

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230493

# 新河湖关系下石臼湖水文节律变化及其生态环境效应

罗俐雅<sup>1</sup>, 童建<sup>1</sup>, 周杰<sup>2</sup>, 庞麦田<sup>3</sup>, 王勇<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏南京 210029; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏南京 210029;  
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 为量化分析长江下游及湖泊水文节律受上游梯级水库开发和三峡工程运用的影响, 采用 M-K 检验、累积距平法、小波相干谱法等水文时间序列趋势分析法和 STL 等时间序列分解法统计分析了石臼湖蛇山站 49 年的历史水位资料, 解析了石臼湖在新河湖关系下的水文节律的长期变化趋势和规律, 探析了水文节律变化和本地气象因子的相干关系和新形势下水文节律变化的生态效应。结果表明, 新河湖关系下, 枯季更早更长且平均水位更高, 极端低水位更易出现, 变化更平缓, 难以出现高水位; 汛期极值高水位更低更晚, 汛期平均水位更低, 结束更早, 变幅更平缓。枯季提前有利于增加水生植物的生物量, 但枯季水位变幅减小可能降低枯季生物多样性。

**关键词:** 水文节律; 生态效应; 石臼湖; 时间序列分解

**中图分类号:** P343.9; [TV11]

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)11-0014-04

## 1 概况

长江中下游湖泊密布、营养本底高、江湖关系复杂、水生物种多样, 生态价值极其重要<sup>[1]</sup>。过去 40 年人类活动加剧叠加气候变化, 形成新的水文节律, 生境变化, 湖泊萎缩<sup>[2]</sup>。石臼湖是下游唯一直接连接长江的大型浅水湖泊, 位于江苏省西南部、安徽省东部, 湖西北岸当涂县博望镇并入新成立的马鞍山市博望区, 湖区跨江苏南京溧水、高淳和安徽马鞍山当涂、博望三区一县。石臼湖湖泊平均深度为 1.67 m, 最大水深为 2.42 m。湖水容积在最低水位时仅  $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而高水位时, 容积可达  $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。石臼湖高水位一般出现在夏秋, 低水位则出现在冬季, 水位变幅一般在 2.5~6.8 m 之间, 最大变幅可达 7 m 以上。长江受上游梯级水库开发和三峡工程运用的影响, 水文节律发生新的变化<sup>[3]</sup>。为此, 本文通过历史资料时间序列的统计分析, 解析了石臼湖在新河湖关系下水文节律的长期变化趋势和规律, 探析了水文节律变化和本地气象因子的相干关系和新形势下水文节律变化的生态效应。为其生态环境保

护总结水文节律变化基本规律及驱动因子, 研究结果为人工干预石臼湖水文节律提供了科学依据。

## 2 研究方法

水文观测值是一定时期内某一地区自然地理、气候、人类活动等综合作用的产物。往往需通过水文时间序列分析量化变化趋势、幅度和相位、周期, 以了解其变化规律。通过水文时间序列的分析还能找出奇异点, 还原时间序列等。常用的趋势分析方法有 M-K 检验、累积距平法等。本文通过 M-K 检验法分析石臼湖水文节律是否产生显著单调变化的趋势, 并通过累积距平法显示水文变化过程与平均值之间的相对关系。通过小波分析法分析水文节律变化的周期和相位。

在水文时间序列中, 同时存在着趋势性和季节性变化, 需通过时间序列分解模型进行分解。在 SPSS10.0 软件中比较了常用的 X11 分解法、SEATS 分解法、STL 分解法的差异, 选择 STL 分解法量化了石臼湖水位季节性变化的规律。

