

# 金盆水库热分层特性及扬水曝气系统运行效果研究

黄廷林, 谭欣林, 李 扬, 龙圣海

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 基于 MIKE3 软件建立黑河金盆水库三维水温模型, 该模型准确的模拟出了 2012 年水体垂向水温变化及水体热分层结构演变, 平均相对误差为 1.42%。针对气温、太阳短波辐射及入库流量对水体热分层结构的影响进行了系统的模拟研究。结果显示: 气温、太阳短波辐射与水体热分层的稳定性呈现正相关关系, 而入库流量则与其呈现显著负相关关系。引入 APE 水库潜在势能指数来评估金盆水库水体热分层稳定性, 并应用该模型, 对金盆水库水体 2014 年 9 月至 11 月自然分层状态下 APE 指数进行模拟, 与同时期人工强制混合条件下实测水体 APE 指数进行对比分析。结果表明, 扬水曝气系统的人工强制混合作用能够有效降低水体 APE 指数, 破坏热分层结构, 促进水体混合。实验结果可为扬水曝气水质改善系统的科学运行提供依据, 实现系统人工诱导混合, 高效节能的持续改善水质, 保障供水水质安全。

**关键词:** 热分层; 水温结构; MIKE3; APE 指数; 扬水曝气系统

中图分类号: TU2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)02-0270-07

## Study of the thermal regime characteristics and effect of water-lifting aerators operation on the Jinpen reservoir

HUANG Tinglin, TAN Xinlin, LI Yang, LONG Shenghai

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on MIKE3 software, a three-dimensional water temperature model of Heihe Jinpen reservoir was established. The model accurately simulates the vertical water temperature change and the evolution of the water thermal stratification structure in 2012 with an average relative error of 1.42%. Moreover, this model was validated by the field measured data in 2012 and used to simulate the influence on the thermal regime of Jinpen reservoir with different air temperature, solar short-wave radiation and inflow. The results showed that there is a positive correlation between temperature, solar short-wave radiation and the stability of the water thermal stratification, while the inflow is significantly negatively correlated with the stability of the water thermal stratification. APE index is one of the representation of water thermal stratification strength. The model is used to simulate the water temperature under the natural condition from September to November in 2014 and calculated the APE index, and compared with the APE index in the period of water-lifting aerators operation. The results showed that the water-lifting aerators can reduce the APE index remarkably and destroy the thermal stratification structure, and promote the mixing of water. The experimental results can provide basis for the scientific operation of the water-lifting aerators system to realize the artificial induction of the mixture, continuous improvement of water quality with high efficiency and energy conservation, and guarantee the water quality safety.

**Key words:** thermal stratification; water temperature structure; MIKE3; APE; water-lifting aerator system

水温和热量平衡是湖泊、水库最基本的物理过程, 对水体自身的理化过程及水生生物的新陈代谢有重要影响, 进而影响水质的演变及水生生态系统的演替<sup>[1,2]</sup>。对于深水型水库, 在高温时期, 水体由于垂向温度差异较大产生水体温度分层现象, 中层水体会以温跃层的形式存在底部等温层以上, 阻隔垂向水体的物质与热量交换, 等温

层水体处于缺氧状态, 严重时等温层溶解氧甚至降低至 0 mg/L, 在厌氧环境下, 沉积物中的氮、磷、铁、锰及有机质会向上覆水体中释放<sup>[3-5]</sup>。之后由于环境温度的降低, 水体进行自然混合, 导致下层受内源污染水体扩散到全层, 导致整个水体的氮、磷含量显著升高, 促进藻类等浮游植物的大量繁殖, 引发水体富营养化, 严重影响供水

收稿日期: 2017-03-14 修改稿日期: 2018-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378)

第一作者: 黄廷林(1962—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为水处理理论与技术和水质微污染控制与水资源保护。E-mail: hangtinglin@xauat.edu.cn

水质<sup>[6]</sup>。因此,开展水库热力学状况的研究有助于深入了解、认识水库水体的理化过程及生态演变规律,进而更好地保护水源水库水质。

自然环境及人为因素的改变会影响水库的热分层结构,进而影响水质。如气象条件的改变会影响水库的物理特性,包括水温结构、水体热交换、混合层厚度、水体分层的起止时间等<sup>[7]</sup>。曾康等<sup>[8]</sup>研究发现汛期高浊水的潜入会使金盆水库的热稳定性减弱,同时会恶化水质;Tuan 等<sup>[9]</sup>研究发现风速、风向上浅水湖泊中热量的混合作用会产生一定影响;刘明亮等<sup>[10]</sup>对新安江水库热力学状况及热分层的研究发现新安江水库表层和上层水温与气温存在显著的线性相关;孙昕等<sup>[11]</sup>对金盆水库的研究发现短波辐射是温跃层形成的主要影响因素;巨拓等<sup>[12]</sup>的研究发现在黑河金盆水库自然热分层末期应用扬水曝气技术可使水库提前混合,实现人工强制混合与水体自然混合的有机衔接,持续改善水质,保障供水安全。

