

文章编号:1672-3031(2018)01-0045-07

## 控制幕运行方式改善下泄水温及其成因研究

高学平, 宋清林, 孙博闻

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 控制幕取水方式能够有效地减缓温度分层型水库下泄低温水对下游生态环境的不利影响, 但目前缺乏控制幕运行方式下泄水温规律的试验研究以及对下泄水温成因的分析。本文基于某水库水温资料, 首先通过试验探讨不同控制幕运行方式对下泄水温的改善效果, 总结下泄水温规律。其次, 利用三维数学模型进行精细模拟, 分析控制幕表层和底层同时过流运行方式的流动规律, 探讨下泄水温成因。结果表明: 控制幕表层过流运行方式能够显著提高下泄水温; 采用控制幕表层底层同时过流运行方式时, 主流区位于控制幕顶部和底部, 下泄水体主要由表层高温水与底层低温水掺混而成, 下泄水温取决于所取表层高温水和底层低温水的掺混比例。研究成果对温度分层型水库控制幕取水的运行调度具有重要意义。

**关键词:** 温度分层型水库; 控制幕运行方式; 下泄水温; 试验; 数值模拟

**中图分类号:** TV697

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.01.007

### 1 研究背景

对于温度分层型水库, 水库水温呈现明显的垂向分层现象, 表层与底层水温温差有时可达 $20^{\circ}\text{C}$ 左右<sup>[1]</sup>。传统取水口引用水库底层水, 下泄低温水易导致农作物减产、影响鱼类繁殖, 危害下游水生态环境<sup>[2]</sup>。目前, 分层取水是调控下泄水温的有效措施, 工程中应用最多的分层取水形式有叠梁门取水、多层孔型取水口、浮式管型取水口和控制幕取水。与其它分层取水形式相比, 控制幕取水方式不仅结构简单、施工方便、造价较低, 而且控制幕淹没深度可自由调整。

国内外对控制幕分层取水的研究主要采用原型观测、数值模拟以及模型试验等方法。Vermeyen<sup>[3]</sup>通过观测 Whiskeytown、Lewiston 两座水库控制幕前后温度分布以及下泄水温, 研究了控制幕调控下泄水温的效果。Politano 等<sup>[4]</sup>采用三维模型模拟了控制幕对 McNary 坝前水温分布的影响并研究了下泄水对大马哈鱼的影响。练继建等<sup>[5]</sup>利用三维水动力水温模型, 分析了控制幕改善下泄低温水的效果及主要影响因素。Shammaa 等<sup>[6]</sup>采用淡水和盐水两层流模型进行了控制幕取水模型试验, 研究了控制幕附近流场结构的演变。目前缺少直接模拟水库水温分布进行控制幕取水下泄水温的试验研究。在水温物理模型试验方面, 高学平等<sup>[7-9]</sup>系统地研究了叠梁门、多层孔型、浮式管型取水口下泄水温, 研究成果和方法可供本文借鉴。

本文以某水库为背景, 首先通过试验研究控制幕运行方式对下泄水温的改善效果, 总结下泄水温规律。其次, 针对控制幕表层和底层同时过流运行方式改善下泄水温效果较差的试验结果, 采用数值模拟方法分析控制幕表层和底层同时过流运行方式的流动规律, 揭示其水温调控效果微弱的原因。

收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC22600); 国家自然科学基金(51279125); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321065)

作者简介: 高学平(1962-), 男, 天津人, 博士, 教授, 主要从事工程水力学和环境水力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

通信作者: 孙博闻(1987-), 男, 河北人, 博士, 讲师, 主要从事环境水力学及水环境数值模拟研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

## 2 背景资料

图1为某水库各月份水温分布，是典型的温度成层型水库<sup>[1]</sup>。该水库水温分布沿垂向自上而下可分为表温层、温跃层、底温层。由于各月份气温与太阳辐射不同，各月份表底温差和温跃层厚度存在一定差异，水温分布可大致分为四类。第一类，水温沿垂向均一分布，如1月；第二类，表、底层温差较小，水温沿垂向均匀变化，没有明显的温跃层，代表月份为3月；第三类，表、底层温差较大，表温层较薄，温跃层存在较大温度梯度，代表月份为5月；与第三类相比，第四类水温分布表温层较厚，代表月份为10月。因此，本文选取代表月份3、5、10月进行研究，研究不同控制幕运行方式的下泄水温及其成因。