## 3 石臼湖水文节律变化分析

**收稿日期:** 2023-03-31, **修回日期:** 2023-06-09

**基金项目:** 国家重点研发计划(2022YFC3204102); 江苏省水利科技项目(2018001)

**作者简介:** 罗俐雅(1978-), 女, 高级工程师, 研究方向为水文情报预报, E-mail: 516174631@qq.com

**通讯作者:** 周杰(1976-), 男, 博士、正高级工程师, 研究方向为环境力学和湖库富营养化, E-mail: jzhou@nhri.cn

### 3.1 年际变化

由于石臼湖入湖水量最大的河流属于水阳江水系,比较马鞍山气象站、石臼湖蛇山站的位置,马鞍山气象站更能代表水阳江水系降水量。根据石臼湖蛇山站 1973~2021 年的日水位资料统计,石臼湖多年平均水位为 6.94 m,马鞍山站多年平均降雨量 1 121 mm,趋势见图 1。石臼湖年均水位呈每 10 年下降 6.3 cm 的趋势,而马鞍山站降雨量呈略增的趋势。经 M-K 检验(图 2),发现年均水位在 1973~1980 年呈减小趋势,1980~2002 年波动上升,而 2003 年后呈下降趋势。图 3 所示的累积距平过程显示石臼湖水位 2003 年之前水位整体高于平均水平,而之后呈现低于平均水平,这与降雨丰枯年时段不一致。由于水阳江水系水库建设和水资源开发利用在 2003 年前后未发生突变,加上石臼湖和当涂水位相关性和同步性非常好,说明长江水位变化很大程度上决定了通江湖泊的水位过程,通江湖泊的水文节律与长江息息相关<sup>[4]</sup>。

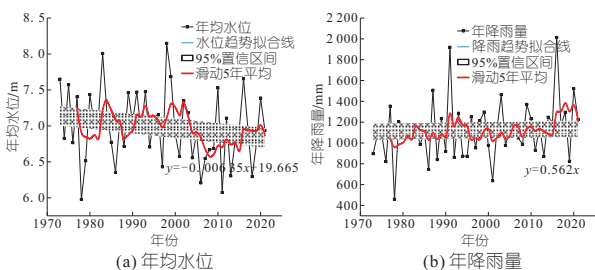


图 1 蛇山年均水位和马鞍山年降雨量的线性趋势拟合

Fig. 1 Linear trend fitting of yearly water level at Sheshan and rainfall at Ma'anshan

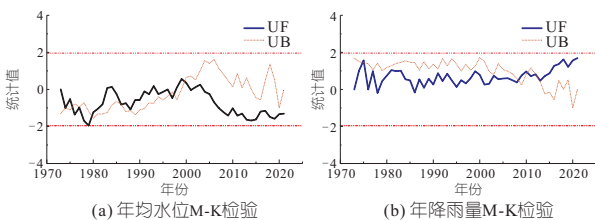


图 2 蛇山年均水位和马鞍山年降雨量 M-K 检验

Fig. 2 M-K test for yearly water level at Sheshan and rainfall at Ma'anshan

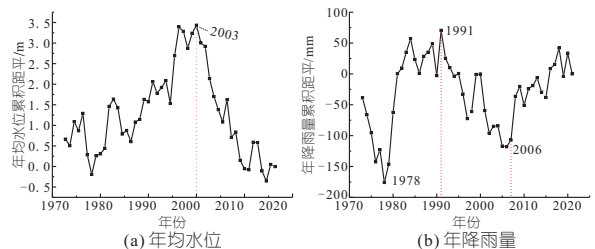


图 3 蛇山年均水位累积距平和马鞍山年降雨量累积距平过程

Fig. 3 Accumulated distance between average process for Sheshan yearly water level and Ma'anshan yearly rainfall

石臼湖年极值水位方面,历史最高水位 12.99 m(2016 年),历史最低水位 4.26 m(2021 年),年均水位最高 8.15 m(1998 年),年均水位最低 6.08 m(2011 年)。将年最高水位和最低水位排频,见表 1,发现年最低水位前 5 均发生在 2003 年三峡蓄水后。

表 1 石臼湖年水位最高值和最低值前 5 位排名  
Tab. 1 Top 5 annual highest and lowest water levels in Shijiu Lake

年最高水位		年最低水位	
日期(年-月)	值	日期(年-月)	值
2016-07	12.99	2021-02	4.26
2020-07	12.87	2011-06	4.31
1999-07	12.60	2007-05	4.83
1983-07	12.28	2020-01	4.89
1996-07	12.17	2014-01	4.90