基于 MIKE3 中的水动力及水温模型,对西安市黑河金盆水库的水体动态温度分层进行系统的模拟研究,探究气象及水力因素的变化对水体温度分层及其稳定性的影响,并比较了 2014 年实际运行扬水曝气系统与模拟的未运行扬水曝气系统的水库潜在势能 APE 值,旨在为扬水曝气系统科学运行提供依据,保障金盆水库供水水质安全。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

西安市黑河金盆水库位于陕西省西安市周至县境内(见图 1),东邻西安市鄠邑区;西接宝鸡市眉县;南靠陕西省汉中市城固县、佛坪县;北临兴平渭河中游段,距西安市主城区 86 km。黑河是其主干流,河流总长度为 91.2 km,位于秦岭深处,发源于秦岭山脉太白山北麓,四周地形陡峭,植被茂盛,人类活动少,没有工厂,无水污染,生态保护较好,是最佳的城市供水水源,其上游区域森林覆盖率达 46.5%,列为“太白山自然保护区”。黑河多年平均径流量为 8.17 亿 m<sup>3</sup>,是西安市径流量最大的河流,由一百多条支流汇成,其中流域面积大于 100 km<sup>2</sup> 的支流主要有板房子河、虎豹河、王家河、东河、沙河、田峪河、大蟒河等<sup>[13]</sup>。

扬水曝气系统(water-lifting aerators, WLAs)是一种综合性深水型湖库原位水质改善技术,该技术已经成功应用于国内数座饮用水水库,金盆水库 2010 年正式投入运行扬水曝气系统,共设置 8

台扬水曝气器,呈梅花型分散布置于水库坝址前主库区范围内,曝气器的设计间距为 250~300 m,具体布置如图 1。本次研究区域为自陈河口至大坝坝址处,其间无支流汇入,全长约 25 km。

### 1.2 数据来源

监测点 S1(坐标为 34°2'41''N; 108°12'39''E)位于库区取水口附近(见图 1),具有主库区最大水深,且位于水库中泓线处,能够较为准确的表征整个主库区的水体情况。自 2011 年起对 S1、S2 监测点进行持续的水体监测。使用美国 HACH 公司的 Hydro-lab DS5 型多参数水质分析仪进行原位的监测,主要监测的指标有水体的温度、水深等。其中温度的检测原理为热敏电阻法,有效测量范围为-5~50℃,测量精度达到±0.1℃。水深则采用压敏电阻法测量,测量范围 0~200 m,精度达到±0.1 m。检测区域为垂向水体自水面以下 0.5 m 至库底以上 0.5 m 区域,每间隔 5 m 进行检测,监测周期为每周一次<sup>[14]</sup>。

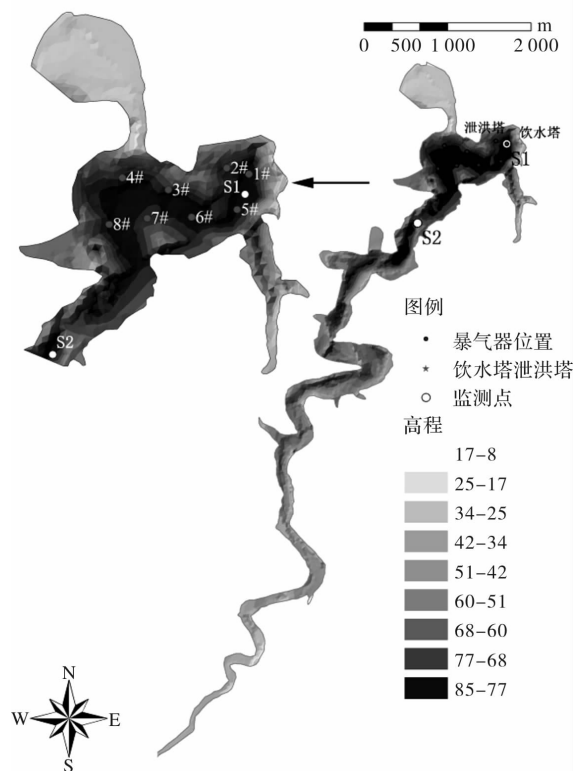


图 1 黑河金盆水库扬水曝气器及监测点布置图

Fig. 1 Arrangement of water-lifting aerators and monitoring points in the Heihe Jinpen Reservoir