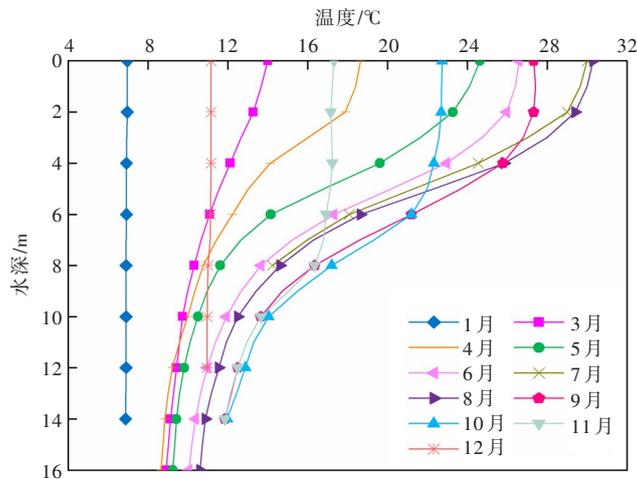


图1 水库各月份水温分布图

## 3 控制幕下泄水温试验研究

以上述水库水温分布为基础，通过试验研究出水口处于水库底温层情况下不同控制幕运行方式调控下泄水温的效果，总结下泄水温规律。

出水口设于坝的底部，为改善出水口长期下泄低温水，在库区距取水口一定距离设置控制幕，控制幕可垂向自动调节形成不同的控制幕运行方式，当控制幕底部与库底接触则形成控制幕表层过流，当控制幕底部离开库底则形成控制幕表层和底层同时过流。图2为控制幕运行方式。

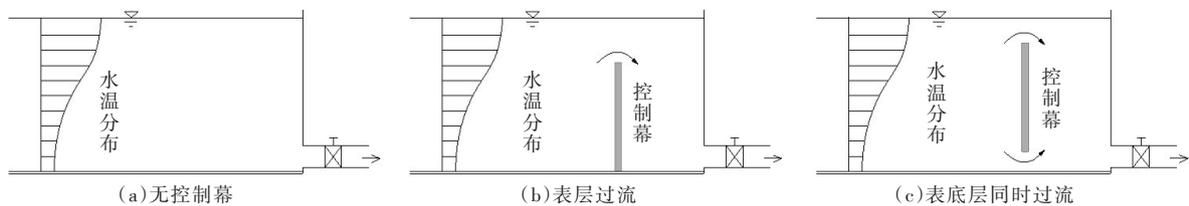


图2 控制幕运行方式

**3.1 试验设计** 基于水温试验相似理论<sup>[10]</sup>，考虑各代表月份水温分布相应深度和水温加热能力，试验选定几何比尺 $\lambda_l = 18$ (原型量/模型量)。试验模型全长20 m，宽2 m，高0.8 m，水深0.75 m。模型由水槽、水温加热与控制系统、水温采集系统和流量控制系统、控制幕组成。试验布置如图3所示。

水槽采用透明有机玻璃制作。水温加热控制系统利用加热池将水体分别加热到指定温度，通

过分层加水装置依次将不同温度的水体平稳地注入模型水库中，形成较好模拟原型水库的水温分布；水温采集系统采用高精度快速响应温度传感器实时监测水库水温分布和测量下泄水温，并通过计算机记录相应数据；流量控制系统用于控制取水流量和补水流量，保持库内水位稳定；控制幕采用灰塑料板制作，通过拼接组合不同高度的控制幕块调整控制幕的运行方式，并由固定槽固定。

