033315.

[32] Gao ZF, Wang LL. Numerical simulation of water temperature structure and its impact on hydrodynamics in Xiangxihe Bay of Three Gorges

Reservoir. *Water Resources and Power*, 2016, **34**(7): 95-99. [高志发, 王玲玲. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对水动力影响的数值模拟. 水电能源科学, 2016, **34**(7): 95-99.]

[33] Li YY, Sun J, Lin BL *et al*. Thermal-hydrodynamic circulations and water fluxes in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2020, **585**: 124319. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124319.

[34] Li J, Jiang LW, Zhong CH. Stream flow tabes devision and determination of hudrolic parmeters of Yangtze River and Jialing River in Chongqing's urban. *Chongqing Environmental Science*, 1994, (3): 35-37, 64. [李娟, 蒋良维, 钟成华. 长江、嘉陵江重庆城区段流管划分及其水力学参数的确定. 重庆环境科学, 1994, (3): 35-37, 64.]

[35] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018.

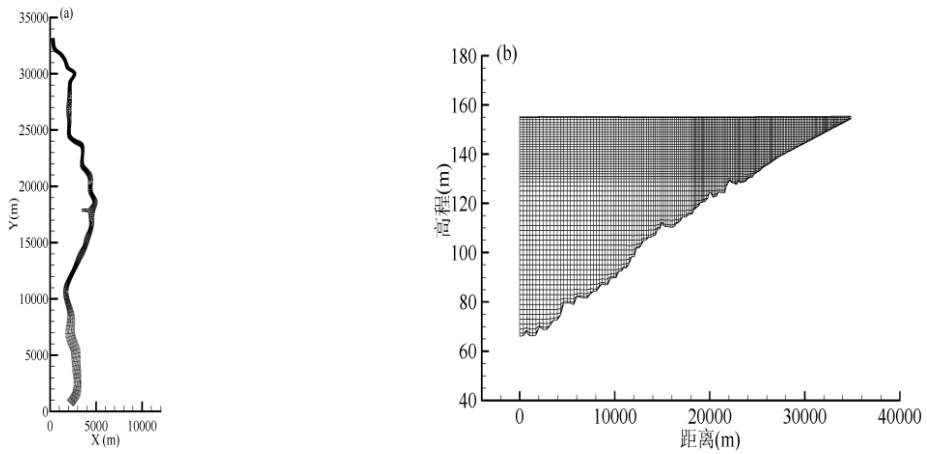
[36] Lang Y, Wang LL, Cai X *et al*. Research on hydrodynamics with water temperature characteristics and spring algal blooms in a typical tributary bay of Three Gorges Reservoir. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, (1): 7654543. DOI: 10.1155/2019/7654543.

[37] Rao GK, Wang LL, Xu J *et al*. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2023, **51**(3): 31-37. [饶贵康, 王玲玲, 徐津等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2023, **51**(3): 31-37.]

[38] 中国长江三峡集团公司. 三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019 年修订版). 北京: 中华人民共和国水利部, 2020

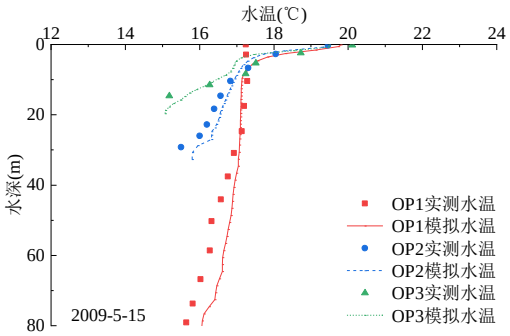
[39] Wang YZ, Pu PM. Preliminary study on the thermocline in Fuxian Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1982, (4): 1-9. [王银珠, 濮培民. 抚仙湖水温跃层的初步研究. 海洋湖沼通报, 1982, (4): 1-9.]

[40] Yang ZJ, Wei CY, Liu DF *et al*. The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in Three Gorges Reservoir, China: A combination of cultural experiments and field monitoring. *Water Research*, 2022, **211**: 118030. DOI: 10.1016/j.watres.2021.118030.



