

## 基于长时间序列水位数据的长江下游菜子湖候鸟越冬期水位特征\*

刘学文<sup>1</sup>, 李红清<sup>1</sup>, 杨寅群<sup>1</sup>, 仲夏<sup>2</sup>, 吴师<sup>3</sup>, 江波<sup>1\*\*</sup>

(1: 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

(2: 安徽省引江济淮集团有限公司, 合肥 230000)

(3: 安徽省水利水电勘测设计院, 合肥 230088)

**摘要:** 湖泊生态水位过程对维持湖泊生态系统结构、过程和功能的完整性具有重要意义, 也是当今湖泊科学领域面临的重要科学问题。基于菜子湖湖区水位站(车富岭水位站)1956—2018年日水位资料, 采用pettitt突变检验法分析水位的突变性特征。结合年保证率法得到菜子湖车富岭水位站低水位值, 并在此基础上分析了低水位发生时间及历时、候鸟越冬期水位变化速率及其生态水位的区间阈值。主要结论有: 菜子湖车富岭水位站1956—2018年年均水位无显著突变。菜子湖车富岭水位站低水位发生时间均值为年内的344 d, 年际标准差为27 d, 低水位的年均历时为69 d, 标准差为49 d, 有6年(1978、1997、2015—2018年)未发生低水位事件。菜子湖候鸟越冬期水位变化速率的均值为-0.009 m/d, 年均值为-0.034~0.009 m/d, 日均值为-0.051~0.016 m/d。菜子湖低水位发生时间的区间阈值为332~351 d, 历时的区间阈值为33~98 d, 变化速率的区间阈值为-0.070~0.020 m/d。加强菜子湖候鸟越冬期湿地生境保护适应性调度试验研究及生态环境监测, 为菜子湖输水水位优化控制和菜子湖湿地生态保护提供科学依据。

**关键词:** 菜子湖; 低水位; 阈值; 优化调度

## Water level characteristics of Lake Caizi, lower reaches of the Yangtze River during wintering period based on long-term hydrological alteration

LIU Xuewen<sup>1</sup>, LI Hongqing<sup>1</sup>, YANG Yinqun<sup>1</sup>, ZHONG Xia<sup>2</sup>, WU Shi<sup>3</sup> & JIANG Bo<sup>1\*\*</sup>

(1: Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R.China)

(2: Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230000, P.R.China)

(3: Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230088, P.R.China)

**Abstract:** The ecological water level process of lakes is of great significance for maintaining the integrity of the lake ecosystem structures, processes and functions, and is also an important scientific issue of lake science field nowadays. Based on the daily water level data, pettitt test was used to analyze the abrupt change characteristics of water level of Lake Caizi at Chefuling Station from 1956–2018. The low water level of Lake Caizi at Chefuling Station was obtained using the annual guaranteed frequency method. The starting time and duration of low water level, the water level change rate during the overwintering period of migratory birds and the interval threshold of ecological water level were analyzed accordingly. The main conclusions are as follows: there is no significant abrupt change point in the average annual water level of Lake Caizi at Chefuling Station from 1956 to 2018. The average occurrence time of low water level of Lake Caizi at Chefuling Stations is day 344, with the inter-annual standard deviation 27 days. The average duration time of annual low water level is 69 days with the standard deviation 49 days. Among the calculated 63 years, there are 6 years (1978, 1997, 2015–2018) without low water level event. The average rate of water level change during the overwintering period of migratory birds is -0.009 m/d, the annual average rate is -0.034–0.009 m/d, and the daily average rate is -0.051–0.016 m/d. The interval threshold of the occurrence of low water level of Lake Caizi is 332–351 d, the interval threshold of the duration time is 33–98 d, and the interval threshold of water level change rate is -0.070–0.020 m/d. Strengthening experimental study on habitat adaptation and ecological environment monitoring during the overwintering period of migratory birds to pro-

\* “引江济淮工程菜子湖候鸟越冬期湿地生境保护适应性调度试验研究及生态环境监测”项目资助。2019-03-01 收稿; 2019-04-24 收修改稿。刘学文(1979~), 男, 高级工程师; E-mail: liuxuewen88@126.com。

\*\* 通信作者; E-mail: jbsuibao415@126.com。

vide scientific basis for water level regulation and wetland protection of the Lake Caizi.

