

三峡水库枯水期不同运行方式对 洞庭湖生态补水效果研究

戴凌全^{1,2}, 蔡卓森¹, 刘海波³, 戴会超², 王煜¹, 汤正阳³

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国长江三峡集团有限公司,
北京 100038; 3. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 洞庭湖枯水期面临的持续低水位对湖区生态环境带来严重影响, 三峡水库枯水期增加下泄流量为洞庭湖生态补水提供了有利条件。为定量描述三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果的空间差异, 拟定3种水库典型消落方案, 即提前消落、均匀消落、高水位消落; 依托构建的江湖一体化耦合水动力模型分析不同消落方式对洞庭湖补水效果的空间分布格局, 并评估不同方案对发电量的影响。结果表明: 提前消落和高水位消落方式对洞庭湖水位的影响具有明显的空间异质性, 对东洞庭湖北部影响较为明显, 而对于东洞庭湖南部、南洞庭湖和西洞庭湖影响较小; 提前消落较均匀消落方式城陵矶水位平均提高0.12 m, 对应的三峡发电量减小0.30%, 而高水位消落方式城陵矶水位平均降低0.09 m, 发电量增加0.28%。研究成果可为兼顾洞庭湖生态补水的三峡水库消落方案的制定提供参考。

关键词: 枯水期; 生态补水调度; 空间分布; 不同运行方式; 三峡水库; 洞庭湖

中图分类号: TV697.11; TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)03-0170-06

The effect of Three Gorges Reservoir operation scheme during the dry season on ecological water supplement of Dongting Lake

DAI Lingquan^{1,2}, CAI Zhuosen¹, LIU Haibo³, DAI Huichao², WANG Yu¹, TANG Zhengyang³

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. China Three Gorges Corporation Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: The extremely low water level of the Dongting Lake during the dry season has a serious impact on the ecological environment of the Lake. The Three Gorges Reservoir (TGR) has increased the discharge for the lake to supplement water during the dry seasons. In order to quantitatively describe the spatial difference of water supplement effect on the ecological water supplement from the operation schemes of TGR at dry seasons, three typical schemes were proposed, namely, drop in advance, uniformly drop, and drop at high water level. Based on the integrated coupling mathematical model of rivers and lakes, the spatial distribution of Dongting Lake water level under different schemes was analyzed, and the impact of different schemes on power generation was evaluated. The results showed that the influence of drop in advance and drop at high water level on the water level of Dongting Lake had obvious spatial heterogeneity, and the influence on the northern part of East Dongting Lake was obvious, whereas for the south and west Dongting lake was small. The water level of Chenglingji increased 0.12 m on average, and the power generation of Three Gorges power reduced 0.30% for the drop in advance, while for the drop at high water level the water level of Chenglingji reduced 0.09 m on average, and the power generation increased 0.28%. The research results could provide beneficial reference for the formulation of the Three Gorges Reservoir's drop mode taking into ac-

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51809150); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2016-08)

作者简介: 戴凌全(1986-), 男, 湖北襄阳人, 博士后, 研究方向为水生态与水库优化调度。

通讯作者: 刘海波(1971-), 男, 湖北枝江人, 教授级高级工程师, 研究方向为水电站运行调度。

count the ecological water supply of the Dongting Lake.

Key words: dry season; ecological water supplement; spatial distribution; Three Gorges Reservoir; Dongting Lake

1 研究背景

作为长江中下游的国际重要湿地保护区和“江河吞吐器”,洞庭湖在维持湖区生态平衡中起到决定性作用^[1]。然而进入21世纪以来,受流域内降雨偏少、长江下游河道冲刷等内外多重因素共同影响,洞庭湖枯水期水位不断跌破历史最低记录且低水位持续时间延长,直接影响以湿地为主要栖息地的候鸟数量。同时水位降低流速减缓致使水体交换与自净能力减弱,湖区主要污染指标TN和COD_{Mn}呈升高趋势,加剧了湖区水质污染和水环境恶化^[2]。洞庭湖面临的季节性缺水对湖区乃至长江中下游地区的生态及生产用水都将起到极大地束缚作用,已成为继洪涝灾害之后又一重要问题,必将对湖泊水生态环境及湖区居民带来严重影响^[3-4]。采取有效措施避免湖泊出现过低水位已成为当务之急。

