水　利　学　报
2021年1月　SHUILI　XUEBAO　第52卷　第1期

文章编号:0559-9350(2021)01-0111-09

# 三峡出库流量日调节模式驱动的重力波问题

纪道斌[1,2]，周哲轩[1]，杨忠勇[1,2]，龙良红[1]，王耀耀[1]
（1. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002；
2. 三峡大学 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站，湖北 宜昌 443002）

**摘要：**受三峡电站昼夜发电负荷不均的影响，三峡出库流量呈显著的日调节模式，驱动坝前水位以重力波形式在库区传播，对水库水动力特征产生着影响，但针对该重力波的生成和传播机理仍待研究。文中基于2018年1—10月三峡水库的出入库流量和库区多个站点上的水位等实测资料，分析了日调节模式下三峡水库坝前重力波的生成机理及其在库区430 km范围内的传播特征。主要研究结论包括：(1)坝前日调节重力波生成时，其振幅与昼夜下泄水量差成正比，与库区背景水位成反比，文中给出了相应的坝前水位振幅估算公式；(2)在河道底摩擦、断面形状沿程变化、干支流入流等多方面因素影响下，日调节重力波在坝前430 km范围内，其振幅呈现先减小后增大的趋势，其滞后相位沿程逐渐增加，且振幅和相位沿程变化特征受库区背景水位影响显著。

**关键词：**三峡水库；流量调节；重力波；沿程传播
**中图分类号：**TV131.3　**文献标识码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200407

## 1　研究背景

为满足调节洪水、蓄能发电、开发航运等需要，世界各大流域大都建有梯级水库[1-2]。梯级水库中，电站昼夜发电负荷不均会导致出库流量过程不稳定，进而驱动坝前水位的周期性波动，并以重力波形式沿河道传播[3]。库区重力波的形成和传播会对干支流水体产生扰动作用，使得原本被大坝拦住而动力显著降低的水体湍动作用增强[4]，混合层深度增大，水体滞留时间缩短，垂向分层状态减弱，使水体中的营养盐得到稀释和降解，从而影响干支流的藻类水华生长[5-7]。因此，有必要针对大坝出库流量周期性调节驱动的重力波特征开展研究。

针对三峡大坝流量日调节驱动的水位波动，目前大部分研究集中在其对下游河道的影响上，例如两坝间(三峡大坝与葛洲坝)的水位和流量波动特征，及其对航运安全和发电效率等造成的影响[8-9]，而对上游三峡库区的影响研究成果还相对较少。Long等[3]对坝前水位进行滤波分析表明，三峡大坝的日调节流量过程所驱动的水位波动振幅在0.1 m左右，而该水位波动传至库区支流香溪河(距离大坝34 km)时，能够以正压波的形式驱动整个支流水体做高频(2 h)往返运动，其流速大小甚至强过此前人们一直重点关注的重力环流[10-12]。这种支流水体的高频波动可增加水体的垂向交换过程，从而在一定程度上控制支流的富营养化特征甚至是水华生消模式，从而改善水质[13-14]。另外，库区重力波沿河道及支流传播过程中，会周期性地改变河床沉积物-水界面的剪切应力，从而加速沉积物的垂向输移和水库温室气体的释放[15-16]。

以上分析可知，相关已有成果大都集中在水位波动对水环境的影响上，而且主要关注点在水体

收稿日期：2020-06-08；网络首发时间：2020-10-26
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201023.1040.001.html
基金项目：国家自然科学基金项目(91647207，52079069，51779128，51879099)；国家留学基金委访问学者项目
作者简介：纪道斌(1981-)，博士，副教授，主要从事生态水利学研究。E-mail：dbji01101@163.com
通讯作者：杨忠勇(1984-)，博士，副教授，主要从事梯级水库水动力与水环境过程研究。E-mail：ayong0710@163.com

滞留时间长、富营养化问题严重的支流(如香溪河[3-4,7])，针对流量调节模式驱动的水位波动过程及其在库区干流的传播特征，研究成果还较少。针对三峡大坝泄流调节模式驱动的重力波在库区的形成及传播问题，文中基于2018年1—10月三峡库区的水位及流量等数据，尝试分析三峡水库重力波的生成机理及其在传播过程中的变形特征，从而进一步认识该重力波，研究结果可为库区水动力学及库区污染治理等方面的研究提供参考依据。

## 2　材料与方法

**2.1　研究区域概况**　三峡库区位于105°44′—111°39′E，28°32′—31°44′N的长江流域腹心地带，地跨湖北省西部和重庆市中东部的川鄂中低山峡谷和川东平行岭谷低山丘陵区，北靠大巴山，南依云贵高原，总体地势西高东低(图1)。三峡库区控制集雨面积约100万$km^2$，占长江流域面积的56%；年均径流量达4510亿$m^3$，约占长江年总径流量的49%，坝址断面多年平均流量14 300 $m^3/s$。三峡工程位于长江三峡西陵峡河段，工程建成后形成的水库，正常蓄水位高程175 m，设计预留的防洪库容为221.5亿$m^3$，为季调节水库[17]。由于三峡库区河段位于峡谷之中，因此蓄水后的库区河宽沿程束窄并不显著，主要在600 m至1200 m之间(图2)，但河道平均水深往上游沿程有明显的降低趋势。三峡库区拥有众多支流，但径流量较大的嘉陵江和岷江位于库区上游或库尾上游。本文研究的白沙沱至三峡大坝范围内，支流径流量均较小，具体见表1和2.2节。