### 3.2 季节变化

由石臼湖蛇山站 1973~2021 年的日水位资料统计各月的年际间变化趋势,由线性趋势拟合法计算斜率可知,3、10、11 月年际变化趋势显著,其中 3 月呈显著上升趋势,达到每 10 年上升 7.2 cm,而 10、11 月年际变化呈显著下降趋势,分别达到每 10 年下降 16.7、25.6 cm。这主要与长江上游三峡工程及梯级水库调蓄有关,特别是汛期结束后的水库群蓄水过程对下游水文节律影响显著,这也必然影响下游通江湖泊的水文节律。

分别采用 X11 分解法、SEATS 分解法、STL 分解法三种不同水文时间序列分解模型分析了蛇山站月均水位的季节项大小过程<sup>[5]</sup>,见图 4。由图 4 可看出,月均水位季节项的汛期峰值较前期明显降低,消退速度更快,且出现了峰值后移的现象;枯季季节项均值明显有所抬升,但年内负值覆盖时长有所增加。可见,长江重大工程的蓄水造成了下游通江湖泊枯季提前到来,延续时间更长。极端低水位多发生在枯季的尾声,枯季长期的水资源入不敷出造成了极端低水位的出现。另外,

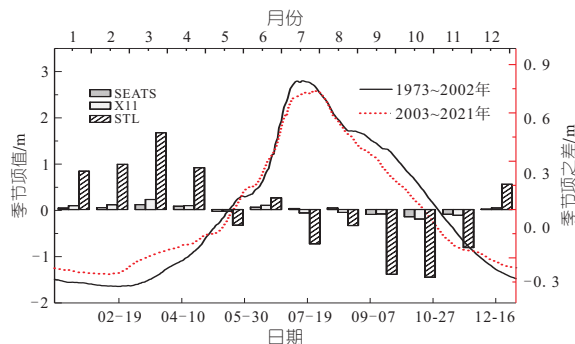


图 4 蛇山站月均水位不同水文时间序列分解模型季节项分布图

Fig. 4 Seasonal and trend decomposition of monthly water level at Sheshan for different time series

三峡工程的蓄水造成了长江枯季再难出现高水位,从而减少了枯季向石臼湖补充水资源的几率。通江湖泊枯季的水文节律更为平缓,变幅减小。

### 3.3 水文节律变化与本地气象因子的相关分析

为分析石臼湖水文节律变化与本地降雨、气温等气象因子的相关关系,采用小波相干谱分析蛇山年均水位与年降雨量、年均气温之间的相干谱<sup>[6]</sup>,见图 5。由图 5 可看出,1990 年代前,石臼湖年水位与降雨量呈现 12 年左右的周期相关性,且水位落后于降雨,1990~2003 年左右,呈现约 2 年的短周期相关向约 6 年周期转变的过程,期间水位先于降雨转变到同步同频。而与当地气温的相关性仅在 1995~2003 年之间呈现约 3 年周期显著相关,且水位落后于气温。综上所述表明,除长江水文节律外,当地降雨是影响石臼湖水文节律长期规律的重要原因,而气温变化并非主导原因。

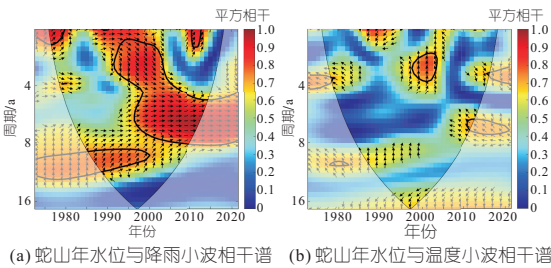


图 5 蛇山年水位与降雨、温度小波相干谱

Fig. 5 Wavelet coherence spectrum of yearly water level and rainfall and temperature

## 4 石臼湖生态系统变化及水文节律效应

石臼湖湿地是以永久性淡水湖为主体的复合类型湿地,总面积约为 207 km<sup>2</sup>,在蓄水调洪、防汛灌溉、保护生物多样性等方面具有极其重要的生态地位。但近年来,石臼湖湿地的环境遭到严重的干扰,生物多样性受到威胁。