模型所需要的气象数据的日平均值如太阳短波辐射、气温、降雨、蒸发、风速、相对湿度等由西安市气象局提供,水文数据如出、入库流及入库水温等的日平均值来源于市金盆水库管理局。

### 1.3 模型设置

MIKE3 软件是由丹麦水力学研究所研制的系列数值计算与模拟软件, 由于其具有较高的准确性和交互性, 广泛应用于湖库及河网的相关模拟研究<sup>[15]</sup>. 本研究应用 MIKE3 软件建立黑河金盆水库的水温及水动力模型, 探究气象及水力条件对水体的热分层结构的影响. 本研究的模拟区域为黑河水库全流域, 全长为 25 km, 地形资料为使用水深仪及手持 GPS 仪在 580 m 水位时期测定的实测库底地形, 模型采用三角非结构化网格, 总网格数为 4 856 个. 垂向网格划分采用 sigma 和 z-level 的混合划分, 水体表层至水下 20 m 水深区域采用 sigma 划分法, 均分为 8 层, 20 m 至库底区域使用 z-level 法进行划分, 均分为 10 层. 模拟的时长为 366 d, 自 2012 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日, 时间步长设置为 120 s. 模型中涉及的环境条件主要有库区及气象站提供的当地环境温度、空气湿度、水雨情. 初始条件为模拟开始时间水体的实测垂向水温、水位. 模型的边界条件主要是将库区的四周设置为陆地边界, 库底设置为带有底床阻力边界, 导入实测库区地形, 以上游入库口的出入库流量及水温条件作为模型的水动力学及水温模型的边界条件. 水平方向采用 Smagorinsky 模型, 垂向采用为  $k-\epsilon$  模型. 其水动力学模型及温度模型中的主要控制方程包括流体连续性方程、流体动量方程、 $k-\epsilon$  方程和温度的对流扩散方程:

连续性方程:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + g_i + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] + u_i s \end{aligned} \quad (2)$$

温度对流扩散方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(T u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_T} \right) + \frac{Q_H}{C_p} \quad (3)$$

$k$  方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \\ v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$\epsilon$  方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \\ c_{1\epsilon} \left[ v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + c_{3\epsilon} \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

上述各式中:  $\rho$  为水体密度,  $c_s$  为水的状态参数,  $u_i$  为  $x_i$  方向的速度分量,  $p$  为压力,  $g_i$  为重力矢量,  $v_t$  为垂向紊动粘性系数,  $\delta$  为克罗奈克函数,  $\beta$  为热膨胀系数,  $k$  为紊动动能,  $t$  为时间,  $T$  为温度,  $Q_H$  为热量交换量,  $c_p$  为水的比热,  $\sigma_T$  为普朗特数,  $\Omega_{ij}$  为克氏张量,  $s$  指各自的源汇项<sup>[17]</sup>.

根据近 10 年(2005~2014 年)的水文及气象资料, 选取其中典型太阳短波辐射量、气温、入库流量值, 设置 7 个模拟工况(SC0—SC6), 以探究金盆水库水体热分层对水文及气象条件的响应特征. 选取历年的平均水文、气候值作为模拟的基准工况(SC0), 因 2012 年年均值与近 10 年的年均值相对最接近, 故以 2012 年实测的气温、出入库流量作为日均值. 其他工况则以历年资料中出现的极端气候和水文数据作为模拟条件, 以期探究水文及气候的极端变化对水库热分层结构的影响. 具体工况设置如表 1 所示.

### 1.4 热分层稳定性指标

为了探究气象及水力条件对温度分层的影响, 引入水体热分层指数, 对水库热分层稳定性进行定量的数学表示. 目前国内外对于水体热分层稳定性定量计算的指标主要有 APE(Available Potential Energy)指数<sup>[18]</sup>、Lake number<sup>[19]</sup>、Schmidt 稳定系数<sup>[19]</sup>、Wedderburn 指数<sup>[19]</sup>和 RWCS(Relative WaterColumn Stability)指数<sup>[20]</sup>等.

表 1 不同模拟工况下水文与气象条件

Tab. 1 Hydrological and meteorological conditions under different simulated conditions

工况	影响因素	太阳短波辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	气温/(°C)	入流量/(×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
SC0	基准条件	345.5	18.3	5.44
SC1	强辐射	488.3	18.3	5.44
SC2	弱辐射	309.8	18.3	5.44
SC3	高气温	345.5	19.5	5.44
SC4	低气温	345.5	17.2	5.44
SC5	高入流	345.5	18.3	8.05
SC6	低入流	345.5	18.3	2.34

注: SC1-2 工况条件下太阳短波辐射量为 2007 年和 2005 年观测到的极端值; SC3-4 工况条件下的气温数据为 2013 年和 2011 年观测到的极端值; SC5-6 工况条件下的入流量数据为 2011 年和 2008 年上游水文站观测到的极端值; 其余数据则根据控制变量法取用基准工况下的数值.