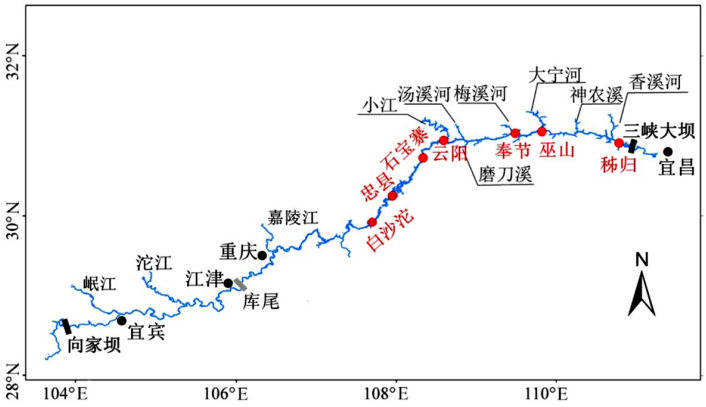



图1　三峡库区地理位置及监测站点(红点)分布

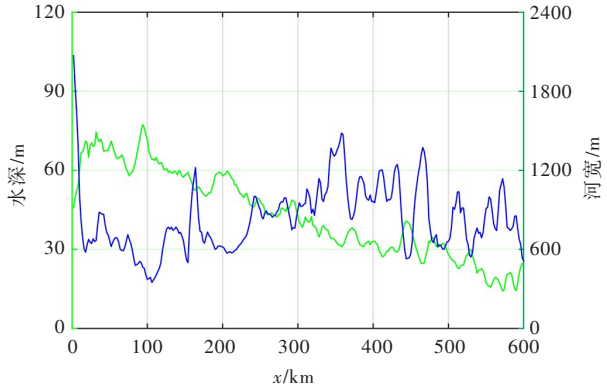



图2　三峡库区平均水深及河宽沿程变化特征(水位175m)

三峡全年一般采取枯季高水位发电、洪季低水位防洪的运营策略。图3中显示了2018年1—10月的大坝出入库流量和库区水位变化过程。1月三峡出库流量与入库流量大致相等，水位基本保持在约173 ~ 175 m。从1月底到5月初，水库水位整体呈缓慢下降趋势，然后于6月初调节至145 m左右，腾出库容防洪。从9月开始，水库逐渐蓄水，到10月中旬库区水位上升至约175 m，入库流量和出库

流量也基本维持一致。从图3中还可以看出，在水位相对稳定的枯季时段，出入库流量并非恒定值，而是一直处于高频波动中。

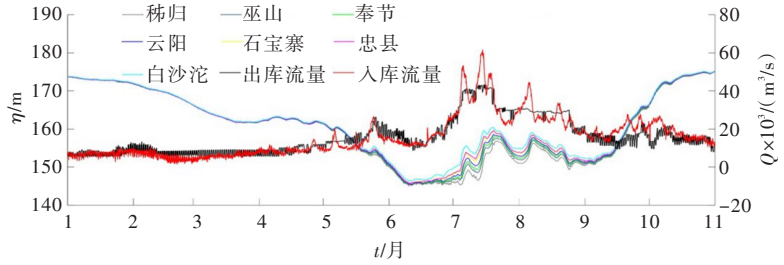



图3　三峡水库2018年1—10月各监测点的水位及出入库流量变化过程

**2.2　数据来源**　研究中所需观测数据主要包括库区干流沿程水位、三峡出库流量(三峡大坝)、入库流量(向家坝)和库区地形等。水位数据监测站点分布如图1所示(红色站点)，从大坝至上游包括秭归、巫山、奉节等七个站点。其中距离大坝最近的站点是秭归(约2 km)，最远的站点是白沙沱(约430 km)。水位数据时间分辨率为5 min，即每天288个数据，时间跨度为2018年1月1日至2018年11月1日。流量数据包括三峡大坝的出入库流量数据，时间跨度与水位数据一致，流量数据的时间分辨率为1 h，即每天24个数据。库区地形数据覆盖范围包括三峡大坝至白沙沱站点区域，数据的空间分辨率平均约100 m。此外，文中还统计了三峡大坝至白沙沱站之间流量较大(年均径流量大于20 $m^3/s$)的库区支流，主要包括香溪河、神农溪等，统计数据包括位置、河道长度、年均径流量等，具体信息见表1所示，其中每条河流的代码用于图8和图9中方便显示使用，位置表示与三峡大坝的距离。文中所有数据均由三峡集团提供。