石臼湖湿地被破坏前水系比较发达,分别与长江、青弋江和水阳江三大水系相连通,长江因此成为石臼湖湿地主要水源地,石臼湖也是长江丰水期重要的调洪储水的淡水湖泊之一。石臼湖湖区面积中湖泊湿地面积 10 511.7 hm<sup>2</sup>,占湿地总面积的 98.5%;沼泽湿地面积 155 hm<sup>2</sup>,占湿地总面积的 1.5%;近年来,长江枯水期水位持续较低,青弋江和水阳江的水源中途被截,导致石臼湖水位逐年下降,2006~2007 年冬季,平均湖水深度只有 50 cm 左右,冬季枯水期已经很难看到大片的湖水。由于围湖造田、拦河筑坝等<sup>[7]</sup>致使石

臼湖的生态环境受到一定程度的破坏。2007 年来,水产养殖业迅猛发展,也使该湿地生态系统受到人类更多的干扰。在各级政府的努力下,2017 年年底开始退网还湖,2018 年围网已全部拆除。湖泊生态系统开始有所恢复。

石臼湖湿地是越冬水鸟的栖息地,随着湿地资源的减少,来此地越冬的水鸟也不断减少,2002 年在石臼湖鸟类观测以来到 2020 年均未发现丹顶鹤、大鸨等。根据江苏省观鸟会 2007 年环湖水鸟调查及 2012 年安徽大学环湖鸟类调查数据显示,共记录越冬水鸟 27 种,其中国家 I 级重点保护野生动物 1 种,即东方白鹳 (*Ciconia boyciana*)。国家 II 级重点保护野生动物的有白琵鹭 (*Platalea leucorodia*)、小天鹅 (*Cygnus columbianus*)、白额雁 (*Anser albifrons*) 等。随着当地政府持续加大生态环境保护与湿地修复,每年初冬均有大批珍稀鸟类飞来栖息,繁衍后代。近几年来,在石臼湖观察到的候鸟多达数百种,有小天鹅、琵鹭、斑头雁等多种国家重点保护鸟类。部分候鸟在石臼湖休整、觅食、繁衍、调整状态,等到次年 4 月再相继北返。2020、2021 年连续 2 年观测到丹顶鹤。近年来多次观察到石臼湖湿地在枯季复苏,一派生机盎然。南京的龙猫草原是热门湿地景点。

与水文节律相比,石臼湖生态系统更容易受到人类活动的干扰<sup>[8]</sup>。水文节律对生态系统的长远发展起到关键性的作用<sup>[9-10]</sup>。新河湖关系下,枯季更早更长且平均水位更高,极端低水位更易出现,变化更平缓,难以出现高水位;汛期极值高水位更低更晚,汛期平均水位更低,结束更早,变幅更平缓。枯季开始更早,湿地仍处于水生植物的生长期,水生植物更容易在枯季湿地露出水面时获得新生,增加了单位面积水生植物生物量。但枯季水位变幅更小,不利于鸟类觅食,也不利于维持生物多样性<sup>[11]</sup>。

## 5 结论

a. 三峡工程和上游梯级水库运行调蓄后,一定程度上改变了长江下游和通江湖泊的水文节律。石臼湖 1980~2002 年年均水位呈波动上升趋势,而 2003 年后呈下降趋势,总体呈每 10 年下降 6.3 cm 的趋势,湖泊极端低水位频率明显增加。

b. 长江重大工程的蓄水造成了下游通江湖泊枯季提前到来,且枯季延续时间更长。长江枯季再难出现高水位,从而减小了通江湖泊枯季水

位变幅。枯季提前有利于增加水生植物的生物量,但枯季水位变幅减小可能降低枯季生物多样性。

#### 参考文献:

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010,22(6): 799-810.
- [2] 张云昌,张业刚,宋秋龄,等. 江湖关系的历史和未来自来[J]. 水利学报, 2021,52(10):1183-1192.
- [3] 周建军,张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018,30(6): 1471-1488.
- [4] HU Q, FENG S, GUO H, et al. Interactions of the Yangtze river flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China[J]. Journal of hydrology, 2007,347(1-2): 90-100.
- [5] ZHANG Z T, JIN G Q, TANG H W, et al. How does the three gorges dam affect the spatial and temporal variation of water levels in the Poyang Lake? [J]. Journal of hydrology, 2022, 605;

127356.