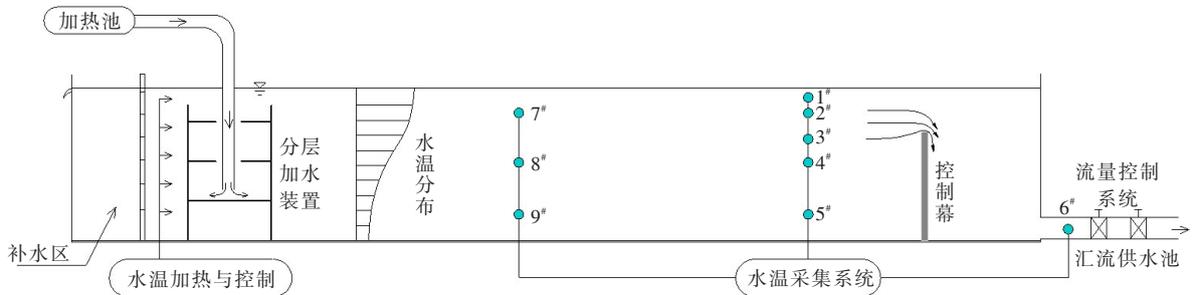


图3 试验布置图

**3.2 试验方法** 依据各代表月份水温分布特征，将水体沿垂向分为4层，并确定各层温度差。通过分层加水装置依次将加热到指定温度的水体平稳地注入模型水库中，形成所需的水温分布。将控制幕缓慢放于固定槽中，尽量不引起水面波动。同时打开取水阀门和补水阀门，保持水库水位不变，并进行下泄水温的测量。

### 3.3 下泄水温试验成果与分析

**3.3.1 水库水温分布模拟** 下泄水温模拟的精度，取决于能否准确的模拟原型水库的水温分布。图4给出了3、5、10三个代表月份原型水库水温分布(目标水温)和试验模拟形成的水温分布(模拟水温)的比较，二者吻合较好；图5为试验过程中模型水库各水温测点的水温历时，各测点的水温基本稳定。说明试验能够较好地模拟原型水库的水温分布并保持水温稳定。

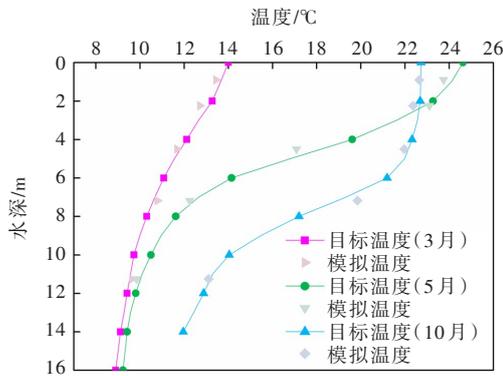


图4 目标水温与模拟水温

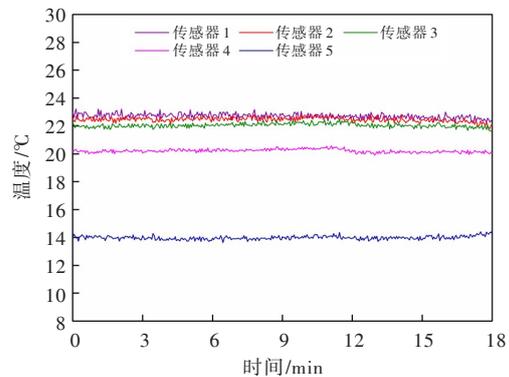


图5 模型水库内各测点的水温历时

**3.3.2 控制幕运行方式对下泄水温的影响** 为研究控制幕不同运行方式对下泄水温的影响，在取水流量  $2.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 、控制幕至出水口距离9m保持不变的条件下，对各代表月份无控制幕、表层和底层同时过流、表层过流三种运行方式进行试验研究。表层底层同时过流方式包括S2.7 B2.7、S3.6 B2.7两种工况，S3.6 B2.7表示控制幕顶距水面3.6 m(即淹没深度)，控制幕底部距库底2.7 m。表层过流方式分为淹没深度为2.7 m、3.6 m、5.4 m三种工况。