表1　三峡库区支流信息统计

| 名称 | 代码 | 位置/km | 河长/km | 年均流量/($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|
| 香溪河 | XX | 34 | 94 | 47 |
| 神农溪 | SN | 78 | 60 | 20 |
| 大宁河 | DN | 123 | 162 | 136 |
| 梅溪河 | MX | 161 | 161 | 39 |
| 磨刀溪 | MD | 220 | 183 | 42 |
| 汤溪河 | TX | 223 | 104 | 55 |
| 小江 | XJ | 250 | 182 | 127 |

**2.3　研究方法**　本文主要研究方法包括小波变换和滤波分析等。其中小波变换主要用于分析三峡水库出入库流量的周期性变化特征，文中运用MATLAB的cwt函数对三峡大坝和向家坝的出库流量数据进行morlet小波变换，将时间系列数据分解到频域系列内，从而得到出库流量的周期性变化规律。滤波分析主要用于滤除水位波动中的低频波动过程，从而显示水位的日波动(每日一次)或半日波动(每日两次)过程。文中采用Butterworth滤波器对水位进行高通滤波，滤波器的主要参数包括：滤波器阶数$N$=20，通过频率$7.7\times10^{-6}$ Hz(约36 h)，样本频率$3.33\times10^{-3}$ Hz(5 min)等。为研究波高与流量之间的关系，文中采用上跨零点法识别每个周期中水位波动的最大值与最小值，从而计算波高和振幅。此外，针对三峡大坝逐日出库流量数据，文中判定其为日调节、半日调节或其他调节的方法如下。首先将每日流量数据复制延长至2倍(若不延长，无法得到日波动频率，若延长倍数大于2，不影响傅里叶分析结果)，然后做傅里叶分析。设分析结果中日波动频率(1 1/d)振幅为($Q_1$)，半日波动频率(2 1/d)振幅为$Q_2$，所有频率(1 ~ 12 1/d)振幅之和为$\sum Q_n$(此处最高频率12 1/d即为采样频率的一半)。根据如上结果，设立指标$F_1$和$F_2$，分别定义如下：

$$\begin{cases} F_1 = (Q_1 + Q_2)/\sum Q_n \\ F_2 = Q_2/Q_1 \end{cases} \tag{1}$$

其中$F_1$表示日频率和半日频率振幅之和与所有频率振幅之和的比值，若$F_1$>0.7，表示流量日调节或半日调节显著，反之则判定为其他调节方式。当$F_1$>0.7时，判定$F_2$值，若$F_2$>0.4，表示半日调节显著，反之则判定为日调节模式。上述判断方法主要参考河口动力学中潮汐特征判定方法而定[18]，两个阈值(0.7和0.4)的选择根据实际程序执行中的经验所得。

## 3　结果与分析

**3.1　三峡水库流量及水位波动特征**　图4中显示了2018年1月至10月三峡大坝和向家坝出库流量的小波分析结果。三峡大坝出库流量有显著的日波动特征(频率1 1/d)和半日波动特征(频率2 1/d)，其中更高频的波动主要由小波分析误差所致。三峡出库流量最为显著的日波动振幅约为1500 ~ 2500 $m^3/s$，半日波动振幅显著降低，仅约1000 ~ 1500 $m^3/s$，且分布时段较短。相比较而言，向家坝出库流量的日波动和半日波动特征(图4(b))则均不显著。另外，本文研究区域集中在三峡库区从坝前到430 km的白沙沱站点范围内(图1)，该范围距离库尾约170 km，距离向家坝约410 km，且其中有约240 km的自然河段(图1)，自然河段会大幅削弱向家坝不规则波动的出流特征[19]。基于以上两点原因，文中认为三峡库区的重力波主要由三峡大坝的周期性流量调节模式驱动，向家坝入流影响较小。