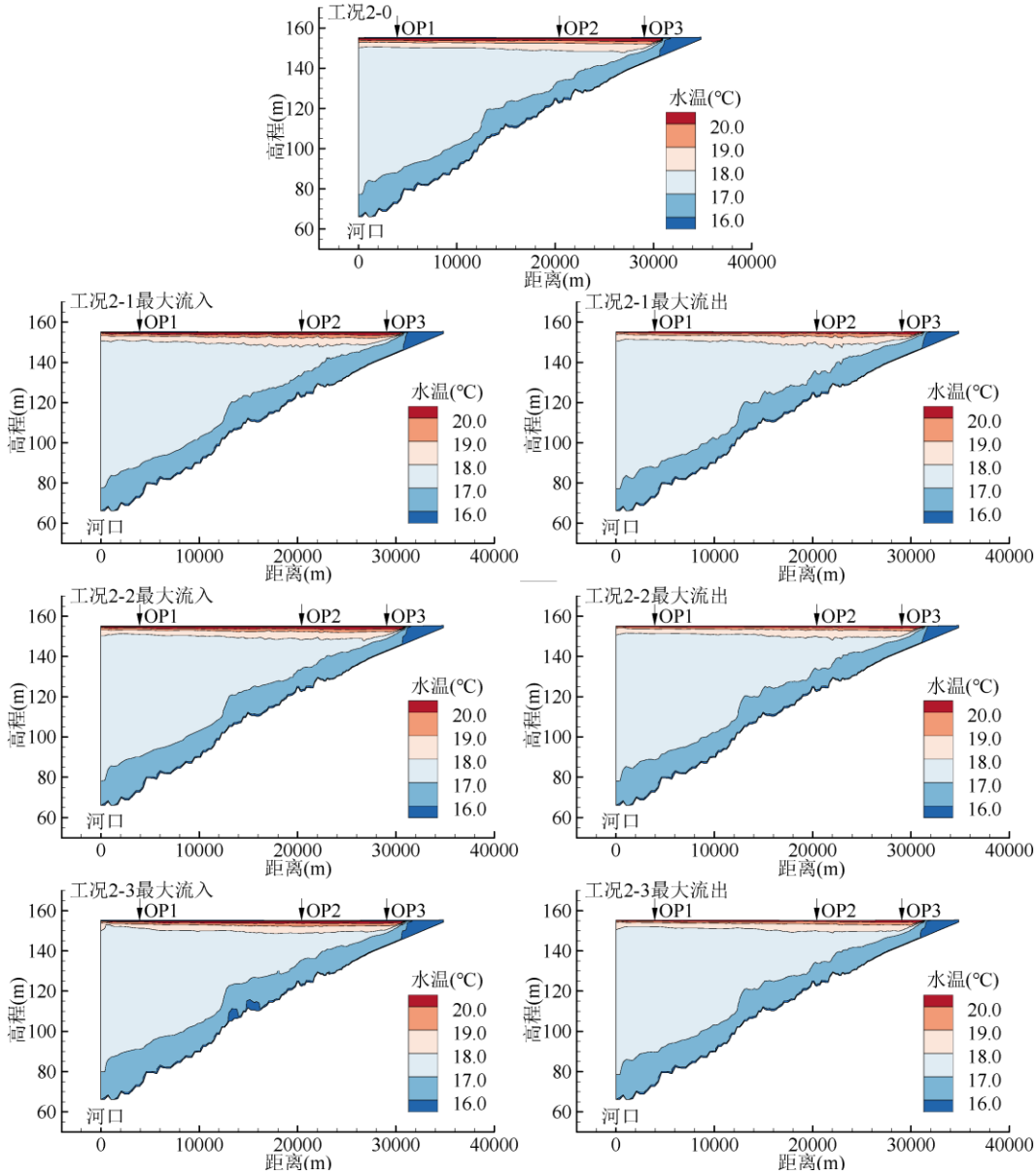
附图 I 香溪河库湾水平网格（a）和垂向网格（b）

Attached Fig.I The horizontal grid (a) and the vertical grid (b) of the Xiangxi Bay



附图 II 香溪河库湾典型观测点垂向水温验证

Attached Fig.II The verification of vertical water temperature at typical observation points in the Xiangxi Bay



附图 III 水位波动工况库湾沿深泓线纵断面温度场

Attached Fig.III The temperature field in longitudinal section of the Xiangxi Bay under water level fluctuation conditions