

向家坝水库水温时空特征及其成因分析*¹

龙良红¹ 徐慧¹ 纪道斌^{1*} 严萌³ 刘德富^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;

3. 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

【摘要】: 水温是水环境评价的重要因子之一, 其对水生态系统中的物理、化学和生物过程起着重要作用。为了分析向家坝水库运行期内的水温分布特征及其成因, 本文建立 CE-QUAL-W2 立面二维水温模型, 并基于 2014 年野外原位监测水温数据对模型可靠性进行了验证, 应用其对水温分布进行数值模拟。研究发现向家坝水库水温存在季节性垂向分层, 4~6 月中上层水体(水深 0~60 m)受入流水温和气温回升影响迅速升温, 表底温差达 10 °C, 垂向分层加剧; 7、8 月水库泄洪加快了库区水体交换, 底层水温迅速升高, 中间等温层水体厚度增加, 表底温差减小在 2 °C 内, 9 月以后表底温差进一步缩小, 垂向水温分层逐渐消失。通过分析发现: 气象要素、入流水温、电站取水口高程、泄洪方式成为影响向家坝水温分布的主要因素。入流水温的变化只影响水库水温波动范围, 对其垂向分层结构影响较低; 表层水温受气象条件影响显著; 取水口高程和泄洪方式决定了水温的垂向结构。

【关键词】: 向家坝水库; 水温; CE-QUAL-W2; 分层

【中图分类号】: TV697 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)05 - 0738 - 09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201705011

水温是水环境评价的重要因子之一^[1], 其对水生态系统中的物理、化学和生物过程起着重要作用^[2, 3]。修建水库一般使流速减小, 水深增加, 水体增大, 引起热量分布的改变, 在某种意义上, 水库水温的分布结构就表示着水库水体热量的时空分布特征。不同的湖泊和水库, 由于水文、气象、地形、地理位置、出水口位置、调度运行方式等因素的影响, 水库垂向水温会形成不同的变化特性^[4], 出现不同的水温结构, 一般由强到弱划分为 3 种类型: 分层型、过渡型和混合型^[5, 6]。对于分层型水库而言, 其水温结构在一年内呈现周期性的变化规律。在水体表面由于热对流和风吹掺混, 水面附近的水体产生混合, 水温趋于一致,

¹ 收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2017-01-13

基金项目: 973 计划前期研究专项(2014CB460601) [National Basic Research Program of China (2014CB460601)]; 国家科技合作与交流专项(2014DFE70070) [International Science and Technology Cooperation Program of China (2014DFE70070)]; 国家自然科学基金青年基金(51509086) [National Natural Science Foundation of China (51509086)]; 国家科技重大专项(2014ZX07104-005-01) [National Science and Technology Major Project(2014ZX07104-005-01)]

作者简介: 龙良红(1991~), 男, 硕士, 主要研究方向为生态水利和生态水工学. E-mail: 893310859@qq.com

***通讯作者** E-mail: 394816707@qq.com

这部分水体称为表温层(Epilimnion)，不同水体的表温层深度可能相差很大，主要取决于风力强弱和水体的稳定性；表温层以下的温度突变区，称为温跃层(Metalimnion)；温跃层以下，库底热容量变化平稳，水温很低且变幅不大，为停滞静水，称为滞温层(Hypolimnion)^[7-9]。水温分层加剧了水利工程的环境影响，因此了解水库水温特性显得尤为重要。近年来，水温数值模拟成为研究水库水温影响和管理的重要手段，通过建立水温数学模型来分析库区水温分布特性成为研究的主要技术方法。郑铁刚^[10]建立了全水库三维水动力-水温耦合数学模型，对丰满水库取水水温进行了详细预测；张士杰^[11]应用 MIKE 3 建立二滩三维水温模型，发现水库水温垂向分布呈现单温跃层和双温跃层两种形式；陈永柏^[12]采用宽度平均的立面二维水库水温数学模型研究溪洛渡水库水温分布，发现叠梁门的取水方式对下泄水温的影响显著；邓云^[13]采用立面二维 $\kappa - \epsilon$ 温度模型预测溪洛渡电站库区水温及下泄水温，发现改变水库调度方式可以减免下泄低温水对下游鱼类繁殖的影响。骆辉煌^[14]利用二滩水库水温实测数据，对 CE-QUALW2 模型进行率定验证，进而用来模拟向家坝、溪洛渡水库水温分布，研究发现溪洛渡水库水温分层较为明显，而向家坝水温分层不明显，同时表明 CE-QUAL-W2 模型适用于我国西南地区水库水温分布研究。

根据已有的研究，许多学者^[15, 16]通过不同的数学模型对向家坝、溪洛渡水库的水温进行过模拟研究，但多采用二滩水库的实测数据进行参数率定和验证，而缺少向家坝水库原位监测数据进行验证，给向家坝水库的水温模拟带来难度。同时，2012年10月10日向家坝正式下闸蓄水，2013年7月完成蓄水工作，水位达到防洪限制水位370m，经过两年的蓄水，已基本处于稳定期；加上上游溪洛渡水库2013年开始蓄水、白鹤滩2014年正式截流，是否会对向家坝水库水温分布产生影响，是否会形成新的水温分布格局值得深入研究；而以往的研究多基于历史多年水文资料，缺少现场水温数据验证，本研究正好基于2014年野外现场监测数据，增加了本文结论的说服力。本文通过建立 CE-QUAL-W2 立面二维水温模型，考虑到上游梯级水库的累积影响，选取2014年进行研究，分析上游溪洛渡蓄水初期向家坝库区的水温动态，并基于2014向家坝水库实测垂向水温数据对敏感性参数进行率定验证，保证了模拟水温的准确性和可靠性，同时利用数学模型来模拟不同条件下的水温变化，分析向家坝水库的水温特性及其影响因素，对工程设计、水库运行的改善和优化提供参考意义。