维持洞庭湖枯水期适宜的水位可采取工程措施和非工程措施,其中工程措施包括三口建闸、城陵矶建闸等^[5-6],但工程措施可能产生不利的生态影响,引起了学术界的激烈争论,目前仍处在论证阶段^[7-8]。现阶段通过水库优化调度等非工程措施对洞庭湖进行补水正受到各方面的高度重视^[9-11]。三峡水库是长江干流控制性骨干工程,兴利库容 $165 \times 10^8 \text{ m}^3$,为充分发挥三峡水库的补水效益,水库通过调整消落方式,多次实施针对长江中下游河道水位偏低的补水调度实践并取得了初步成效,如2014年2月19日三峡水库下泄流量较初步设计增加 $1\,550 \text{ m}^3/\text{s}$,长江干流与洞庭湖交汇点城陵矶水位提高1.43 m,可见优化水库消落方式对提高洞庭湖水位具有实践上的可操作性^[12-14]。然而由于洞庭湖湖盆形态和入湖水流条件的差异,三峡水库不同下泄流量对洞庭湖补水效果存在空间差异性,同时改变消落方式对发电量的影响也是水电站运行单位关注的问题。因此准确分析水库不同消落方式对洞庭湖补水效果的空间分布格局及对水电站发电量的影响是制定水库消落方式的前提条件。

目前针对三峡水库补水调度的研究主要是围绕水库汛末蓄水问题,重点关注的是电站发电量、长江下游河道的生态流量及航运等问题。如左建等^[15]综合考虑发电量、通航及生态需水等方面因素对三

峡水库蓄水时间和方式进行了研究;周研来等^[16]分析了水库防洪、发电、蓄水和航运等目标之间的矛盾,并提出了三峡-葛洲坝梯级水库蓄水方案;戴凌全等^[17]提出了蓄水期兼顾洞庭湖补水的三峡水库优化调度方案;孙思瑞等^[18]采用BP神经网络模拟了三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口城陵矶水位的影响。在三峡水库枯水期向长江中下游的补水方面已有部分研究成果,如张先平等^[19]分析了三峡-葛洲坝梯级水库对长江中下游枯水期的补水能力,但侧重点在于长江中下游的航运需求;陈进^[20]分析了长江中下游干旱对三峡水库调度的需求,并提出了针对下游河道抗旱补水的三峡水库调度原则。鲍正风等^[21]从发电的角度对三峡水库汛前消落期优化调度方式进行了研究。然而针对三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖补水效果及发电量的影响尚需进一步定量评估。

本文通过三峡水库2010年正常运行后历年水位消落过程拟定兼顾洞庭湖生态补水的3种水库典型运行方式,进而通过江湖一体化耦合水动力模型量化不同消落方式对洞庭湖补水效果的空间分布格局,定量评估不同方式对发电量的影响,为三峡水库消落方案的制定提供科学依据。

2 三峡水库枯水期典型消落方案拟定

三峡水库为不完全年调节水库,根据2009年10月水利部印发的《三峡水库优化调度方案》,水库按防洪、发电、航运、水资源利用等综合效益进行调度。水库正常蓄水位175.0 m,枯季最低消落水位155.0 m,汛限水位145.0 m。水库蓄水至175 m后到次年水位降至消落水位这段时间称为水库的枯水期^[22]。枯水期水资源利用的原则为:在1-2月下游最需用水的时段,水库在满足发电、航运需求下泄流量的基础上增加最小下泄流量,将消落开始时间提前到5月25日,自1月1日至5月25日水库水位均匀下降至枯季最低消落水位155 m,至6月10日水位降落到汛限水位浮动范围内^[21]。

2010年10月26日,三峡水库首次成功蓄水至正常蓄水位175.0 m,截止2018年10月31日三峡水库连续9年实现175 m试验性蓄水目标,为水库发挥枯水期生态补水效益奠定了坚实的基础。图1反映了三峡水库2010-2018年水库消落过程。从