其中, Lake number 指数主要用于描述由于风力引起的湖库水体内部混合过程, 不适用于深水型水库; Schmidt 稳定系数和 Wedderburn 指数计算需要大量的数据, 在数据处理及算法上相对较复杂, 并且其在深水型水库的应用较少, 难以得到客观的比较和结论; RWCS 指数仅考虑了表层与底层水体密度差异, 无法对水体的垂向温度分层结构进行准确的描述, 对于水体热分层结构稳定性的评价准确性较差. APE 指数其计算原理是计算水体完全混合所需要的位能, 因此, APE 指数较高说明水体热分层结构稳定, 反之说明分层结构较弱. 综合考虑各个指标的算法, 本研究选用 APE 指数作为评价黑河金盆水库热分层稳定性的指标, 其计算公式如下所示:

$$APE = \frac{1}{D} \int_{-D}^0 (\rho - \rho^*) g dz \quad (6)$$

式中:  $\rho^*$  为水体平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\rho$  为对应水层处密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D$  为总水深( $\text{m}$ ),  $g$  为重力矢量,  $z$  为积分运算中的微元深度<sup>[17]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的率定和验证

模型的部分参数是通过参考相关文献进行确定, 关键参数则是采用金盆水库 2011 年全年的实测水温及气象数据进行确定, 经过最终率定及调整确定参数值如表 2 所示.

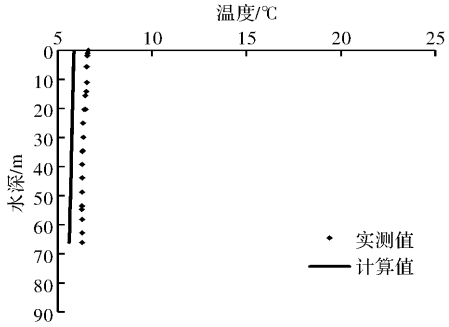
表 2 模型的主要参数

Tab. 2 The main parameters of the model

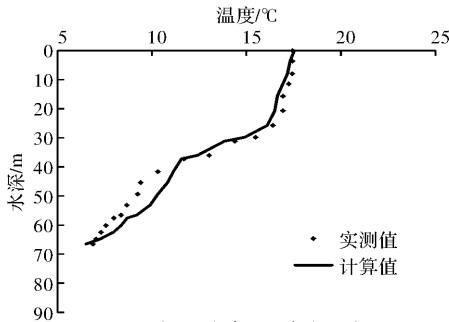
参数	物理意义	取值
$c_p$	水的比热	4 217 J/(kg · K)
$a_1$	道尔顿常量	0.5
$\beta$	水体表面吸收率	0.2
Dv	垂向温度扩散系数	0.05
$\lambda$	垂向光衰减系数	0.5 $\text{m}^{-1}$
TrenT	显热系数	0.05

分别选取水库混合期的 2 月、分层形成期的 5 月、稳定分层期的 7、9 月以及分层减弱期的 10 月和 12 月, 对监测点垂向断面的水温模型计算值与实测值进行对比分析, 结果如图 2 所示. 从图中可以看出模型计算值与实测值拟合较好, 能够较好模拟出水库垂向水温分布结构以及温度分层特征

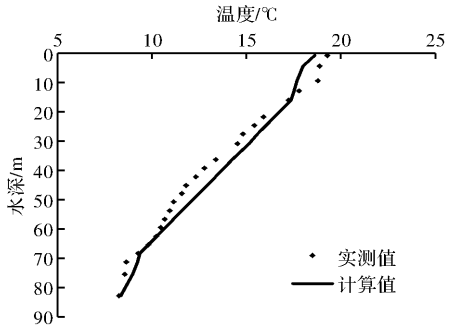
在垂向上的形成、发展过程, 对分层型的金盆水库水温结构演变规律具有较好模拟效果.