1 向家坝水库水动力模型建立

1.1 研究区域

向家坝水库位于云南水富县和四川省接壤的金沙江下游河段上，距水富县区仅500m，是金沙江水电基地下游4级开发中的最末一个梯级电站，为典型的河道型水库，上距溪洛渡水电站坝址157km，如图1所示。向家坝水库河段控制流域面积45.88 km² (占金沙江流域面积的97%)，多年平均流量3810 m³/s。水库面积95.6 km²，总库容51.63 亿 m³，调节库容9 亿 m³，回水区长度156.6 km。2012年10月10日向家坝正式下闸蓄水，2013年7月完成蓄水工作。向家坝水电站是国家西电东输中路通道的骨干工程，是长江防洪体系的重要组成部分，为不完全年调节水库。

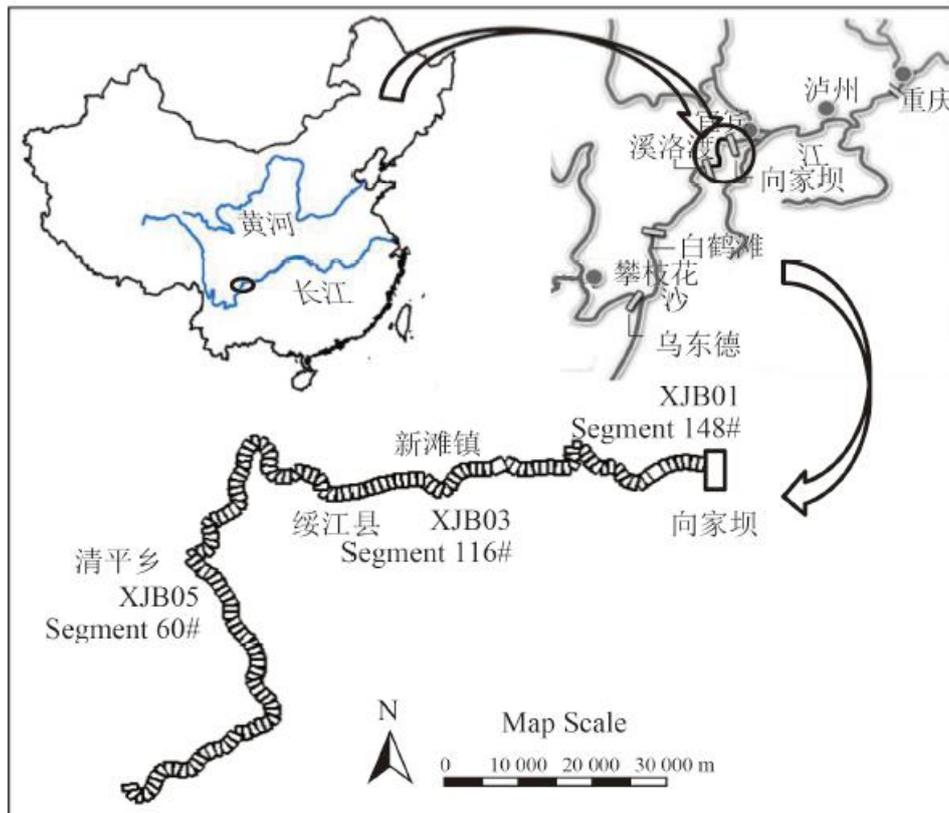


图 1 向家坝水库地理位置及网格平面图

Fig.1 Location and Grid Plan of Xiangjiaba Reservoir

1.2 模型简介

CE-QUAL-W2 模型是由美国陆军工程兵团水道实验站开发，后经波特兰州立大学改进的立面二维水流水质数值模型软件，在河流、湖泊、水库的水动力水质模拟中应用广泛^[17, 18]。该模型假定河流水体横向均匀，即横向上的流速、温度及各组分浓度的变化可以忽略，通过河流纵向的分段和垂向上的水体分层处理以及边界条件设定等进行模拟计算。因此，CE-QUAL-W2 模型适合模拟一些具有湖泊特性的河流，尤其适用于相对狭长的、在纵向和垂向上存在温度梯度水体的水质评估^[19]。

1.3 网格划分

根据网格划分原则，向家坝水库回水区长度约 150 km，底坡较为平缓，故划分为一个河段。库区被划分为 149×118(纵向×垂向)个矩形单元，纵向网格单元长度为 1 000 m，共 149 个 Segment(包括上下游各一个虚拟断面)；在垂向网格处理中，模型包括表底虚拟层在内共分为 118 层，层厚 1 m，考虑到模型顶部高程应高于向家坝水库正常蓄水位 380 m，故将模型顶部设置为 384 m，网格生成后的平面图如图 1 所示。

1.4 主要参数

影响水库水流特性和水温结构的因素较多，主要有气象条件、入流条件、出流条件、水库几何形态等。在 CE-QUAL-W2 模型的主要控制参数中，风遮蔽系数(WSC)用于修正测点风速与库区实际风速的差异，动态光遮蔽系数(Dynsh)用于考虑地形、植被

对太阳辐射的遮蔽作用^[20]，本文研究假定地形、植被对太阳辐射的遮蔽作用不随时间变化，因此未考虑植物长叶落叶、植物高度及太阳入射角变化等情况。纵向涡流粘滞系数(AX)、风遮蔽系数(WSC)直接影响水动力条件，从而影响热量和污染物质传输。水表面太阳辐射吸收系数(BETA)、纯水中太阳辐射消光系数(EXH2O)将直接影响水温，进而影响水体的水动力条件。底泥温度(TSED)取当地多年年平均气温 17.2 ℃。大量运用 CE-QUAL-W2 水动力模型的研究^[20~22]结果表明：纵向涡流粘滞系数(AX)、纵向涡流扩散系数(DX)等水动力参数对水温不敏感，结合本文对水动力参数敏感性分析的结果，对 AX、DX 等参数选取默认值 1 m/s²。而风遮蔽系数(WSC)、动态光遮蔽系数(Dynsh)、光衰减系数(EXH2O)以及曼宁系数(Manning)对水温的垂向分布影响较大，因此必须进行反复参数率定。