由表1可知，对比三种运行方式对下泄水温的调控效果，表层过流运行方式能够有效提高下泄水温，并且控制幕淹没深度越小，下泄水温提高幅度越大，而表层和底层同时过流运行方式与无控制幕运行方式下泄水温相差不大。以5月份为例，无控制幕运行方式且采用表层过流方式，控制幕淹没

表1 不同控制幕运行方式的下泄水温试验结果

月份	水温分布特征/℃	运行方式	下泄水温/℃	温差/℃	
3月	表层水温 14.00 底层水温 8.90 表底温差 5.10	无控制幕	9.72	0	
		表层底层	S2.7 B2.7	9.94	+0.22
		同时过流	S3.6 B2.7	9.85	+0.13
			S2.7	12.68	+2.96
		表层过流	S3.6	12.22	+2.50
			S5.4	11.49	+1.77
5月	表层水温 24.63 底层水温 9.23 表底温差 15.40	无控制幕	10.15	0	
		表层底层	S2.7 B2.7	10.23	+0.08
		同时过流	S3.6 B2.7	10.21	+0.06
			S2.7	22.46	+12.31
		表层过流	S3.6	20.72	+10.57
			S5.4	16.67	+6.52
10月	表层水温 22.73 底层水温 11.20 表底温差 11.53	无控制幕	13.61	0	
		表层底层	S2.7 B2.7	13.43	-0.18
		同时过流	S3.6 B2.7	13.42	-0.19
			S2.7	22.47	+9.05
		表层过流	S3.6	22.34	+8.92
			S5.4	21.63	+8.21

深度从2.7 m变化到3.6 m再到5.4 m，对应的下泄水温分别为22.46 ℃、20.72 ℃和16.67 ℃，与无控制幕运行方式相比，下泄水温分别提高了12.31 ℃、10.57 ℃和6.52 ℃；当采用表层和底层同时过流方式，控制幕淹没深度从2.7 m到3.6 m，对应的下泄水温分别为10.23 ℃和10.21 ℃，下泄水温分别提高了0.08 ℃和0.06 ℃。

#### 4 下泄水温成因数值模拟研究

针对试验结果，为进一步探究控制幕表层和底层同时过流方式下泄水温较低的原因，利用数值模拟手段，研究控制幕表层和底层同时过流运行方式的流动规律，揭示下泄水温成因。

##### 4.1 控制方程 连续性方程：

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

运动方程：

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \rho \nu \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) + F_i \quad (2)$$

能量方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_i \frac{\partial T}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( D_r \frac{\partial T}{\partial X_i} - \overline{U'_i T'} \right) + \frac{q}{C_p} \quad (3)$$

状态方程：

$$\rho = \left( \begin{array}{l} 1.02027692 \times 10^{-3} + 6.77737262 \times 10^{-8} \times T - 9.05345843 \times 10^{-9} \times T^2 \\ + 8.64372185 \times 10^{-11} \times T^3 - 6.42266188 \times 10^{-13} \times T^4 \\ + 1.05164434 \times 10^{-18} \times T^7 - 1.04868827 \times 10^{-20} \times T^8 \end{array} \right) \times 9.8 \times 10^5 \quad (4)$$

采用 Boussinesq 假定，只在重力项中考虑密度变化的影响。

$k$  方程：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G - \varepsilon \quad (5)$$

$\varepsilon$  方程：

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \quad (6)$$

式中： $U_i$  为  $i$  方向速度分量； $\rho$  为流体密度； $p$  为压强； $-\rho \overline{u_i u_j}$  为雷诺应力； $F_i$  为作用于单位质量水体的体积力； $T$  为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $D_T$  为热扩散系数； $q$  为热源项； $C_p$  为水的比热； $k$  是单位质量的紊动能； $G$  为剪切产生项； $\varepsilon$  是紊动能耗散率； $\nu$  是运动黏性系数， $\nu_t$  是紊流运动黏性系数，它由  $k$  和  $\varepsilon$  确定。 $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  为模型通用常数，分别取为 0.09、1.44、1.92、1.0 和 1.3。