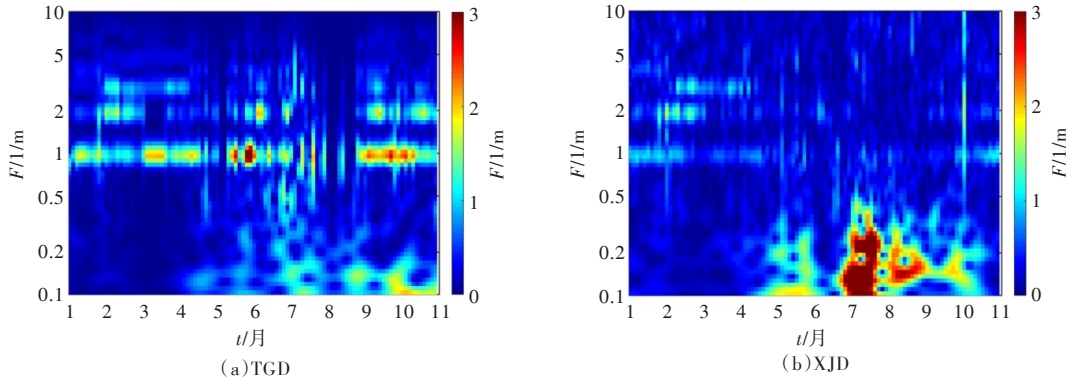



图4　三峡和向家坝出库流量小波分析结果

三峡大坝的出库流量调节模式主要可分为三类，即日调节模式、半日调节模式和平稳或不规则出流模式，其中日调节和半日调节模式主要出现在枯水期水位较高的时段，为满足昼夜发电量不均的要求而发生。图5中分别显示了三种出库流量调节模式下，库区水位的波动过程，其中水位波动数据已通过高通滤波处理(详见2.3节)。在日调节模式下(图5(a))，出库流量一般于每天的10:00左右由低流量调节至高流量，而在每天的22:00左右回落至低流量状态。在白天的高流量状态下，库区坝前水位(如秭归站，图5(a)黑实线)会不断下降，而在夜间的低流量状态，坝前水位又会不断回升，形成每日一涨一落的波动特征。坝前水位的升降过程又会以重力波的形式向库区上游传播，致使上游其他站点相继出现水位升降过程。

半日调节模式如图5(b)所示，该模式出库流量于每日13:00左右会发生一个下降过程，然后再回升至高流量状态，因此每天会出现两段高流量时段，两段低流量时段。对应地，库区坝前水位(如秭归站，图5(b)黑实线)，在两个低流量时段均会逐渐上升，在高流量时段均会下降，形成每日两涨两落的水位波动特征。与日波动过程类似，坝前水位的半日波动过程也会以重力波的形式向库区上游传播，驱动上游其他站点的半日波动。图5(c)中显示了在三峡出库流量比较平稳的时段内，库区各站点的水位波动过程，可以发现库区各站点均只有一些高频未知的波动过程，且其波高明显小于图5(a)和图5(b)中的日波动或半日波动。因此我们认为库区水位的周期性波动与三峡出库流量波动显著相关，而与向家坝出库流量的关系不明显。下文将以流量日调节驱动的水位波动为例，进一步分析三峡大坝流量调节模式驱动的水位波动特征和库区传播过程。

**3.2　库首重力波生成机理**　三峡出库流量波动首先会驱动库首水位波动，进而以重力波形式向库区上游传播。本节中将从水动力连续方程的角度，分析库首水位波高特征与三峡出库流量波动之间的关系。如图6所示，为讨论方便，假定三峡泄流呈梯形过程($Q(t)$)，则坝前水位(红色虚线)会在高流量区间下降，在低流量区间上升，其中高、低流量以平均流量(<$Q$>，图6(a)黑色虚线)区分。下面根据一维河道连续方程推导其驱动的水位波动，控制方程为：