1.5 参数率定及验证

模型参数率定是通过修改模型中敏感参数后得到的模型模拟计算结果数据与实测数据对比，直至模拟结果与实测数据的误差结果满足要求为止。模拟计算最大时间步长为 600 s，最小时间步长为 1 s，模型计算过程中自动调整适应计算的时间步长。采用 2014 年的实测数据进行模型参数率定，经过反复试算，向家坝水库水动力模型的主要水动力参数取值见下表 1。本文对库湾水动力率定主要考虑库湾水温的空间分布，率定选取库湾采样点 XJB01(代表坝前-水富)、XJB03(代表库湾中游-新滩镇)、XJB05(代表库湾上游-彝族清平乡)。根据实测数据，分别选取库湾 2014 年 4 月 24 日(升温期、高水位 378 m 运行期)、8 月 15 日(汛期、低水位 372 m 运行期)、12 月 17 日(降温期、高水位 378 m 运行期)的模拟数据，模拟数据与实测数据对比结果如下图 2。由图 2 可以看出向家坝库湾上中下 3 个样点模拟水温与实测水温拟合效果整体较好，其中 2014 年 8 月 15 日库湾上游模拟水温略低，冬季模拟水温整体略低 0.3 ℃，模型的率定结果能够反映出向家坝库湾水体出现的水温分层现象及年内变化规律。根据模拟结果与实测数据的对比发现，靠近表层的水温误差相对较大，其产生的原因可能是由于库湾较长，本文采用绥江县气象数据作为边界条件，而模型气象边界条件沿程可能存在差异。

表 1 水动力参数取值
Tab.1 Hydrodynamic Parameters Value

敏感性级别	参数	名称	符号	是否率定	取值
1	风遮蔽系数	Wind Sheltering Coefficient	WSC	是	0.7
2	动态光遮蔽系数	Dynamic shading or static shading	Dynsh	是	0.7
3	光衰减系数	Water Extinction Coefficients	EXH2O	是	0.35
4	曼宁系数	Manning coefficient	MAN	是	0.04
5	太阳辐射表层吸收系数	Frac.of Solar Rad Absorbed at water surface	[BETA]	否	0.45
6	纵向涡流粘滞系数	Hor.Eddy Viscosity [m ² /s]	[AX]	否	1.0
7	纵向涡流扩散系数	Hor.Eddy Diffusivity [m ² /s]	[DX]	否	1.0
8	界面摩擦系数	Interfacial Friction [-]	[FI]	否	0.015

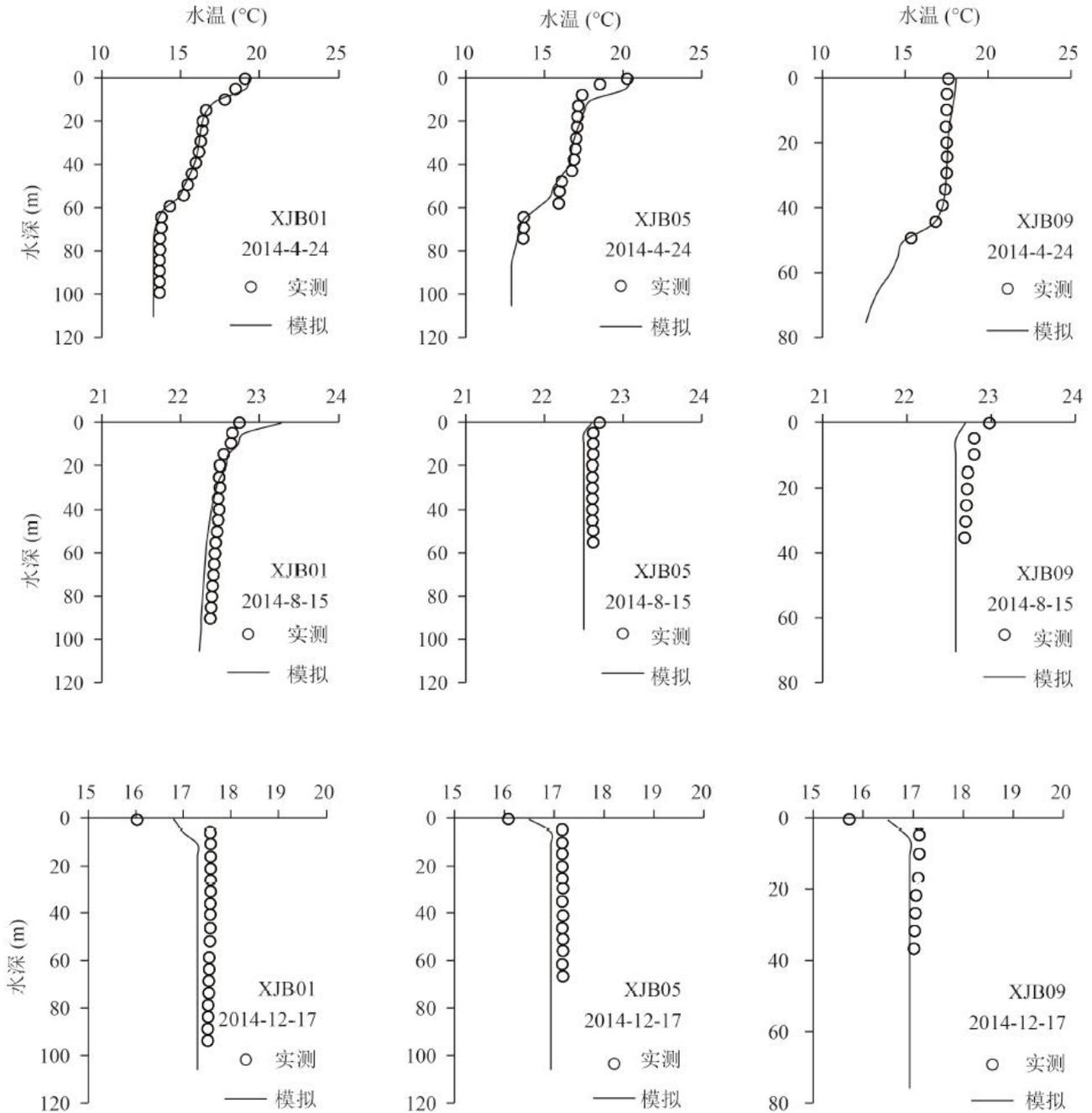


图2 模拟水温与实测水温对比

Fig.2 Comparison Between Simulated and Measured Water Temperature

2 向家坝水库水温时空分布

2.1 向家坝水库水温时间分布

对于向家坝水库的水温分布，不同学者^[14~16]已做了相关研究，得到的研究成果存在一定的差异，因此本文的研究具有重要的意义。骆辉煌^[14]等学者建立了向家坝水库的立面二维 CE-QUALW2 水温模型，采用二滩水库的实测水温数据进行模型参数率定，