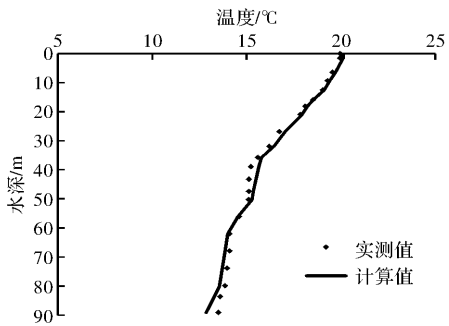
(a) 2月25日主库区垂向水温验证



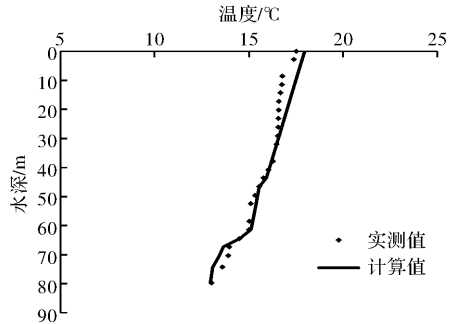
(b) 5月18日主库区垂向水温验证



(c) 7月17日主库区垂向水温验证



(d) 9月11日主库区垂向水温验证



(e) 10月14日主库区垂向水温验证

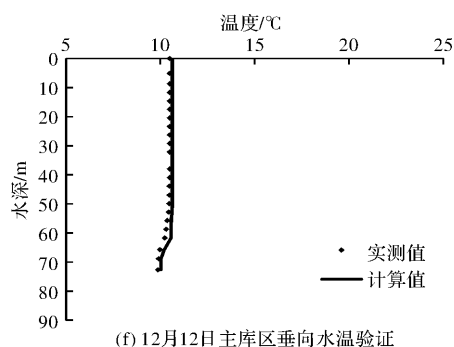


图2 2012年主库区垂向水温计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of calculated vertical profiles of water temperature in the reservoir with measurements in 2012

将相同水深处实测与模拟水温进行相关性验证(图3),所有的散点均紧密分布在 $y=0.99x+0.11$ 的直线附近,其判定系数 $R^2$ 为0.912(数据点个数 $n=552$ ),平均相对误差为1.42%,最大相对误差为8.2%,进而证明了所建立的水温模型对金盆水库三维水温有较好的模拟能力。

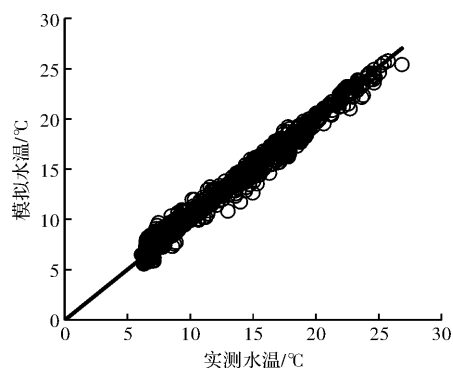


图3 实测与模拟水温相关性验证

Fig. 3 The verification of the correlation between the measured and simulated water temperature was verified

## 2.2 太阳辐射对热分层结构的影响

太阳辐射对水温的影响主要是通过热辐射的形式,水体对太阳热辐射进行吸收,传导、热对流,从而导致热量在垂向上相互传递.主要形式有表层水体对流传导、蒸发损失、太阳的长波辐射及短波辐射.对于深水型水库,表层的热交换对水体热分层影响相对较小,太阳短波辐射是中下层水体的主要能量来源.结合金盆水库水体实测水温及相关水质指标分析,得到APE指数与水体分层时期的对应关系,发现在分层形成期, $0.05 < APE < 0.9 \text{ J/m}^3$ ;稳定分层时期, $APE \geq 0.9 \text{ J/m}^3$ ;分层减弱时期, $APE < 0.9 \text{ J/m}^3$ ;自然混合时期, $APE < 0.05 \text{ J/m}^3$ .

结果表明(图4),高强度的太阳短波辐射条件下水体APE指数显著增加,但对水库分层的起止

时间没有明显影响.这是由于较强的太阳短波辐射能为中下层水体提供更多的热量,但由于其辐射强度随水深的衰减,底部水体受到的影响较小,从而导致垂向温差变大,水体温度分层结构得到增强.

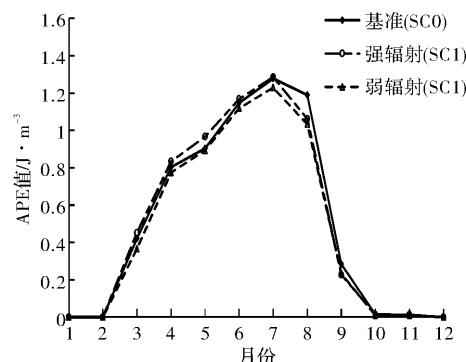


图4 太阳短波辐射对金盆水库热分层指数的影响

Fig. 4 Effect of solar shortwave radiation on thermal stratification index of Jinpen Reservoir