表 2 下泄水温计算值与试验值

月份	水温分布特征/ $^{\circ}\text{C}$	运行方式	下泄水温试验值/ $^{\circ}\text{C}$	下泄水温计值/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $^{\circ}\text{C}$	相对差/%	
3 月	表层水温 14.00 底层水温 8.90 表底温差 5.10	无控制幕	9.72	9.74	-0.02	0.21	
		表层底层	S2.7 B2.7	9.94	9.78	+0.16	1.61
		同时过流	S3.6 B2.7	9.85	9.66	+0.19	1.93
			S2.7	12.68	12.87	-0.19	1.50
		表层过流	S3.6	12.22	12.55	-0.33	2.70
		S5.4	11.49	11.72	-0.23	2.00	

**4.2 模型建立** 针对控制幕取水方式建立三维数学模型，计算区域为坝前 200 m，宽度 36 m，水深 13.5 m 的长方体水体。网格划分采用六面体结构网格，在控制幕附近和出水口附近网格加密，最小网格尺寸 0.4 m×0.5 m×0.4 m，最大尺寸 1 m×0.5 m×0.9 m。坝前 200 m 处为库区边界，给定恒定水位，沿水深压强按静水压强分布规律给出，沿水深水温分布按代表月份的实测水库水温分布给出；出水口下游 50m 断面为出流边界，依据流量按照平均流速给出；固壁边界采用无滑移条件；水面采用刚盖假定，不考虑水面热交换。

**4.3 模型验证** 利用建立的三维数学模型，计算 3 月不同控制幕运行方式的下泄水温，并与试验值进行比较(表 2)，验证三维数学模型的合理性。结果表明，不同运行方式的下泄水温试验值和计算值相对误差均小于 3%，模型能够准确的模拟控制幕不同运行方式的下泄水温。

**4.4 下泄水温数值模拟结果及分析** 为探究表层和底层同时过流方式下泄水温较低的原因，在取水量 2.34 m<sup>3</sup>/s、控制幕至出水口距离 9 m 保持不变的条件下，模拟分析出水口位于水库底部时 S2.7 B2.7 工况与无控制幕工况的流动规律。图 6 为 5 月份时两工况坝前速度矢量与温度分布云图，图 7 为 5 月份时坝前 1.8 m 和 9.5 m(控制幕前)断面的流速分布。