图1中可以看出:水库在10月底均蓄水至175.0 m,水库基本都从12月下旬开始消落,5月下旬水库水位降至155.0 m,6月上旬降至汛限水位145.0 m。

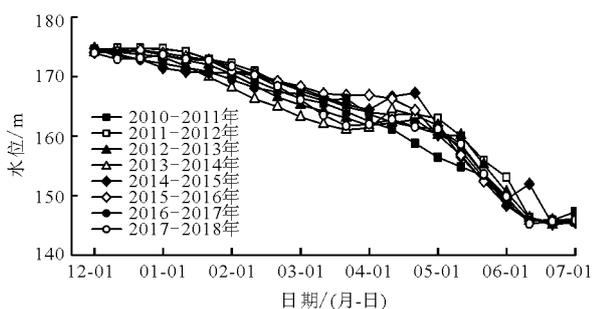


图1 三峡水库2010-2018年消落方式

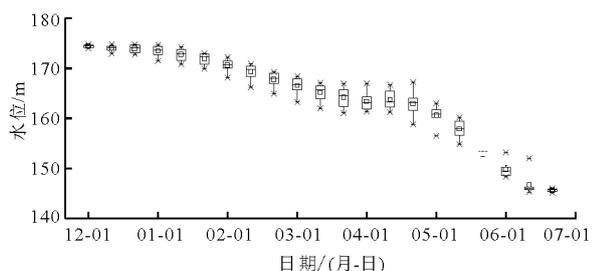


图2 三峡水库枯水期不同时段水位波动范围

三峡水库枯水期不同运行方式对下游河道及洞庭湖水位的影响程度不同,对于洞庭湖而言每年1-3月属于枯水期,湖区水生态环境对水位波动极为敏感,因此研究时段集中在1-3月。根据三峡水库2010-2018年正常运行以来水库水位统计数据可知:水库1月上旬水库水位变幅为[171.0 m, 175.0 m],3月下旬水库水位变幅为[161.0 m, 167.0 m](图2),因此根据水位变幅设置3种典型的消落方式(图3)。方案设置时考虑地质灾害治理工程安全及水库岸坡稳定对水库降水速率的要求,枯水期水库水位下降速率按不超过0.6 m/d控制^[22]。

方案1:提前消落。3月底水位按最低水位控制,12月1日至1月1日水库水位为175.0 m,其后水位按0.156 m/d均匀降落,至3月31日水库水位为161.0 m,其后按0.200 m/d均匀降落,至4月30日水位降至最低消落水位155.0 m;

方案2:均匀消落。3月底水位按适中水位控制,12月1日水库水位为175.0 m,其后水位按0.065 m/d均匀降落,至1月1日降至173.0 m,其后按0.100 m/d均匀降落,至3月31日水位为164.0 m,再按0.3 m/d均匀降落,至4月30日水位降至155.0 m;

方案3:高水位消落。3月底水位按最高水位控制,12月1日水库水位为175.0 m,其后水位按0.129 m/d均匀降落,至1月1日水位为171.0 m,其后按0.044 m/d均匀降落,3月底水位为167.0 m,其后再按0.4 m/d均匀降落,至4月30日降至155.0 m。

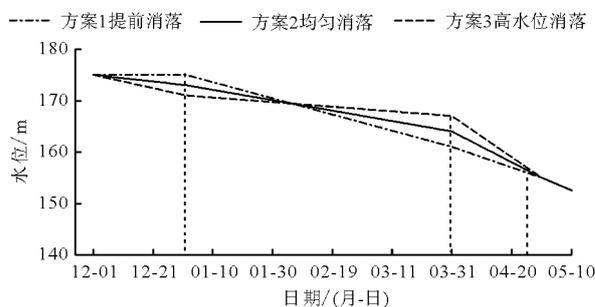


图3 三峡水库消落期典型方案设计

3 江湖一体化水动力耦合模型

3.1 研究范围及数学模型

为定量分析三峡水库不同运行方式对洞庭湖生态补水效果的空间分布差异,建立涵盖长江干流河道(三峡坝址至螺山)、洞庭湖及支流、三口河系等多种不同水文单元的水动力模型,洞庭湖支流取自四水控制站(湘潭、桃江、桃源和津市)至湖区。水动力耦合模型的计算范围见图4。