而得到的结果是向家坝水库垂向水温在 10 月至次年 3 月同温；3~6 月水温分层逐渐加剧，最大表底温差 8 °C 左右；年内水温变化范围在 13 °C~25 °C。而黄薇^[15]通过建立宽度平均的立面二维水温模型分析向家坝水库的水温分布，基于平水年水文和全年平均水位 375 m 等条件，研究发现：向家坝水库坝前水温垂向分层不明显，表底最大温差仅 3.5 °C；联合运行水库最低水温 12.4 °C，最高水温 22.3 °C。为了更准确的反映水温的变化特性，本文运用现场实测数据进行模型的率定和验证，保证了模拟结果的可靠性。

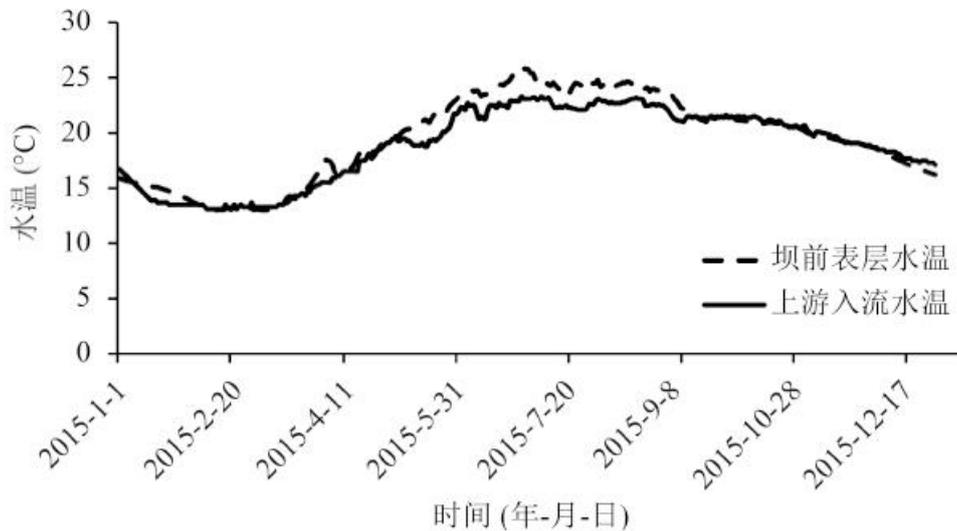


图3 坝前表层及上游入流水温过程

Fig.3 Water Temperature Series of Upstream Inflow and Surface Water Close to the Dam

运用率定好的水温模型模拟向家坝 2015 年库湾的水温分布，并结合上游溪洛渡水文站的实测数据，对比分析上游入流水温和坝前表层水温的年内变化。对比结果显示，向家坝库首、库尾水温均表现出春夏升温、秋冬降温的特点，最高水温出现在坝前 25.8 °C，年内变化幅达 12.5 °C。通过库首、库尾水温对比发现：坝前水温在春夏季较库尾高，最大温差达 3 °C；由于上游溪洛渡的蓄水影响，向家坝的入流水温趋于平坦化，水温日变化幅度较小，年内的水温变幅近 10 °C，秋冬季节水温降低过程较为平缓；越靠近坝首水流流速降低，水温受热升温越明显，向家坝的蓄水使库湾水温有进一步升高的趋势。

通过模型输出 2015 年逐月 15 日坝前垂向水温分布，如图 4 所示，从图可以看出：向家坝坝前表层水温 13 °C~25 °C，底层水温在 13 °C~22 °C 内变化；在库首垂向水温变化年内差别较为明显，存在明显的不分层、分层演替；10 月至次年 3 月水温垂向不分层，垂向水体掺混明显，4~8 月出现垂向水温分层，表底温差先增加后减小，随着 4 月份气温的逐渐升高，上层水体升温较为明显，下层水体水温也逐渐升高但较为缓慢，表底温差先增大后较小，最大温差出现在 5 月份。从水温分层的特性来看，春夏季节水库处于升温状态，入库流量较低，由于太阳辐射逐渐增强、气温回升，使得水库表层水体快速升温，并在水库上层水深 10 m 厚度内形成一个斜温层；随着上游入流水温的升高，在温度异重流的作用，上游来水的潜入深度逐渐上移，从表层水体下方进入库湾，在强烈的垂向紊流扩散作用下，形成一个厚度约 60 m 的中层等温层；而库底水体受紊流和热量传播的影响很小，水温变化较为缓慢，在距库底 20 m 的水深内形成温跃层，最大垂向水温梯度达 0.85 °C/m。