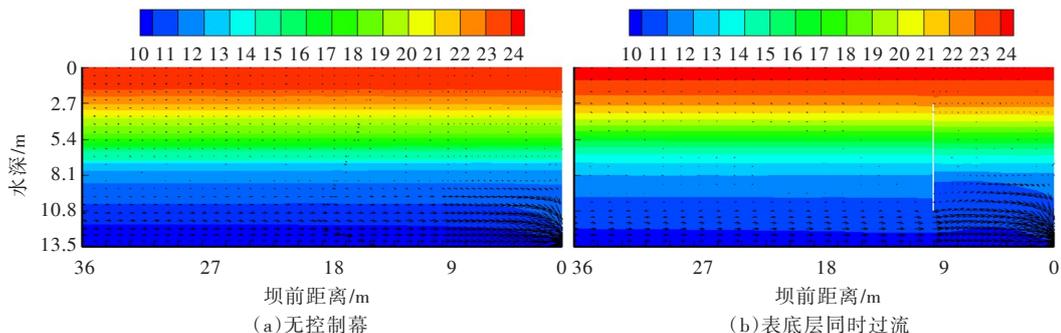


图 6 表层和底层同时过流与无控制幕运行方式坝前速度矢量及温度分布云图

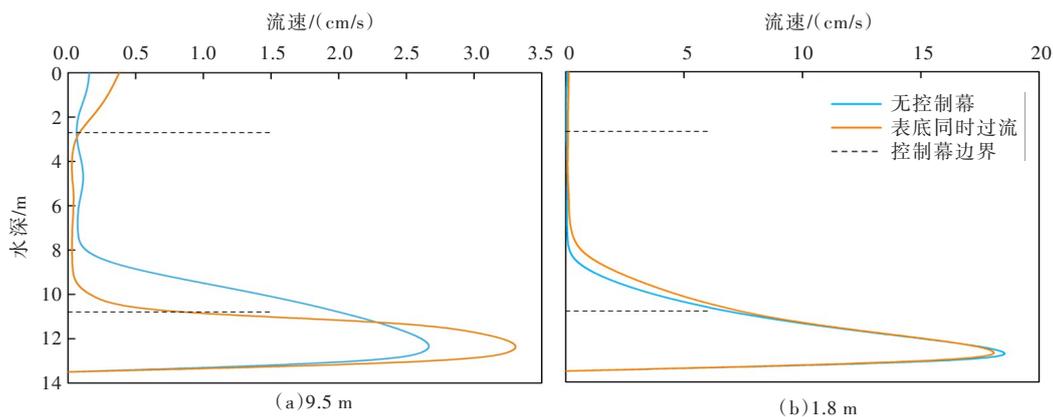


图7 坝前1.8m和9.5m断面流速分布

由图5与图6可知，控制幕阻断了遮挡范围的水体流动，表层高温水和底层低温水分别从控制幕顶部和底部通过，在出水口牵引力和压强作用下，水体主要从控制幕底部流过。与无控制幕工况相比，控制幕的阻挡导致底部有效过流断面减小，断面流速最大值增大，所取水体的垂向范围收缩。随着距出水口距离减小，两工况流速分布基本一致，因此，下泄水温主要取决于控制幕前所取水体的温度。由于两工况主流区主要位于水库底温层，底温层水温基本一致，表现为两工况下泄水温相差不大。

出水口位于水库底部时，表层底层同时过流运行方式控制幕底部正对出水口，控制幕底部过流水体受出水口牵引力作用远大于顶部过流水体，下泄水温主要由库底低温水决定，引起下泄水温较低。因此，为更加客观反映该运行方式调控下泄水温效果和流动规律，将出水口位置由水库底部变为淹没深度6.12 m。在取水流量 $2.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 、控制幕至出水口距离9 m保持不变的条件，模拟研究出水口淹没深度6.12 m时表层和底层同时过流运行方式改善下泄水温的效果，分析流动规律并揭示下泄水温成因。图8为5月份两工况坝前速度矢量与温度分布云图，图9为5月份坝前1.8 m和9.5 m(控制幕前)断面的流速分布。