根据各水文单元特征,分别构建一维、二维两种不同维度的水动力数学模型。一维模型用于模拟长江干流、三口河系、洞庭湖支流河段的水力特征。河道断面是一维水动力模型重要的基础数据,考虑到长江干流及支流河道距离长、断面复杂的特点,为准确反映河道沿程变化和过水能力,在已有资料的基础上尽可能多取河段断面,长江干流河段5~10 km布设一个断面,共剖分150个断面,洞庭湖支流及三口河系平均10 km布设一个断面。二维模型则用于水域面积较大而且水流运行复杂的区域(湖区及江湖交汇区),根据洞庭湖历史水文资料确定湖区最高水位淹没边界,据此设定二维模型的计算边界。根据边界和地形数据划分网格,由于三角网格能精细刻画计算区域的岸线条件,因此二维模型采用非结构化不规则三角网格,网格大小根据地形的空间分布等确定。

根据上述原则并兼顾计算时间,洞庭湖节点总数9424个,单元总数14289个,最长边长1396 m,最短边长119 m。



图 4 水动力模型的计算范围

为了充分利用一维模型和二维模型在各自领域单独应用时的优势,避免模型单独使用时存在的网格精度和计算效率问题,一维与二维模型实施动态耦合,以实现水流过程在不同维度水文单元上的演进。模型中耦合点包括四水与洞庭湖交汇区域、长江干流与洞庭湖交汇区域,均为垂向连接。由一维模型计算出连接河道末端的流量垂直流向二维模型,并作为源项提供给二维模型连接网格单元。由二维模型计算出连接网格单元的水位流向一维河道的连接节点,并作为该节点的水位边界。

3.2 边界条件

模型边界条件包括水文边界和地形边界。其中水文边界包括三峡水库出库流量、清江流量(高坝洲站)、洞庭湖四水控制站入流(湘潭、桃江、桃源和津市),采用日均流量过程(图 5),下游边界条件采用螺山站水位-流量关系曲线(图 6)。因此在模型计算时,只需给定三峡水库下泄流量、清江流量、四水流量和初始条件即可计算出整个区域内部的水位、流量、流速等时空变化过程。地形边界采用 2006 年的长江干流和洞庭湖区地形。综合考虑模型稳定性及计算效率等因素,设定一维模型计算时间步长为 30 s,二维模型最大计算步长为 5s、最小计算步长为 0.1 s,时间步长可根据水流信息与地形条件自动调整。

3.3 参数率定与验证

模型的主要参数为糙率,糙率是水动力学模型最重要且较为敏感的计算参数,反映了河湖底部及岸坡、湖区地表影响水流阻力的综合系数。结合研究区域的现有资料情况,选取资料完整的 2017 年 1 月 1 日-12 月 31 日作为代表年对参数进行率定与验证。以主要站点水位为特征值率定模型,长江干

流选取宜昌、枝城、沙市、监利为率定点,洞庭湖选取城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀为率定点(图 4)。主要水文站点水位率定结果如图 7 所示。