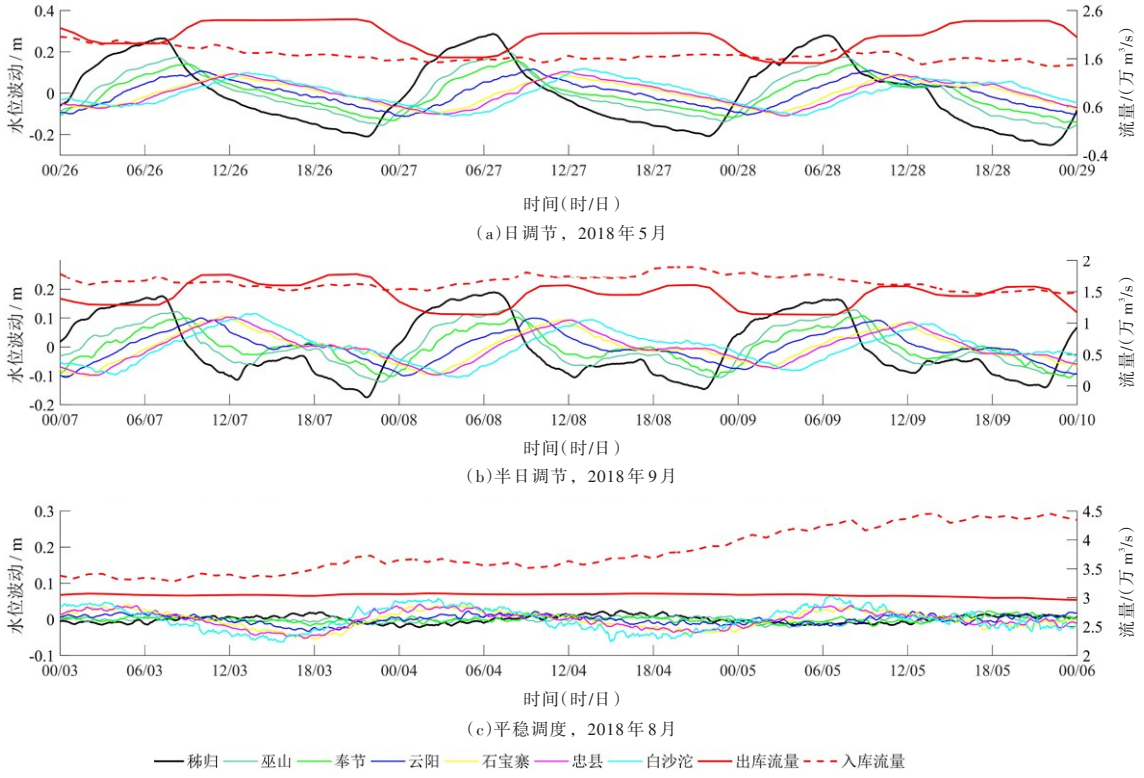



图5　三峡出库流量调节模式及其驱动的水位响应过程

$$B\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{2}$$

式中：$\eta$ 表示水位；$t$ 表示时间；$Q$ 表示流量。由于本节中仅讨论库首水位与出库流量之间的关系，同时为方便讨论，假定方程(2)中河槽宽度($B$)为常数。在一个日调节周期内，设出库流量高于平均流量的时段为 $(t0\sim t1)$，此时段内水位会逐渐由 $\eta_0$ 降低至 $\eta_1$，将方程(1)在高流量时段 $(t0\sim t1)$ 积分：

$$B\int_{t0}^{t1}\frac{\partial \eta}{\partial t}\mathrm{d}t+\frac{\partial}{\partial x}\int_{t0}^{t1}Q\mathrm{d}t=0 \tag{3}$$

并整理可得：

$$B\left[\eta(t1)-\eta(t0)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\int_{t0}^{t1}Q\mathrm{d}t=0 \tag{4}$$

式(4)中 $\left[\eta(t1)-\eta(t0)\right]=-H$，其中 $H$ 表示该时段内的波高。$\int_{t0}^{t1}Q\mathrm{d}t=W_1$ 表示该时段内坝前的出库总水量，参考图6(b)，式(4)的左边第二项可写为：

$$\frac{\partial W_1}{\partial x}=\frac{W_1-\langle W\rangle}{\Delta x} \tag{5}$$

式中 $\Delta x$ 表示大坝出口流量波动时，库区水位的响应距离(图6(b))，在该距离的上游端，库区来流量假定保持为平均流量 $\langle Q\rangle$，即 $\langle W\rangle=\langle Q\rangle\cdot(t1-t0)$，则式(4)可进一步表达为：

$$-HB+\frac{W_1-\langle W\rangle}{\Delta x}=0 \tag{6}$$

同理，出库流量低于平均流量的时段为 $(t1-t2)$，此时段内水位会逐渐由 $\eta_1$ 升高至 $\eta_0$。将方程(2)在时段 $(t1-t2)$ 内积分并整理可得到：

$$HB+\frac{W_2-\langle W\rangle}{\Delta x}=0 \tag{7}$$

将方程(6)和方程(7)相减，并整理可得水位波动的表达式为：

$$H=\frac{W_1-W_2}{2B\Delta x} \tag{8}$$

上式中，令 $\Delta W=W_1-W_2$ 表示高低流量期间下泄的水量差值，令 $S=B\Delta x$ 表示水库响应段的表面积，同时采用水位波动的振幅 $A=H/2$ 带入上式，可得：

$$A=\frac{\Delta W}{4S} \tag{9}$$

上式中水库响应段表面积 $S$ 与背景水位 $(\eta)$ 相关，假定二者之间呈线性关系，令：

$$S=a_1\cdot\eta+b_1 \tag{10}$$

将式(10)带入式(9)，并合并待定系数，可得振幅与泄流水量差($\Delta W$)和背景水位($\eta$)之间的表达式为：

$$A=\frac{\Delta W}{a\cdot\eta+b} \tag{11}$$

通过三峡大坝的实测出库流量和秭归站的波高，可通过拟合求得待定系数 $(a,\ b)$，从而得到坝前水位振幅估算公式：

$$A=\frac{\Delta W\times 10^{-7}}{2.34\cdot\eta-260.24} \tag{12}$$

需要说明的是，由于推导过程中假定水位与面积呈线性关系，导致方程(11)两端量纲不对等。公式(12)的拟合结果如图7所示，其数据来源于2018年1月至10月中，三峡泄流日调节过程驱动的秭归站水位波动实测数据。图7中阴影部分表示误差在0.03 m内。根据图7，实测结果和拟合结果均表明三峡出库流量日调节模式驱动的坝前水位振幅约在0.04 ~ 0.30 m之间，主要误差出现在水位振幅较高的情况，误差来源可能包括上游及库区各支流的影响、库区其他波动的影响(例如风浪)以及式(11)在推导过程中的假定等。总体来说式(12)的拟合结果与实测结果误差较小($R^2$=0.72)，在可接受范围之内，可用于估算坝前水位波高。