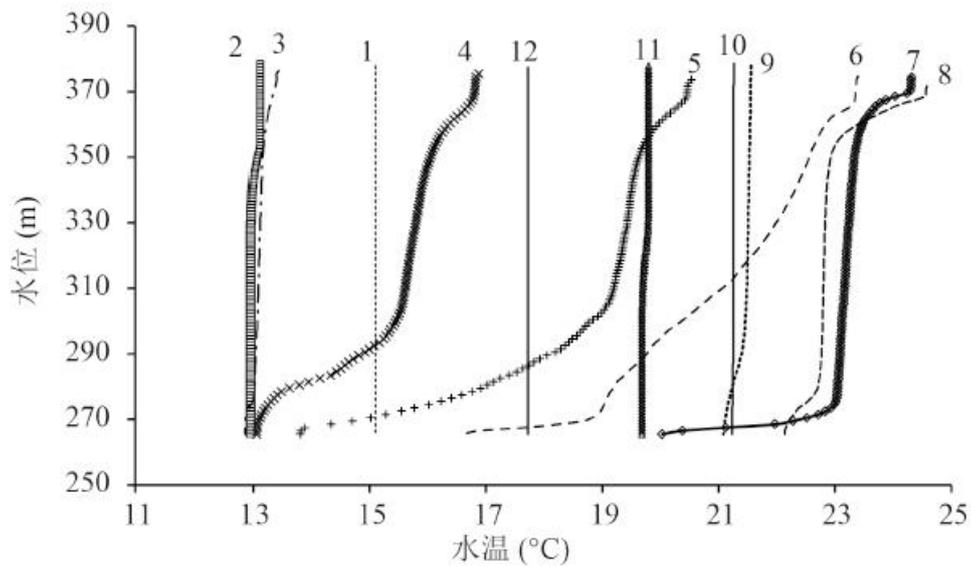


图4 坝前逐月垂向水温分布

Fig.4 Monthly Vertical Distribution of Water Temperature Close to the Dam

2.2 向家坝水库水温空间分布

通过验证的 CE-QUAL-W2 模型来模拟 2015 年向家坝每月的水温空间变化规律，通过 Tecplot 绘制 12 个月的水温分布图(本文仅展示了水温分层较为明显的 4、5、6、7 月份的水温空间分布，如图 5)。根据水温的空间分布特点，可以将整个库湾水温过程分为两个时段：4~8 月水温分层，9 月至次年 3 月水温不分层。分析发现 1、2 月份入流水温较低，库湾从上而下沿程水温略有升高，水库处于降温状态，水温在 13 °C~15 °C。3 月份气温回升，入流水温升高，上游水温略高于下游，太阳辐射增强，表层水温略高于下层水体，分层不明显。而 4~6 月份随着气温的回升，上游入流水温升高，表层水体升温明显，库湾中下游底层水体受紊流和热量传播的影响较小，水温回升较慢，库湾水温分层逐渐增强，表底温差达到 6 °C。7 月份，进入汛期入库流量加大，库湾纵向流速加大，水体的交换速率增加，底层低温水体的厚度减小，水温升高到 19 °C，表层水体受气温和太阳辐射影响，水温达 24 °C，表底温差有所减小。8 月份，由于水库泄洪加快了库区水体交换，在强烈的垂向紊流扩散作用下，底层水温升高，中间等温层水体厚度增加，表底温差进一步缩小。而 9 月份水库开始蓄水，在蓄水的强掺混作用下，库湾几乎处于等温状态，水温在 21 °C 左右，整个库湾温差在 0.5 °C 以内。之后，随着气温和入流水温的降低，水库逐渐处于降温状态，水温由 21 °C 逐渐降低至 15 °C，降温初期由于掺混作用的持续，库湾沿程水温几乎无差异，直到进入次年 1、2 月份，由于入流水温受气象影响更为明显，降温显著，使得库湾沿程水温出现轻微差异。

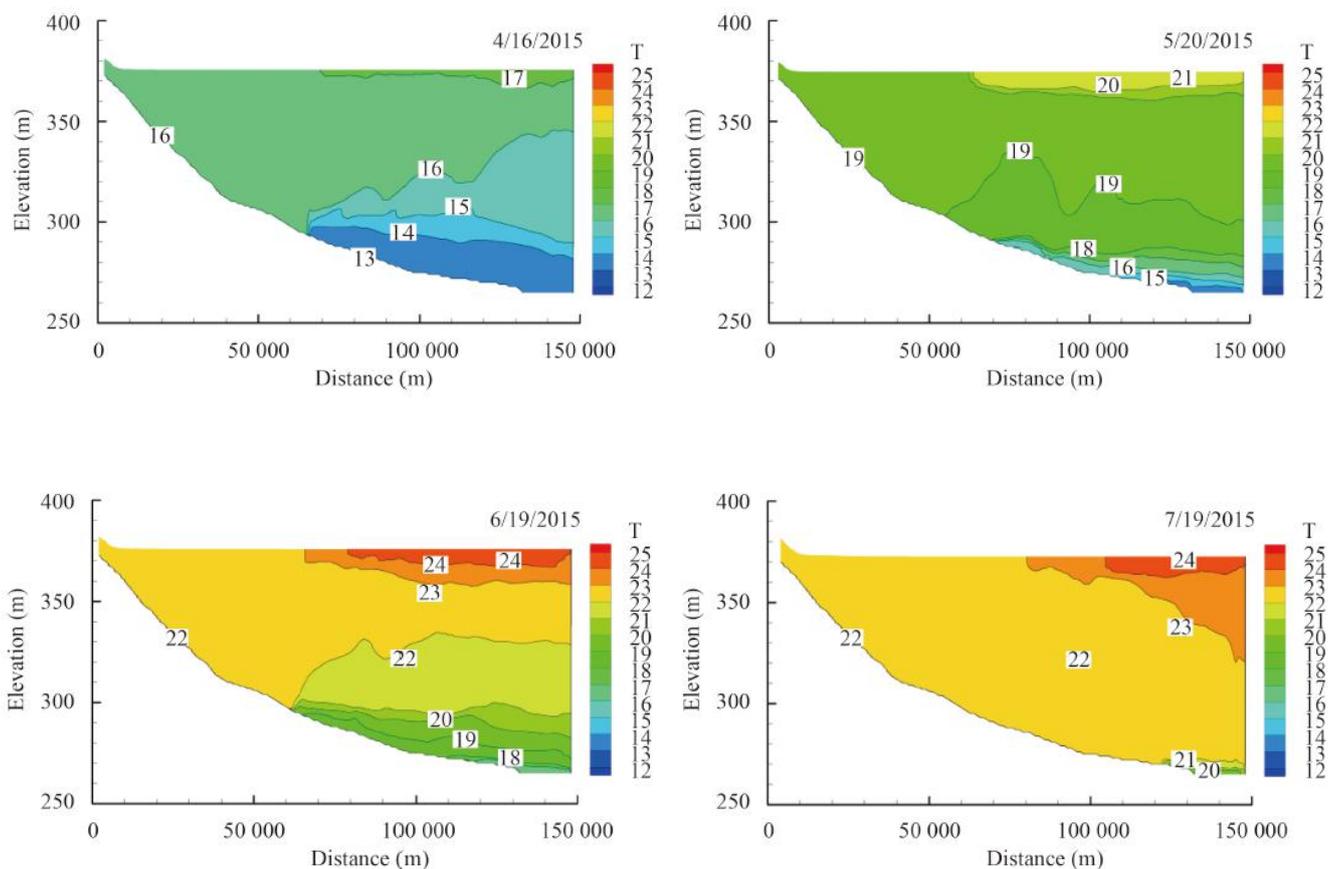


图 5 向家坝水库水温空间分布

Fig.5 Spatial Distribution of Water Temperature in Xiangjiaba Reservoir

3 向家坝水温结构成因分析

外部热量输入是水库水温结构形成的外因，而内因是库区内的水流形态。水库水温分布结构及动态变化是由来流水温、气象条件、径流特征、水库特性和运行方式等共同作用下形成的^[23, 24]。影响水库水温结构的因素较多，根据模型建立过程中边界条件的输入，主要因素包括气象、入流、出流以及水库几何形状等。气象因素包括气温、风速、风向、太阳辐射、云量等；入流条件包括：入流水温、流量大小；出流条件包括下泄流量以及出水口高程等。