## 2.3 气温对热分层结构的影响

水库水体由于其更新周期较长,垂向水体的温度差异主要是通过太阳辐射及表面热交换造成<sup>[21]</sup>.因此,为探究环境气温对水体热分层的影响,将历年中发生的极端温度作为计算工况与基准工况进行对比模拟研究,结果如图5.可以得到,较高的环境气温会导致水体的APE指数升高,水体热分层结构稳定性增强,水体提前进入热分层状态,较基准工况条件下提早15 d,并且分层时期时长增加了6 d.而低气温状态下,水体的APE指数整体偏低,热分层开始时间与基准工况基本吻合,但持续时间有所减少,水体提前5 d进入自然混合期。

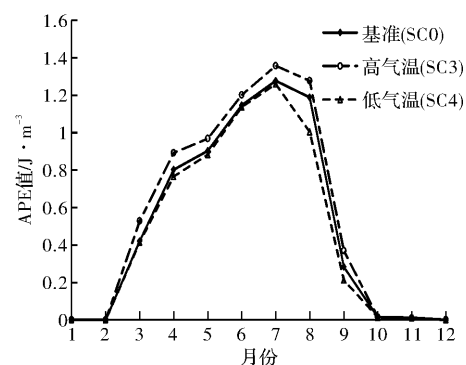


图5 气温对金盆水库热分层指数的影响

Fig. 5 Effect of air temperature on thermal stratification index of Jinpen Reservoir

## 2.4 入库流量对水温结构的影响

对于深水型水库,其水温结构的变化主要是由于垂向各个水层的热量传递分配造成的,包括

水体内部的热量传递以及外部热量的输入。水库其水量长期保持稳定, 水体流速较为缓慢, 所以通常情况下外部的热量输入较少。但通过之前对黑河金盆水库的相关研究发现, 在雨季, 连续的强降雨会导致入库流量快速增加, 暴雨所产生的径流由于温度及浊度的差异会以潜流的形式潜入到主库区水体密度相对应的水层处, 从而对水温结构有较大影响<sup>[22]</sup>。根据近十年的气象水文资料, 选取其中极端的入库流量进行模拟研究。水体 APE 指数的变化如图 6 所示。在高入流条件下, 水体在稳定分层期, 其 APE 指数较基准工况下低  $0.2 \text{ J/m}^3$ , 水体热分层结构稳定性减弱, 并且热分层结构提前 5 d 破坏, 水体提早进入自然混合时期。较低的入库流量导致水体处于相对稳定的状态, 从图 6 可知, 低入流条件下, 在分层初期其热分层结构较基准工况稳定, 平均 APE 指数为  $0.07 \text{ J/m}^3$ , 稳定分层时期虽然 APE 指数有所下降, 但热分层结束时期较基准工况延长 3 d, 表明低入流条件下有利于水体温度分层的形成及维持。

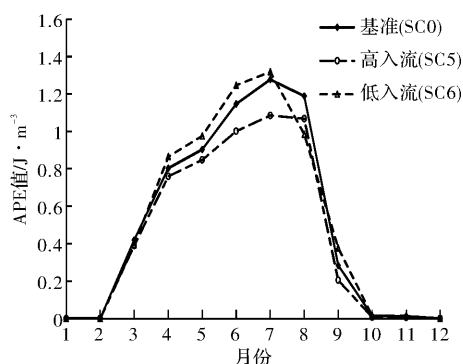


图 6 入库流量对金盆水库热分层指数的影响

Fig. 6 Effect of inflow on thermal stratification index of Jinpen Reservoir

## 2.5 扬水曝气系统对金盆水库热分层及水质的影响

由于温跃层的存在导致表层变温层与底层等温层之间热量、溶解氧及氮磷营养盐传质受阻, 等温层水体呈现一定程度的营养盐积累, 溶解氧传质受阻, 并且由于底部沉积物的耗氧作用, 导致等温层在温度分层时期处于缺氧甚至无氧状态, 而底部沉积物在厌氧状态下, 会向上覆水体释放氨氮、正磷酸盐、铁锰等物质, 导致水库季节性水质污染, 严重威胁水库安全供水<sup>[23]</sup>。

就 2014 年扬水曝气系统运行期间来看, 系统运行前, 金盆水库底层水体 TP、Fe、Mn 浓度分

别为  $0.041 \text{ mg/L}$ 、 $0.56 \text{ mg/L}$  和  $0.61 \text{ mg/L}$ , 系统运行 56 d 之后垂向水体混合, 水体 DO 由系统运行前的  $2 \text{ mg/L}$  以下上升到约  $9 \text{ mg/L}$ , TP、Fe、Mn 浓度分别降至  $0.013 \text{ mg/L}$ 、 $0.22 \text{ mg/L}$  和  $0.09 \text{ mg/L}$ , 达到了改善水质的良好效果。扬水曝气系统运行结束后, 水库呈完全混合状态, 垂向水体溶解氧保持在较高水平, 实现了水体的人工诱导混合。监测数据显示在自然混合时期水质亦保持良好状态, 达到了扬水曝气系统持续改善水质的效果。