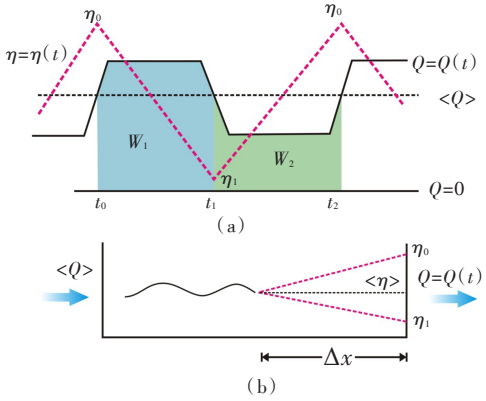



图6　三峡日调节重力波的生成示意

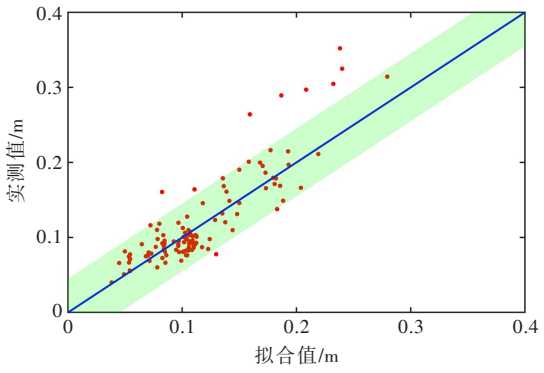


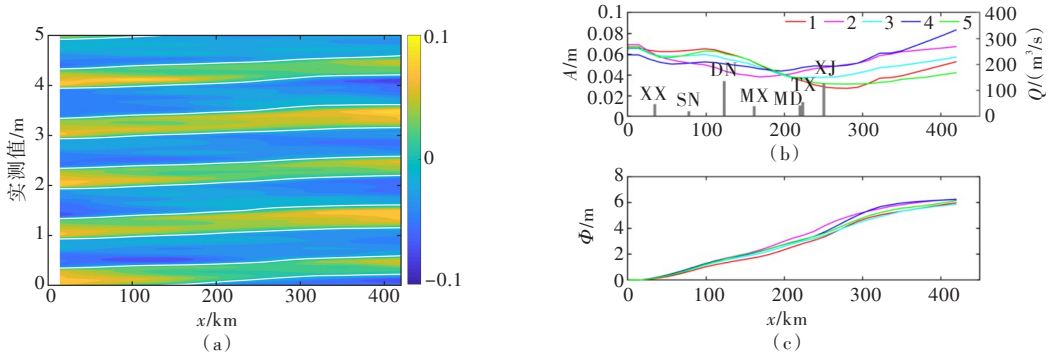

图7　秭归站实测振幅与拟合振幅对比

**3.3　库区重力波传播特征**　重力波在坝前生成后，会向库区上游传播，期间重力波振幅会不断发生变化，相位也会逐渐滞后。重力波振幅的变化受到多方面因素的影响，包括底摩擦、地形变化、与上游或支流水体相互作用等。其中底摩擦和支流作用会不断耗散波能，导致振幅降低；地形的束窄(或拓宽)会使波能发生汇聚(或发散)，从而增高(或降低)振幅[20]。本节中将通过两个典型时段上(不同库区水位)的水位振幅和相位沿程变化过程，分析重力波在库区的传播特征。

图8中显示了2018年1月11日0:00至1月16日0:00，背景水位约172.8 m情况下，5天内的水位波动特征(高频滤波后，图8(a))以及这5天的振幅($A$)和滞后相位($\Phi$)沿程变化特征(图8(b)(c))。该5天内，库首生成的重力波振幅约0.06 ~ 0.07 m，其向库区上游传播过程中，在约250 km范围内，波能逐渐耗散，波高逐渐降低，而在250 km后，由于水深变浅，河道断面束窄导致波能汇聚增强，且上游再无较大的支流(430 km范围内)，波高又逐渐上升。库区沿程的相位滞后时间随距离增加不断延长，该重力波传播至430 km的白沙沱站点时，所需时间大约6 h，计算可得平均传播速度约19.9 m/s，

远大于枯水期库区全江段的平均流速(~0.17 m/s)。而且由于库区上游水深较浅，重力波传播速度会变小，因此滞后时间曲线在约320 km后斜率(即传播速度)有明显降低的趋势。