向家坝水库 2012 年 10 月开始蓄水，目前水库处于稳定运行期，水库几何形状和水力条件逐渐稳定，而外部气象条件年际间具有随机性，本文不予考虑。向家坝水库的入流条件受上游溪洛渡水库的调节；而水库出流包括发电流量和泄洪流量，泄洪流量、泄洪方式与水库的调度运用有关。因此，本研究主要就上游入流水温和水库出水位置的变化来分析水库水温结构的变化。

3.1 上游来流水温的影响

利用率定好的 CE-QUAL-W2 水动力模型，模拟计算向家坝库湾的水温分布，并通过人为设置不同的入流水温条件，来模拟水库坝前水温的垂向分布，结合已有的实测数据，选取水温分层较为明显的夏季 8 月 10 日来分析。实际入流水温为向家坝 2015 年的上游来流水温，即溪洛渡 2015 年的下泄水温；入流水温加 1 表示将实际入流水温整体升高 1 °C，入流水温减 1 表示将实际入流水温整体降低 1 °C。通过模型计算，图 6 为向家坝不同来水温度条件下坝前垂向水温分布的模拟结果。结果显示：不同来

流水温条件下, 坝前垂向水温结构变化较大; 根据实测值显示, 8月10日坝前表层10m内水体受太阳辐射影响, 水温略高, 水深10~80m的水体垂向掺混明显, 水温差异较小为同温层, 底层水体受紊流和热量传播的影响较小, 水温略低。在上游入流水温增加1℃时, 进入水库的热量增加, 坝前垂向水温均有所增加且同等水深的水温增幅近似1℃, 但在表层10m内水温增加不明显。同样, 当入流水温减小1℃时, 坝前垂向水温均有所较小且同等水深的水温减幅近似1℃, 而表层水温的变化并不明显。可见, 表层水体的水温受来流水温影响较小, 而受气温和太阳辐射的影响更为显著, 库湾中下层的水温大小受来流水温的影响较明显, 但来流水温对垂向水温结构的影响较小。

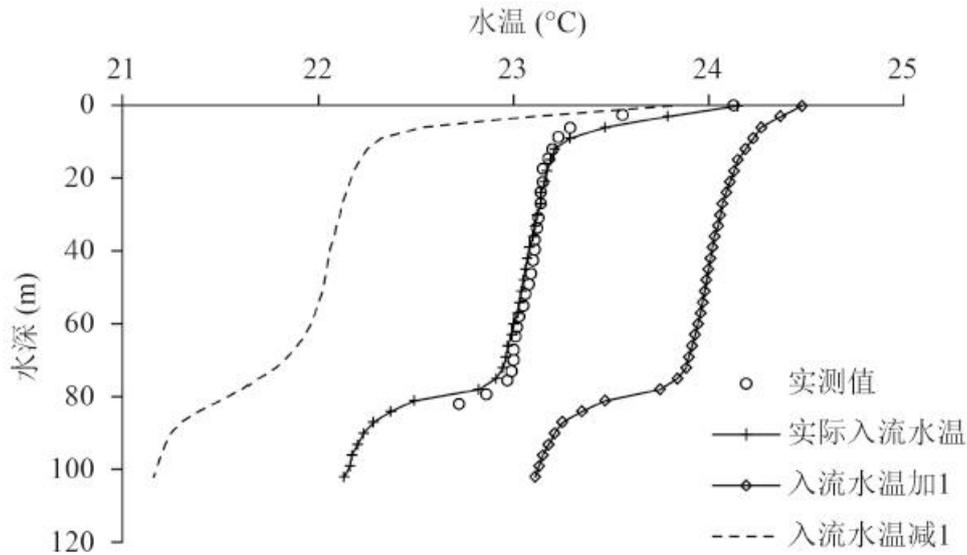


图6 入流水温对坝前垂向水温的影响

Fig.6 Effect of Inflow Water Temperature on Vertical Distribution of Water Temperature in Front of the Dam

3.2 电站取出水位置的影响

向家坝出水建筑物主要有电站引水口及泄洪建筑物表孔、中孔等。左岸电站取水口高程342.00m, 右岸电站取水口高程321.50m。为了分析发电取水口的高程变化对库湾水温结构的影响, 将模拟时段选取泄洪建筑物启用前的5月份。利用率定好的水温模型, 模拟2015年向家坝水库水温分布, 并人为调整模型的取水口高程, 分别将左右电站取水口上移、下移20m, 模拟计算水库取水位置对水库垂向水温结构的影响, 图7为2015年5月15日不同取水位置条件下坝前断面垂向水温分布模拟结果。结果显示: 将取水口高程上移20m, 导致出流形成的纵向水流向表层上移, 紊流在垂向方向的影响范围也随之较小, 使得坝前中层等温层厚度较小约15m, 其温跃层的深度有明显上移, 但厚度变化不显著, 库底水温有所降低, 但幅度较小; 将取水口下移20m, 造成的垂向水温结构变化与之类似, 同温层的厚度增加, 底层水温有略微升高。可见, 不同取水口高程下, 水温的垂向结构有所变化, 对于水温的垂向分层影响明显, 合理设计取水口高程不仅能控制下泄水温对下游的影响, 还能有效的改善坝前水温的垂向分布特性。