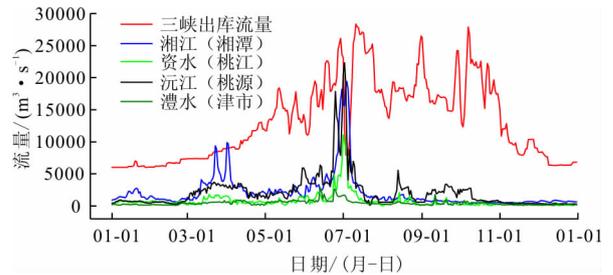


图 5 2017 年三峡水库出库及四水入湖日均流量过程

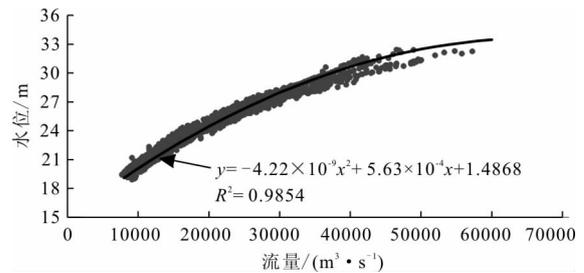


图 6 螺山水文站水位-流量关系曲线

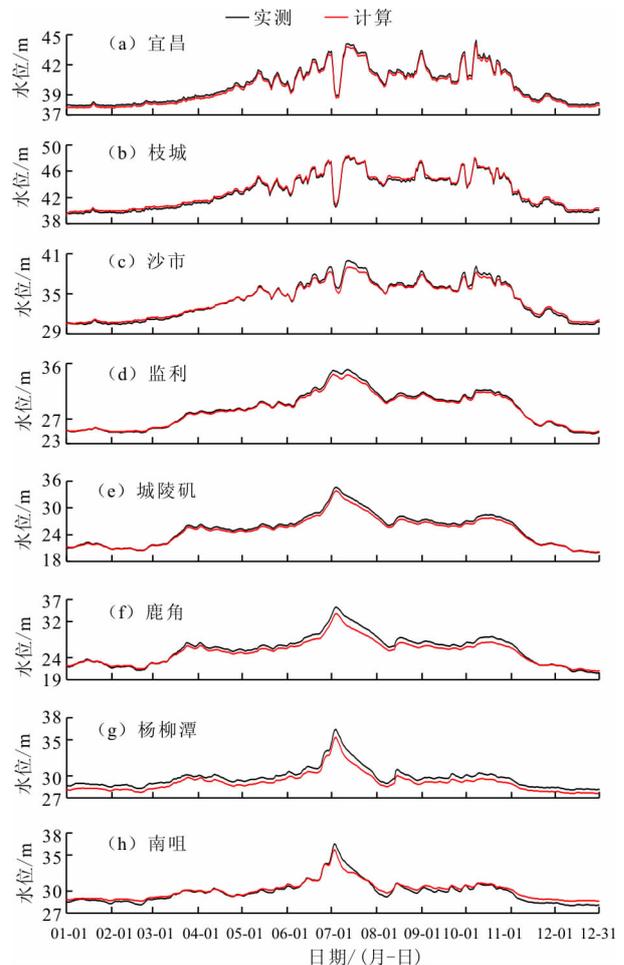


图 7 2017 年各站点计算水位与实测水位对比图

由图7可知,各站点水位计算结果与的实测水位基本一致。一维模型计算的长江干流4个水文站的水位模拟结果与实测水位吻合较好,计算值与实测值的相对误差不超过6%,说明模型所取的参数较合理。洞庭湖城陵矶站模拟效果较好,而洞庭湖内部站点鹿角站、杨柳潭站和南咀站模拟效果略差,分析其原因是由于城陵矶水位受长江干流水位影响明显,而洞庭湖内站点受四水影响更为复杂,因此离干流较远的站点模拟效果相对较差,但相对误差也控制在10%以内。总体来看所建立的水动力模型的模拟误差均在可接受范围内,可以满足计算要求。通过率定和验证,河道糙率取值0.028~0.035,湖底糙率在0.022~0.029之间,其他参数设为默认值。

4 不同消落方式对洞庭湖补水效果及发电量的影响分析

4.1 不同消落方式对洞庭湖补水效果分析

利用三峡水库平水年入流系列,根据水库水量平衡原理计算水库不同消落方式下水库出库流量(图8)。典型水文年的选取以宜昌站1950-2002年的长系列日流量资料为基础,对研究时段内的流量进行排频,取频率为50%的流量为平水年。以不同消落方式下三峡水库出库流量作为一二维耦合模型的上游边界条件,其它入流边界条件采用同期控制性站点的流量,模拟计算得到不同消落方案下的洞庭湖代表性站点水位变化过程(图9)。

三峡水库下泄流量的变化对洞庭湖水位的影响体现在两个方面:一是增加或减少通过三口河系进入西洞庭湖的水量,二是提高或降低长江干流城陵

矶站的水位,对洞庭湖的入江水流起着顶托或拉空作用,由于枯水期太平口、藕池口基本处于断流状态,而松滋口分流量较小,因此枯水期三峡水库下泄流量对洞庭湖水位影响主要是干流的拉空或顶托作用。由图9可知不同方案对洞庭湖不同湖区补水效果存在明显的空间差异,提前消落方式由于水库水位下降速率最大,1-3月平均出库流量较均匀消落方式高560.59 m³/s,对东洞庭湖北部城陵矶的水位提升起到明显的作用,城陵矶水位平均提高0.12 m,最小提高0.048 m,最大提高0.133 m,而对于东洞庭湖南部鹿角站、南洞庭湖杨柳潭站和西洞庭湖的南咀站作用甚微;而方案3高水位消落方案为使水位保持的高水位运行,1-3月平均出库流量较均匀消落方案减小573.94 m³/s,此时对洞庭湖水位的影响主要集中在洞庭湖出口城陵矶站,城陵矶水位平均降低0.09 m,最小降低0.045 m,最大降低0.102 m,而对于洞庭湖其它站点水位影响较小。