图9中绘制的是2018年3月12日0:00至3月17日0:00，背景水位约163.2 m情况下的水位波动特征(图9(a))及其振幅($A$)和滞后相位($\Phi$)沿程变化特征(图9(b)(c))。该5天内，坝前水位振幅(约0.08 ~ 0.09 m)，较图8中略高，这除了与背景水位降低有关，可能还与大坝出库流量相关(式11)。该重力波在传播过程中依然呈现振幅先降低后增加的趋势，只是振幅由减至增的转换位置发生在约190 km处，较水位172.8 m情况下(图8)略有提前，这是由于背景水位降低后，库区上游地形束窄更加显著，导致波能汇聚增强的结果。从图9(b)还可以发现，在约200 ~ 250 km范围内，虽然存在三条支流(磨刀溪、汤溪河和小江)，但干流波高降低并不明显，说明支流对干流重力波振幅的影响是有限的，河道地形在对振幅的影响中起主导作用。图9(c)中的滞后时间变化趋势与图8(c)基本一致，不过其斜率降低发生在约280 km附近，但总体说来重力波传播时间较图8(c)有所延长，坝前至白沙沱站的传播时间约6.4 h，这是由背景水位变小导致重力波波速降低所致。




图(a)中水位是高通滤波结果，白色实线表示0值区域；(b)和(c)中的图例(1—5)表示第(1—5)天，灰色柱状图表示沿程支流的位置和流量(右坐标轴)。数据时间：2018.1.11，0:00—1.16，0:00，库区水位：172.8 m

图8　三峡库区坝前430 km范围内水位变化过程及其振幅($A$)和相位($\Phi$)沿程特征。

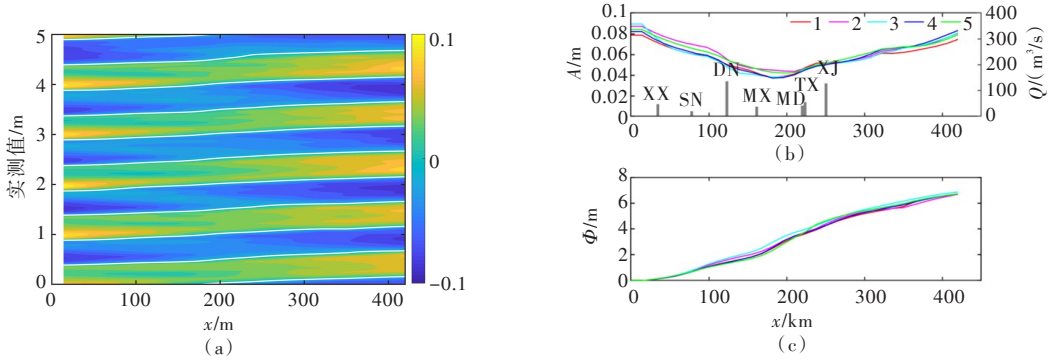



图9　三峡库区坝前430 km范围内水位变化过程及其振幅($A$)和相位($\Phi$)沿程特征。

(数据时间:2018.3.12，0:00—2018.3.17，0:00，库区水位：163.2 m)

## 4　研究结论

三峡电站由于其昼夜发电负荷不均，大坝出库流量和坝前水位呈显著的周期性波动特征，并以重力波形式向库区上游传播，该重力波对库区干支流的水动力特征产生着影响。文中针对三峡水库日调节流量模式驱动的重力波问题，通过2018年1—10月三峡出入库流量和库区多个站点的水位实测数据，分析了三峡出库流量日调节模式驱动的坝前水位波动特征及其向库区上游的传播过程，主要研究结论如下：(1)枯水期三峡出库流量存在日调节和半日调节模式，其中日调节模式最为显著，流量振幅约在1500 ~ 2500 $m^3/s$之间，半日调节振幅较小。向家坝出库流量调节模式不显著。三峡出库流量的日调节或半日调节分别会驱动坝前水位的日波动或半日波动，坝前秭归站水位日波动振幅

约在0.04～0.30 m之间。(2)针对三峡出库流量日调节模式驱动的重力波，其在坝前生成时的振幅与一个日周期内泄水量差成正比，与库区背景水位成反比。结合实测数据拟合结果，文中给出了估算公式，即 $A=\frac{\Delta W\times 10^{-7}}{2.34\cdot\eta-260.24}$，由公式所得计算结果与实测结果对比符合较好。(3)日调节重力波向库区上游传播过程中，其振幅会出现先降低后上升的现象，从下降到上升的转换位置与库区背景水位相关，一般发生在距大坝190～250 km范围内。重力波的相位沿程逐渐增加，代表重力波波速的相位斜率与库区水位相关，距离大坝较远的库区上游波速显著降低。

**参 考 文 献：**


[1] ZARFL C, LUMSDON A E, BERLEKAMP J, et al. A global boom in hydropower dam construction[J]. Aquatic Sciences, 2014, 77: 161-170.

[2] GRILL G. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569(7755): 215-221.

[3] LONG L H, JI D B, YANG Z Y, et al. Tributary oscillations generated by diurnal discharge regulation in Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Research letters. 2020, 15(8): 1-8.

[4] ESTRADA M, ALCARAZ M, MARRASE C. Effects of turbulence on the composition of phytoplankton assemblages in marine microcosms[J]. Marine Ecology Progress Series, 1987, 38: 267-281.

[5] YANG Z J, LIU D F, JI D B, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. Science China (Technological Sciences), 2010, 53(4): 1114-1125.