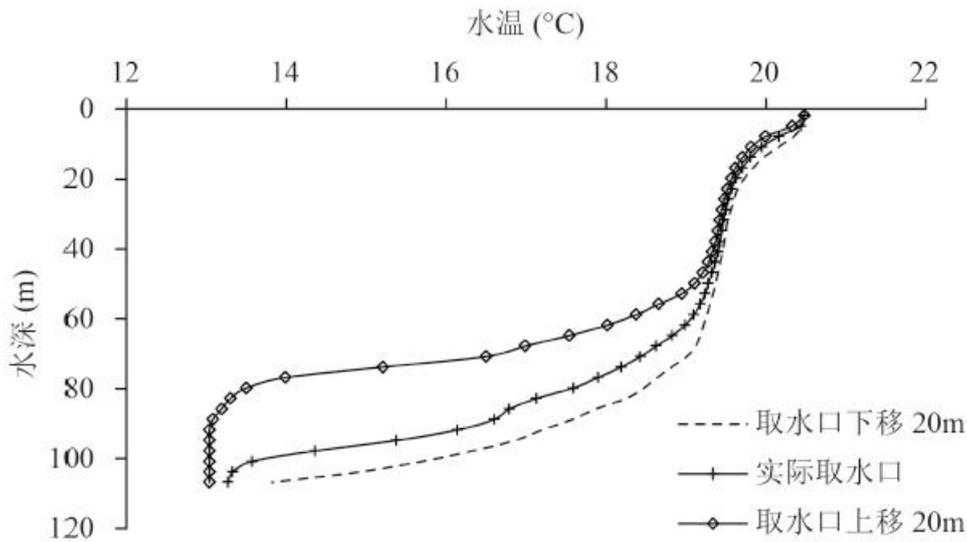


图 7 取水口高程对坝前垂向水温的影响

Fig.7 Effect of Water Intake Elevation on Vertical Distribution of Water Temperature in Front of the Dam

3.3 泄洪方式的影响

向家坝泄洪建筑物包括表孔、中孔。表孔堰顶高程 354 m，表孔控制断面尺寸(宽×高)8×26 m；中孔进口坎底高程 305 m，中孔控制断面尺寸(宽×高)6×9.6 m。根据向家坝 2015 年的运行调度情况，仅在汛期 7~9 月同时使用中孔、表孔泄洪，其他时段的出库流量仅为发电引用流量。为了分析泄洪方式对坝前垂向水温结构影响，分别设置 3 种不同工况：实际泄水方式(表、中孔结合)、仅中孔泄水、仅表孔泄水。运用水温模型分别模拟不同泄水方式下的水温分布，模拟结果如图 8 所示。仅使用表层泄洪方式和实际表、中孔结合泄洪形成的坝前垂向水温几乎相同，由于表孔高程和左岸电站进水口高程较为接近，出流形成的纵向水流处在中层区域，使得中层水体混合较为剧烈，水温梯度较小，对表层、底层水体的影响较小。当仅使用中孔泄洪时，中孔出流增加，使得底层水体的流动更为剧烈，导致紊流在垂向影响范围加大，出流形成的纵向水流下移，中间混合层水深增加；但靠近河床的底层仍未受到出流影响，水温和实际水温相近；而由于中上层水体出流减少，上层水体流动减弱，表层 20 m 水深内受太阳辐射水温略高，仅使用中孔使得表底温差增大，可见采用多种泄洪方式结合对于改善水温分层有利。

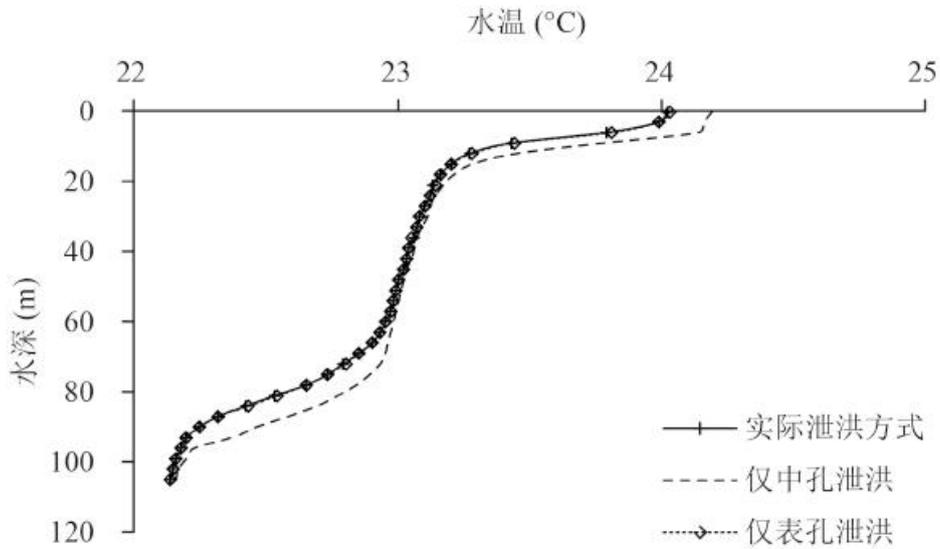


图 8 泄水方式对坝前垂向水温的影响

Fig.8 Effect of Discharge Way on Vertical Distribution of Water Temperature in Front of the Dam

4 结论

本文通过建立向家坝水库立面二维水动力模型，并利用实测水温数据对模型参数进行率定验证，再此基础上，分析了向家坝水库水温时空分布特性，并通过模型设置不同的入库、出库条件，模拟坝前水温垂向分布的变化规律，得到以下结论。

(1) CE-QUAL-W2 立面二维水动力模型能够用于向家坝水库的水温模型，能够很好的捕捉水温的时空变化和垂向分层演替过程，可以用于模拟向家坝水库的水温。

(2) 向家坝水库具有分层型和混合型水库的双重特性，4~8 月出现水温分层，9 月至次年 3 月垂向水温几乎不分层。春季气温回升，表层温升明显，水温分层逐渐加剧，汛期由于水库泄洪加快了库区水体交换，在强烈的垂向紊流扩散作用下，底层水温迅速升高，中间等温层水体厚度增加，水温分层减弱。随着秋季蓄水垂向掺混显著，水库水温转为混合型。

(3) 向家坝水库水温分布受入流水温、气象要素、出水口高程的影响显著，溪洛渡水库的建设使得向家坝入流水温平坦化、水温变化逐渐平缓，但入流水温只影响库湾水温的大小，不改变水温的垂向分布，而取水口高程和泄洪方式对坝前垂向水温结构影响更为显著，库区表层 10 m 内水温受气象要素控制更为明显。

参考文献:

[1] 曹广晶, 惠二青, 胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1254 - 1259.