- [6] SU L, MIAO C Y, DUAN Q Y, et al. Multiple-wavelet coherence of world's large rivers with meteorological factors and ocean signals[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 2019,124(9): 4932-4954.
- [7] 吴帆. 石臼湖—固城湖圩区景观格局与聚落形态研究[D]. 南京:南京大学,2019.
- [8] 于忠华,刘海滨,张涨. 石臼湖流域江苏段生态环境驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2010,26(6): 70-74.
- [9] 董增川,梁忠民,李大勇,等. 三峡工程对鄱阳湖水资源生态效应的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012,40(1): 13-18.
- [10] COOPS H, HOSPER S H. Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands [J]. Lake and reservoir management, 2002,18(4):293-298.
- [11] 刘成林,谭胤静,林联盛,等. 鄱阳湖水位变化对候鸟栖息地的影响[J]. 湖泊科学, 2011,23(1):129-135.

## Hydrological Rhythm Change of Shijiu Lake and Its Ecological Effect Under New River Lake Relationship

LUO Li-ya<sup>1</sup>, TONG Jian<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, PANG Mai-tian<sup>3</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, China;

2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the impact of upstream reservoirs and the operation of the Three Gorges Project on the hydrological rhythms of the lower reaches of the Yangtze River and lakes, M-K test, cumulative anomaly method, wavelet coherence spectrum method and other hydrological time series trend analysis methods with STL time series decomposition method were used to analyze the 49-year historical water level data of Sheshan Station at Lake Shijiu. The long-term change trend and law of hydrological rhythm of Lake Shijiu under the new relationship between Yangtze River and Lake Shuijiu were analyzed. The coherent relationship between hydrological rhythm changes and local meteorological factors were analyzed along with the ecological effects under the new river-lake relationship. Under the new river-lake relationship, the dry season is earlier and longer and the averaged water level is higher, the extreme low water level is more likely to occur, the variation is gentler, and it is difficult for high water level to happen. The extreme high water level in the flood season is lower and happens later, the averaged water level is lower, ends earlier, and the amplitude is gentler. The early dry season is beneficial to increase aquatic plant biomass, but the decrease of water level variation in dry season may cause biodiversity to decrease.

**Key words:** hydrological rhythms; ecological effects; Lake Shijiu; time series decomposition

\*\*\*\*\*  
(上接第 186 页)

## Construction of Hydraulic Turbine Operating Characteristic Surface Based on Moving Least Square Method

LI Peng<sup>1</sup>, LIU Yan-na<sup>2,3</sup>

(1. Gansu Water Resources and Hydroelectric Investigation and Design & Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China; 3. Nanjing Hohai Nansi Hydropower Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

**Abstract:** The distribution of measured operating data of hydraulic turbines is non-structural and uneven density. The moving least squares method was used to fit the measured operating parameters to obtain the spatial characteristic surface of the water turbine, which can reflect the local characteristics of data surface and avoid the distortion caused by the differences of data distribution density. The Riyadh criteria was used to perform preliminary data filtering. The support radius was adaptively determined by local fitting across different ranges of discrete sample points. The robust moving least square surface reconstruction model was established combined with the Mahalanobis distance denoising method. Compared with the least squares method, the example calculation results show that the moving least squares method fits the operating characteristics of hydraulic turbines with higher accuracy and supplements the local data effectively. The result can reflect the operating characteristics of hydraulic turbines authenticity, which provides a reference for correcting the operating characteristic curve given by the turbine manufacturer.

**Key words:** moving least square method; turbine operation data; surface fitting; support radius; characteristic surface