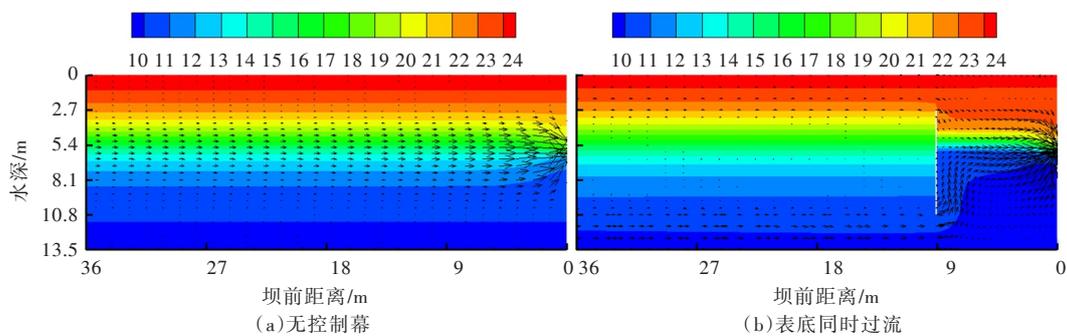


图8 表层底层同时过流与无控制幕运行方式坝前速度矢量及温度分布云图

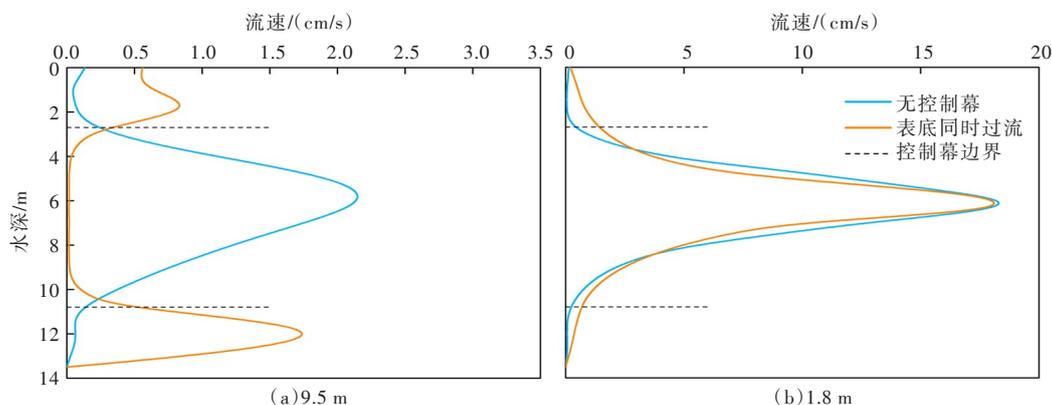


图9 坝前1.8 m和9.5 m断面流速分布图

通过数值计算, 3、5、10月表层和底层同时过流方式S2.7 B2.7工况下泄水温分别为11.05℃、14.93℃和20.79℃, 无控制幕工况下泄水温分别为11.27℃、15.59℃、20.52℃。与无控制幕工况相比, 3、5月下泄水温降低了0.22℃、0.66℃, 10月提高了0.27℃, 表层和底层同时过流运行方式下泄水温较低。由图6与图7可知, 无控制幕方式运行时, 出水口处存在较大温度梯度, 受温跃层的阻隔作用, 取水范围为出水口上下一定范围内的水体, 下泄水温对应于取水范围内某深度处水温。对于表层底层同时过流运行方式, 控制幕阻断了遮挡范围的水体流动, 表层高温水和底层低温水分别从控制幕顶部和底部通过, 高、低温水混合后流向出水口。由于受出水口牵引力和压强作用, 控制幕底部水体流速大于顶部水体流速, 下泄水体中低温水所占比重较大。随着距出水口距离减小, 两工况流速分布基本一致, 因此, 下泄水温主要取决于控制幕前所取表层高温水和底层低温水的掺混比例。

## 5 结论

本文通过试验直接模拟了水库水温分布, 研究了控制幕不同运行方式对下泄水温的影响; 利用数值模拟手段, 分析了控制幕表层和底层同时过流运行方式的流动规律, 探讨了下泄水温的成因。

(1)在水库水温分布、取水流量和控制幕至出水口距离不变条件下, 控制幕表层过流运行方式能够显著提高下泄水温, 控制幕表层和底层同时过流运行方式下泄水温取决于所取表层高温水和底层低温水的掺混比例。例如, 出水口位于底部时, 与无控制幕运行方式相比, 表层过流运行方式在10月份下泄水温最大提高幅度为9.05℃, 表层和底层同时过流运行方式控制幕阻挡较高温度水体的获取, 所取水体库底低温水占主导, 下泄水温降低了0.19℃。

(2)控制幕表层和底层同时过流运行方式主流区位于控制幕顶部和底部, 下泄水体由表层高温水与底层低温水掺混而成, 高温水和低温水的掺混比例影响下泄水温高低。例如, 出水口位于底部时, 下泄水体主要为库底低温水, 与无控制幕运行方式相比, 10月份该运行方式下泄水温降低了0.19℃; 出水口淹没深度为6.12m时, 下泄水体中高温水比例增加, 10月份该运行方式较无控制幕运行方式下泄水温提高了0.27℃。