金盆水库扬水曝气系统于 2014 年 9 月 5 日运行至 11 月 1 日, 系统的运行大幅的提高了底层水体溶解氧含量, 并提前破坏水体温度分层, 使水库提前进入混合状态。为了更加直观的得到扬水曝气系统运行对水体热分层的影响, 本研究基于 2014 年实际的水文及气象数据, 对 2014 年水体自然状态下的水温进行模拟, 并计算其 APE 指数, 将其与扬水曝气系统运行条件下实测 APE 指数进行对比研究。

结果如图 7 所示。在水体稳定分层时期, 水体 APE 指数最高达到  $1.09 \text{ J/m}^3$ , 扬水曝气系统的运行, 加快了水体垂向的物质能量交换, 降低了表层与底层的温差, 进一步使水体温跃层下潜, 至系统停止运行, 水体实测 APE 指数已降低至  $0.023 \text{ J/m}^3$ 。而模拟的自然状态下, 水体的 APE 指数下降缓慢, 至 11 月 1 日, 水体 APE 指数仍保持在  $0.2 \text{ J/m}^3$  左右。说明扬水曝气系统能够有效的降低水体热分层稳定性, 诱导水体自然混合。

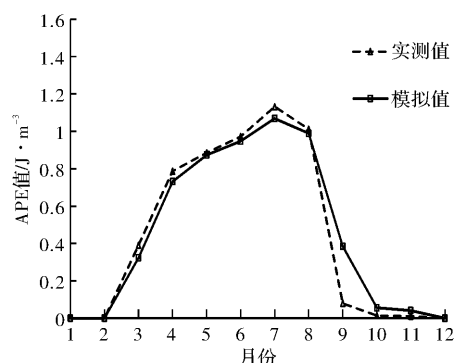


图 7 扬水曝气系统对金盆水库热分层的影响

Fig. 7 Effect of water-lifting aerator system on thermal stratification index of Jinpen Reservoir

## 3 结论

(1) 本研究基于 MIKE3 软件建立的黑河金盆

水库的水温模型能够准确模拟出水体的温度变化及热分层结构的演变过程,具有较高的可靠性,可用于水体温度的模拟及预测研究;

(2)模拟结果表明,气温及太阳短波辐射强度与金盆水库水体的热分层稳定性呈现显著的正相关关系,而入库流量则与热分层稳定性呈现负相关关系;

(3)扬水曝气系统可以有效的促进水库水体混合,加快破坏温度分层结构,具有很好的原位水质改善作用.模拟结果可为扬水曝气水质改善系统的科学运行提供依据,以实现人工强制混合与水体自然混合的有机衔接.

## 参考文献 References

- [1] O'REILLY CM, ALIN S R, PLISNIER P D et al. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa [J]. *Nature*, 2003, 424 (6950):766-768.
- [2] 吴志旭,刘明亮,兰佳,等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3):460-465.  
WU Zhixu, LIU Mingliang, LAN Jia et al. Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *J. Lake Sci*, 2012, 24(3): 460-465.
- [3] MERINO I M, MONROY R E, VILA CLARA G, et al. Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir [J]. *Aquatic Ecology*, 2008, 42(3): 335-345.
- [4] WILHELM S, ADRIAN R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53 (2): 226-237.
- [5] MINNS C K, MOORE J E, DOKA S E, et al. Temporal trends and spatial patterns in the temperature and oxygen regimes in the Bay of Quinte, Lake Ontario, 1972-2008[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2011, 14(1):9-20.
- [6] 吴丰昌,金相灿,张润宇,等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1):1-7.  
WU Fengchang, JIN Xiangcan, ZHANG Runyu et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment [J]. *J Lake Sci*, 2010, 22(1):1-7.
- [7] WANG S, QIAN X, HAN B P, et al. Effect of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China [J]. *Water Research*, 2012, 46(8):2 591-2 604.
- [8] 曾康,黄廷林,马卫星,等. 金盆水库汛期高浊水径流的潜入及热分层水体水质响应[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9):2778-2786.  
ZENG Kang, HUANG Tinglin, MA Weixing et al. Water-quality responses of the intrusion of high-turbidity runoff to the thermal stratified Jinpen Reservoir during flood season [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9):2778-2786.
- [9] TUAN N V, HAMAGAMI K, MORI K, et al. Mixing by wind induced flow and thermal convection in a small, shallow and stratified lake [J]. *Paddy and Water Environment*, 2009, 7(2):83-93.
- [10] 刘明亮,吴志旭,何剑波,等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. *湖泊科学*, 2014, 26 (3):447-454.  
LIU Mingliang, WU Zhixu, HE Jianbo et al. Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao)[J]. *J. Lake Sci*, 2014, 26(3):447-454
- [11] 孙昕,王雪,许岩,等. 一个分层水库温跃层的模拟与验证[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2):319-326.  
SUN Xin, WANG Xue, XU Yan et al. Numerical simulation and verifications on thermal stratification in a stratified reservoir [J]. *J. Lake Sci*, 2015, 27(2): 319-326.
- [12] 巨拓,黄廷林,马卫星,等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5):819-828.  
JU Tuo, HUANG Tinglin, MA Weixing et al. Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir [J]. *J. Lake Sci*, 2015, 27(5):819-828.
- [13] HUANG T L, LI X, RIJNAARTS H, et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 1(8):820-827.
- [14] 马卫星. 黑河水库水质变化规律及扬水曝气应用效果研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.  
MA Weixing. Research on the law of water quality change and the application of water-lifting aerator in Heihe reservoir[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [15] 张士杰,彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(10):1254-1258.  
ZHANG Shijie, PENG Wenqi. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(10): 1254-1258.
- [16] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation [S]. Denmark: DHI, 2014.