【CAO G J, HUI E Q, HU X E. Analysis of the vertical structure of water temperature in the vicinity area of Three Gorges Dam since the Three Gorges Reservoir impounds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1254 - 1259.】

[2] DIAO W, CHENG Y G, ZHANG C Z, et al. Three-dimensional prediction of reservoir water temperature by the lattice Boltzmann method: validation[J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2015, 27(2): 248 - 256.

[3] 魏国良, 崔保山, 董世魁, 等. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 235 - 242.

【WEI G L, CUI B S, DONG S K, et al. Impact of hydropower development on river ecosystem service: a case study from the Manwan hydropower project[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 235 - 242.】

[4] 曹永中. 龙羊峡水库水温模拟及其对下游河道水温影响研究[D]. 西安: 西安理工大学硕士学位论文, 2008.

【CAO Y Z. Research on the water temperature simulation for Longyangxia Reservoir and influence on temperature of river downstream[D]. Xi'an: Master Dissertation of Xi'an University of Technology, 2008.】

[5] 周晨阳, 脱友才, 李克锋, 等. 瀑布沟水库水温影响调查[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S2): 27 - 33.

【ZHOU C Y, TUO Y C, LI K F, et al. Investigation into the influence of water temperature of Pubugou Reservoir[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(S2): 27 - 33.】

[6] 王雅慧, 李 兰, 卞俊杰. 水库水温模拟研究综述[J]. 三峡环境与生态, 2012, 34(3): 29 - 36.

【WANG Y H, LI L, BIAN J J. Review on reservoir water temperature simulation[J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, 34(3): 29 - 36.】

[7] ORLOB G T, SELNA L G. Temperature variations in deep reservoirs[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96(2): 391 - 410.

[8] JEZNACH L C, TOBIASON J E. Future climate effects on thermal stratification in the Wachusett Reservoir[J]. Journal-American Water Works Association, 2015, 107: E197 - E209.

[9] YAN F F, HAN L X, CHEN R X, et al. Water temperature modeling and water temperature stratification pattern of reservoir based on the Three-Dimensional environment fluid dynamics code model[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1073 - 1076: 2321 - 2326.

[10] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 大型分层型水库下泄水温对取水高程敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 714 - 722, 731.

【ZHENG T G, SUN S K, LIU H T, et al. Sensibility analysis of intake elevation on water temperature discharged from a large thermal stratified reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 714 - 722, 731.】

[11] 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 S J, PENG W Q. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir[J]. Journal of

HydraulicEngineering, 2009, 40(10): 1254 - 1258.】

[12] 陈永柏, 邓云, 梁瑞峰. 溪洛渡水电站叠梁门取水方式减缓下泄低温水的优化调度[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 340 - 344.

【CHEN Y B, DENG Y, LIANG R F. Impact of stoplog intake works on reservoir discharged water temperature[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(3): 340 - 344.】

[13] 邓云, 李嘉, 李然, 等. 水库调度对溪洛渡电站下游水温的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(5): 65 - 69.

【DENG Y, LI J, LI R, et al. Impact of reservoir operation on the water temperature downstream of Xiluodu power station[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(5):65 - 69.】

[14] 骆辉煌, 李倩, 李翀. 金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(4):256 - 259, 266.

【LUO H H, LI Q, LI C. The impact of water temperature during the fish reproduction in the upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(4): 256 - 259,266.】

[15] 黄薇, 陈进, 王波. 梯级开发对河流径流过程和水温过程均化作用的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 335 - 339.

【HUANG W, CHEN J, WANG B. Study on averaging effect of cascade hydropower development on flow and water temperature process[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(3): 335 - 339.】

[16] 王波. 梯级水库对河流生境因子的累积影响研究[D]. 武汉: 长江科学院硕士学位论文, 2008.

【WANG B. Cumulative impact study of cascade reservoir on river ecological factors[D]. Wuhan: Master Dissertation of Changjiang River Scientific Research Institute, 2008.】

[17] ZHANG Z L, SUN B W, JOHNSON B E. Integration of a benthic sediment diagenesis module into the two dimensional hydrodynamic and water quality model-CE-QUAL-W2[J]. Ecological Modelling, 2015, 297: 213 - 231.

[18] ROUNDS S A, BUCCOLA N L. Improved algorithms in the CEQUAL-W2 water-quality model for blending dam releases to meet downstream water-temperature targets[R]. US Geological Survey, 2015.

[19] TAK Y H, KIM Y D, CHONG S A, 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.

[20] 李艳, 邓云, 梁瑞峰, 等. CE-QUAL-W2 在紫坪铺水库的应用及其参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(10):1274 - 1278.

【LI Y, DENG Y, LIANG R F, et al. Application of CE-QUAL-W2 to Zipingpu Reservoir and sensitivity analysis of model parameters[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(10):1274 - 1278.】

[21] 陈冬平. 基于 CE-QUAL-W2 模型的山美水库水质模拟[D]. 福州: 福建师范大学硕士学位论文, 2012.

【CHEN D P. Simulation of water quality in the Shanmei Reservoir based on CE-QUAL-W2 model[D]. Fuzhou: Master Dissertation of Fujian Normal University, 2012.】

[22] 魏玉珍. CE-QUAL-W2 模型应用探讨[J]. 环境科技, 2009, 22(S2):40 - 44.

【WEI Y Z. Discussion on application of CE-QUAL-W2 model[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 22(S2): 40 - 44.】

[23] 薛联芳, 颜剑波. 水库水温结构影响因素及与下泄水温的变化关系[J]. 环境影响评价, 2016, 38(3): 29 - 31, 56.

【XUE L F, YAN J B. Study on the influencing factors of reservoir water temperature structure and the relationship with discharge water temperature[J]. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(3):29 - 31, 56.】

[24] 许岩. 分层水体跃温层形成与异重流演变特性[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2014.

【XU Y. Characteristics of the development of thermocline and evolution of density currents in stratified fluids[D]. Xi'an: Master Dissertation of Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.】