(3)为减轻下泄低温水对鱼类繁殖、农作物生长及生态环境的不利影响, 在水库运行调度中, 可根据实际需求选择控制幕运行方式, 调控下泄水温。若下泄水温较原河道水温下降较大, 建议采用控制幕表层过流运行方式并调整淹没深度, 实现下泄水温的提高; 若下泄水温与原河道水温相差较小, 建议采用控制幕表层和底层同时过流运行方式, 通过调整控制幕顶距水面与控制幕底距库底的距离, 改变高温水和低温水的掺混比例, 使下泄水温更接近于天然河道水温。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 黄永坚. 水库分层取水[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [ 2 ] 张士杰, 刘昌明, 王红瑞, 等. 水库水温研究现状及发展趋势[J]. 北京师范大学学报, 2011(3): 316-320.
- [ 3 ] VERMEYEN T B. Application of Flexible Curtains to Control Mixing and Enable Selective Withdrawal in Reservoirs[C]//5th International symposium on stratified flows, IAHR. Vancouver, Canada, 2000: 457-462.
- [ 4 ] POLITANO M, HAQUE M M, WEBER L J. A numerical study of the temperature dynamics at McNary Dam[J]. Ecological Modelling, 2008, 212(3/4): 408-421.
- [ 5 ] 练继建, 杜慧超, 马超. 隔水幕布改善深水水库下泄低温水效果研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 942-948.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 高学平, 陈弘, 王鳌然, 等. 糯扎渡水电站多层进水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报, 2010(3): 126-131.

- [ 8 ] 高学平,任庆钰. 多层孔型取水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报, 2015(5): 103-107 .  
[ 9 ] 高学平,张少雄,刘际军,等. 浮式管型取水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报, 2013(2): 163-167 .  
[ 10 ] HAN Y, GAO X . Similarity theory of withdrawn water temperature experiment[J] . The Scientific World Journal, 2015; Article ID 429781 .

### **Investigation on the response of discharged water temperature to operation mode of the temperature control curtain**

GAO Xueping, SONG Qinglin, SUN Bowen

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A temperature control curtain could effectively mitigate the negative effects of discharged low temperature water on the river eco-environment downstream. However, the response of discharged water temperature to the operation mode of temperature control curtain and its formation mechanism are lacking. To investigate the effect of operation mode of temperature control curtain on the discharged water temperature, experiments were conducted based on a thermally stratified reservoir. Then, a 3-D numerical model was applied to analyze flow laws and explore the formation mechanism of discharged water temperature. The results indicated that the operation mode of surface overcurrent significantly improves the discharged water temperature. When running the operation mode of surface and bottom overcurrent, the high temperature water and low temperature water flowed from top and bottom of the curtain owing to the barrier effect of curtain, and thus the discharged water temperature depended on the mixing ratio of the high temperature water to the low temperature water. These findings are meaningful for the operation of temperature control curtain in thermal stratified reservoirs.

**Keywords:** thermally stratified reservoir; the operation mode of the temperature control curtain; discharged water temperature; experiment; numerical simulation

(责任编辑:李福田)

---

(上接第44页)

### **Study on flood forecasting scheme of Liangjiang Hydropower Station based on flood classification**

LI Kuang<sup>1</sup>, LIU Kexin<sup>1</sup>, LIU Jianjun<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Jilin Province Energy Power Group Co., Ltd. Liangjiang hydropower company, Yanbian 133600, China )

**Abstract:** According to the issue that the flood forecasting scheme has no consideration of flood magnitudes, taking the Liangjiang hydropower station as the example, this paper divides the flood into three grades: large flood, medium flood and small flood, and it adopts Xin'anjiang Model and real-time correction method to make the flood forecast scheme. Firstly, the Tyson polygon method is used to delineate the basin, and then the model parameters of different grades of floods are calibrated and verified using artificial experience and the particle swarm optimization method with the data of 2000-2016, and it also takes the average rainfall of the basin as the conditions of selecting model parameters. The results show that the parameters are suitable for different grades of floods, and the real-time correction method adopted can improve the prediction accuracy.

**Keywords:** liangjiang hydropower station; flood forecasting; flood classification; xin'anjiang model; PSO; real-time correction

(责任编辑:韩 昆)