4.2 不同消落方式对发电量的影响

发电是三峡水电站的主要任务之一,从水库经济运行的角度考量,水电站在各种约束下按发电量最大方式运行,这也是水电站运行人员的职责所在。

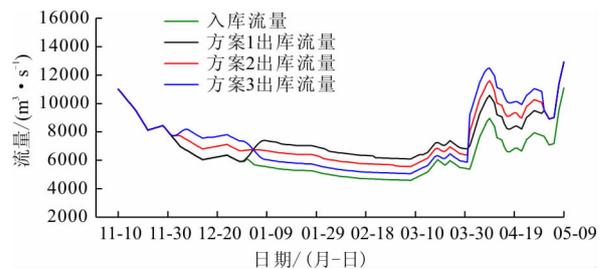


图8 不同消落方案下三峡水库出库流量

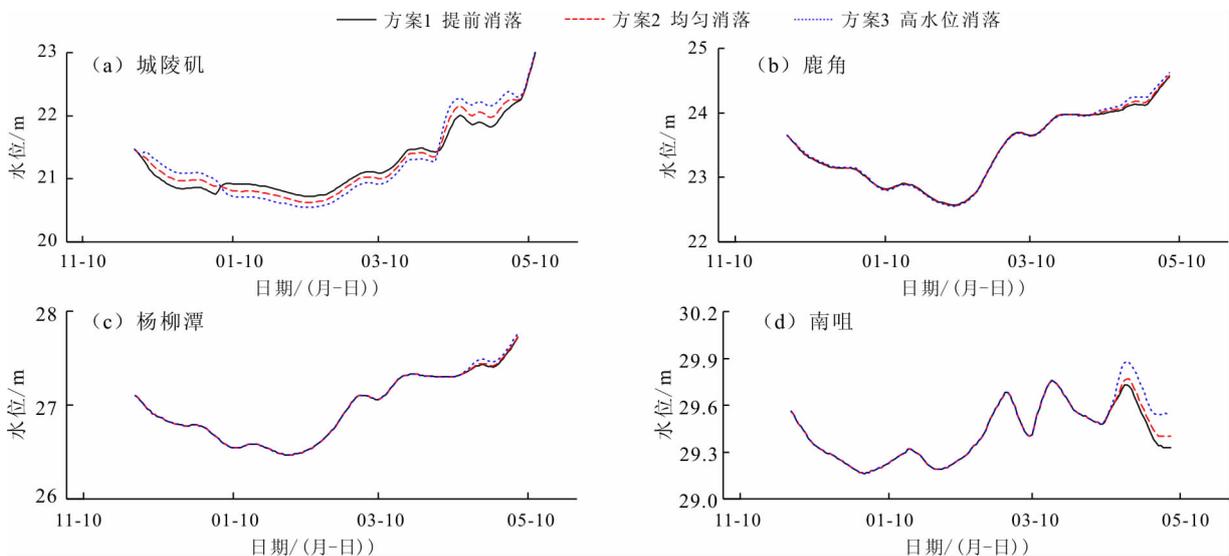


图9 不同消落方案下洞庭湖代表性站点水位变化情况

然而不同的消落方式可能造成发电量的减少,进而影响经济效益,因此须对不同消落方案对发电量的影响进行定量评估。为便于各方案的比较一致性,将12月1日-次年4月30日作为调度期,调度期内总发电量计算方法如下:

$$E = \sum_{i=1}^T (AQ_i \Delta H_i \Delta t) \quad (1)$$

式中: E 为发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; A 为电站综合出力系数; Q 为通过发电机组的流量, m^3/s ; ΔH 为水库上游与下游的水位差值, m ; Δt 为时段长度, h 。