[6] WANG L, CAI Q, TAN L, et al. Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2011, 9(19): 3820-3828.

[7] 高圻烽，何国建，方红卫，等. 三峡库区支流中水体的垂向掺混对于藻类生长的影响[J]. 水利学报，2017, 48(1): 96-103.

[8] 浦伟伟. 葛洲坝水电站反调节研究[D]. 武汉：华中科技大学，2010.

[9] YU M X, LI Q F, LU G B, et al. Investigation into the impacts of the Gezhouba and the Three Gorges Reservoirs on the flow regime of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18: 1098-1106.

[10] 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[J]. 中国科学(物理学力学天文学)，2010, 40(1): 101-112.

[11] 刘德富，杨正健，纪道斌，等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报，2016, 47(3): 443-454.

[12] LONG L H, JI D B, YANG Z J, et al. Density riven water circulation in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China[J]. River Research and Applications, 2019, 35(7). doi:10.1002/rra.3459

[13] LIU L, LIU D, JOHNSON D M, et al. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management[J]. Water Research, 2012, 46(7): 2121-2130.

[14] SHA Y K, WEI Y P, LI W P, et al. Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 230-237.

[15] MAECK A, LORKE A. Ship-Lock-Induced surges in an impounded river& their impact on sub-daily flow velocity variation[J]. River Research and Applications, 2014, 30(4): 494-507.

[16] JOYCE J, JEWELL P W. Physical controls on methane ebullition from reservoirs and lakes[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2003, 9: 167-178.

[17] 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.

[18] 方国洪，郑文振，陈宗镛. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京：海洋出版社，1986.

[19] TENORIO F L, GOMEZ V J, MARINO T I, et al. Tidal dynamics in a frictionally dominated tropical lagoon[J]. Continental Shelf Research, 2016, 12(8): 16-28.

[20] FRIEDRICHS C T, AUBREY D G. Tidal propagation in strongly convergent channels[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 3321-333.

## Study on the gravity wave induced by the diurnal variation of outflow discharge in the Three Gorges Reservoir

JI Daobin[1,2], ZHOU Zhexuan[1], YANG Zhongyong[1,2], LONG Lianghong[1], WANG Yaoyao

(1. *College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *China*;
2. *Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *China*)

**Abstract**: Diurnal variation of water level has been observed in Three Gorges Reservoir (TGR), which is driven by the outflow discharge fluctuation, and would travel toward upstream along TGR as a gravity wave. The mechanism of generation and propagation along the reservoir is still unclear. To study the generation mechanism and propagation process of this gravity wave, the field data of discharge and water level during January and October, 2018 was analyzed with methods of wavelet transform and filter analysis. The main results included: (1) the amplitudes of diurnal wave were proportional to accumulated discharge, and inverse proportional to background water level, which can be evaluated by a formula derived in this paper; (2) The wave amplitude experienced a decrease-increase process, while the phase increased gradually, in the process of upstream travelling, under the influence of bottom friction, transverse section, discharge from branches, as well as background water level.

**Keywords**: Three Gorges Reservoir; outflow discharge fluctuation; gravity wave; wave propagation in a reservoir

(责任编辑：李福田)

(上接第110页)

## Experimental study on the electro-thermal performance of ERCC and its power supply mode analysis

ZHANG Mengxi[1], LI Mingchao[1], ZHANG Jinrui[1], HU Yu[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300350, *China*;
2. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

**Abstract**: Engineering experience indicates that temperature cracking is easy to occur near the height of overwintering layer of RCC dams under the low temperature. More dams are being constructed in China's frigid region, which puts forward higher requirements for temperature control of concrete dams. The laying and dismantling of the traditional external insulation measures on the large warehouse surface will inevitably increase the cost and reduce efficiency in construction. In view of the above problems, a new type of electrically conductive roller compacted concrete (ERCC)is introduced in this paper. The electric temperature increase of large-scale ERCC layer specimen was tested, and the thermal conductivity and specific heat capacity of ERCC was inversed according to the test data. Then, the quantitative calculation model of voltage required to resist the cold wave ($U$)and the temperature difference inside and outside the dam ($\Delta T$)are deduced according to the heat flow balance. The evolution process of temperature field and stress field of overwintering layer under the action of sudden temperature drop was simulated by the coupling method of electricity-heat-structure. The power supply mode is optimized with the temperature stability of typical measuring points as the objective function. The reliability of the $U-\Delta T$ model has been verified by the optimization results. Comparing the temperature, stress and cost of 9 schemes for temperature control, including "thin layer surface protection+ERCC electrified heating" and "conventional insulation materials", the power supply mode has a favorable effect in improving the temperature and stress distribution, which can provide a new way to solve the problem of temperature control of overwintering layer.

**Keywords**: RCC dam; ERCC; overwintering layer; temperature control; $U-\Delta T$ model; power supply mode; structural-thermoelectric simulation

(责任编辑：杨　虹)