- terfacially driven transport by hydrodynamic slip: Diffusio-osmosis and beyond [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(18): 186102.
- [23] KARNIADAKIS G E, BESKOK A, ALURU N. *Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [24] JACOB N I. *Intermolecular and surface forces* [M]. San Diego: Academic, 1992.
- [25] BOCQUET L, CHARLAIX E. Nanofluidics, from bulk to interfaces [J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(3): 1073-1095.
- [26] CARDOSO S S S, CARTWRIGHT J H E. Dynamics of osmosis in a porous medium[J]. *Royal Society Open Science*, 2014, 1(3): 140352.
- [27] 王晓琳, 中尾真一. 低分子量中性溶质体系的纳滤膜的透过特性[J]. *南京化工大学学报*, 1998, 20(4): 36-40.
- WANG Xiaolin, NAKAO Shinichi. Permeation performance of nanofiltration membranes for systems of aqueous solutions of neutral solutes with low molecular weight[J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 1998, 20(4): 36-40.
- [28] 谢朋, 张忠国, 孙涛, 等. 正渗透过程中汲取质反向渗透研究进展 [J]. *化工进展*, 2015, 34(10): 3540-3550.
- XIE Peng, ZHANG Zhongguo, SUN Tao, et al. Research progress of reverse draw solute permeation in forward osmosis process[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(10): 3540-3550.
- [29] MEDVED I, ČERNÝ R. Osmosis in porous media: A review of recent studies[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2013, 170: 299-317.
- [30] 郑旭, 崔海航, 李战华. Janus 球形微马达的自驱动机理研究: 自扩散泳动与微气泡推进[J]. *科学通报*, 2017, (Z1): 167-186.
- ZHENG Xu, CUI Haihang, LI Zhanhua. The mechanisms of the self-propelled spherical Janus micromotor: Self-diffusiophoresis and microbubble propulsion [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, (Z1): 167-186.
- [31] NIJS B, BLAADEREN A, ROELAND J M, et al. Fuel concentration dependent movement of supramolecular catalytic nanomotors[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(4): 1315-1318.
- [32] LIU C, ZHOU C, WANG W, et al. Bimetallic microswimmers speed up in confining channels[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 198001.

(编辑 沈 波)

(上接第 276 页)

- [17] 龙圣海. 峡谷分层型水源水库水质变化特征及水温结构模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- LONG Shenghai. Water quality characteristics and water temperature simulation of a canyon-shaped, stratified, source water reservoir[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [18] KUMAGAI M, NAKANO S, JIAO C, et al. Effect of cyanobacterial bloom on thermal stratification [J]. *Limnology*, 2000, 1(3): 191-195.
- [19] READ J S, HAMILTON D P, JONES I D, et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high resolution lake buoy data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(11): 1325-1336.
- [20] BECKER V, HUSZAR V L M, NASELLI-FLORES L, et al. Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir [J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(5): 952-963.
- [21] MONIKA W, DANIEL E. S. Climate change uncouples trophic interaction in an aquatic ecosystem [J]. *Ecology*, 2004, 85(8): 2100-2106.
- [22] MA W X, HUANG T L, LI X, et al. Impact of short-term climate variation and hydrology change on thermal structure and water quality of a canyon-shaped, stratified reservoir [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(23): 18372-18380.
- [23] 周子振. 混合充氧对分层水库水质改善及微生物种群结构调控研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- ZHOU Zizhen. Study of water quality improvement and microbial community structure regulation of a stratified reservoir by mixing and oxygenation [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. and Tech., 2017.

(编辑 沈 波)