不同方案调度期总发电量计算结果如表1所示。

表1 不同方案的发电量对比 $10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$

方案1	方案2	方案3
245.68	246.43	247.13

通过表1可知,不同消落方式对三峡水电站的发电量存在一定的影响,方案1由于水位提前消落,水位比方案2低,发电量比方案2减小 $0.75 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,减幅0.30%;而方案3水位始终处于高水位状态,发电量最多,比方案2增加 $0.7 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增幅0.28%。

5 结 论

(1)构建了涵盖长江干流河道、洞庭湖及支流、三口河系的江湖一体化耦合水动力模型,采用2017年实测的水文资料率对模型的主要参数进行了率定和验证,为定量评估三峡水库不同下泄流量对洞庭湖水位分布的空间格局提供了有效手段。

(2)由于洞庭湖湖盆形态和入湖水流条件的差异,三峡水库增泄流量对洞庭湖水位的影响仅限于东洞庭湖的北部地区。生态补水效果与发电量之间存在着相互制约的关系,提前消落方式可在发电量仅损失0.30%的情况下,使城陵矶水位平均提高0.12 m;而高水位消落方式可使城陵矶水位平均降低0.09 m,而发电量可增加0.28%。因此为了更好地满足生态需水要求,可适当降低发电量。

参考文献:

[1] DAI Xue, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. The effect of the Changjiang River on water regimes of its tributary Lake East Dongting[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1072-1084.

[2] 黄 韬,张俊宏,邓志民,等. 三峡水库蓄水前后洞庭湖区水环境演化过程研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 61-67.

[3] 童潜明,韩伟,雷帆,等. 解决洞庭湖区季节性缺水方案比较研究[M]. 长沙:湖南大学出版社,2014.

[4] LI Zhongwu, NIE Xiaodong, ZHANG Yan, et al. Assessing the influence of water level on schistosomiasis in Dongting Lake region before and after the construction of Three Gorges Dam[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(1): 1-10.

[5] 向 锋,施 勇,金 秋,等. 洞庭湖枢纽调度方案比对分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 19-25.

[6] 朱幸平,聂芳容. 荆江南岸松滋新江口及其它三口建闸方案研究[J]. 人民长江, 2009, 40(14): 18-19.

[7] 谢 平. 三峡工程对两湖的生态影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1607-1618.

[8] 钮新强. 洞庭湖综合治理方案探讨[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 1-7.

[9] 蔡其华. 洞庭湖与三峡工程[J]. 人民长江, 2012, 43(17): 1-4.

[10] YANG Guishan, ZHANG Qi, WAN Rongrong, et al. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: advances in research on the middle Yangtze river[J]. Hydrology Research, 2016, 47(S2): 1-7.

[11] 钮新强. 洞庭湖综合治理方案探讨[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 1-7.

[12] 鲍正风,李长春,王 祥. 长江上游流域水文条件变化下的三峡水库综合运用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(4): 98-103.

[13] 王学敏. 面向生态和航运的梯级水电站多目标发电优化调度研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.

[14] 高玉磊. 三峡工程运行高效 效益显著[J]. 中国三峡, 2017(5): 70-73.

[15] 左 建,陆宝宏,顾 磊,等. 基于综合调度的三峡水库汛末蓄水研究[J]. 水力发电, 2015, 41(12): 85-88+92.

[16] 周研来,郭生练,陈 进. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 44(10): 1135-1144.

[17] 戴凌全,毛劲乔,戴会超,等. 面向洞庭湖生态需水的三峡水库蓄水期优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 18-27.

[18] 孙思瑞,谢 平,陈柯兵,等. 三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1819-1826.

[19] 张先平,鲁军,邢 龙,等. 三峡-葛洲坝梯级水库兼顾航运需求的调度方式[J]. 人民长江, 2018, 49(13): 31-37.

[20] 陈 进. 三峡水库抗旱调度问题的探讨[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 19-23.

[21] 鲍正风,胡晓勇. 三峡水库汛前消落期优化调度方式研究[J]. 水力发电, 2009, 35(12): 64-66.

[22] 乔 晔,廖鸿志,蔡玉鹏,等. 大型水库生态调度实践及展望[J]. 人民长江, 2014, 45(15): 22-26.