**Keywords:** Lake Caizi; low water level; threshold; optimized regulation

水位变化是直接或间接影响湖泊湿地生态系统(包括湖泊物理形态、湿地生境等)的主要环境要素之一<sup>[1]</sup>。众多研究表明,水位的高低、出现时间、持续时间以及变化速率等构成了水位变化过程的主要要素<sup>[2-3]</sup>,与湖泊湿地生态系统的结构、过程和功能密切相关<sup>[2-8]</sup>。

湖泊生态水位是维持湖泊生物多样性和生态系统结构、过程、功能完整性所需的水位情势,包括水位的变化范围和过程<sup>[2]</sup>。鉴于湖泊生态系统结构、过程、功能及生物多样性保护与湖泊水位密切相关,湖泊生态水位是湖泊生态水文的重要研究内容<sup>[2]</sup>。当前湖泊生态水位分析主要落脚于最小水位上<sup>[9-15]</sup>,而其计算方法如曲线相关法、功能法和最低生态水位法的结果也均为单一值<sup>[9]</sup>。由于湖泊生态系统具有复杂性和多样性特征,现有研究结果难以为湖泊优化调控提供科学依据。因此,亟需构建可反映完整水位变化范围和过程的生态水位指标体系,并基于天然水位变化特征计算生态水位目标值范围的新方法<sup>[2]</sup>,以水位作为标准为湖泊优化调控提供重要依据。

菜子湖包括嬉子湖、白兔湖和菜子湖3个子湖,是白头鹤、东方白鹳、豆雁及小天鹅等候鸟在东亚迁徙路线上的重要越冬地和停歇地之一,对生物多样性保护具有重要意义<sup>[16]</sup>。冬候鸟作为菜子湖湿地生态系统的指示生物,其种群数量和时空分布受到水位动态变化的影响。水位上升与下降过程对候鸟生境组成和种群数量多样性具有决定性作用<sup>[17-22]</sup>。候鸟越冬期水位长期维持在过高水平,将影响菜子湖湿地生态水文过程及泥滩地和草滩地出露过程,不利于湿生植被发育<sup>[16]</sup>。低水位的发生时间和持续时间也是影响滩涂湿生植被生长及鸟类栖息和觅食的控制性因素,对浅水区和滩涂湿地生存的候鸟种群数量有重要影响<sup>[8]</sup>。

“引江济淮”工程是综合性战略水资源配置工程,菜子湖线是双线引江布局的主力线路,对保障工程安全运行和维护工程效益意义重大<sup>[16]</sup>。“引江济淮”工程运行后,规划水平年2030、2040年菜子湖候鸟越冬期(11月—次年3月)水位分别按7.5 m和8.1 m控制(85国家高程),候鸟越冬期菜子湖水位较现状有一定程度的抬升。水位抬升一定程度上将影响越冬候鸟适宜生境(泥滩地和草本沼泽)的出露,并对越冬候鸟的栖息环境和食物资源可利用性产生不利影响,尤其是影响到挖掘啄取集团和浅水取食集团的越冬水鸟<sup>[16]</sup>。因此,从湖泊生态系统结构和过程的完整性角度出发,“引江济淮”工程运行期间菜子湖需维持典型的水位变化过程。

本文基于菜子湖湖区水位站(车富岭水位站)长系列逐日水位数据(1956—2018年),采用pettit突变检验法分析了车富岭水位站水位的突变性特征。基于突变检验结果,采用年保证率法计算了菜子湖车富岭水位站天然状况下低水位值,并分析了天然状况下低水位发生时间、低水位历时、水位变化速率3个关键水文要素的动态变化及生态水位目标值范围,研究结果将为“引江济淮”工程运行期间菜子湖水位优化调控提供重要支撑,对协调工程效益和生态大保护之间的关系也具有重要意义。

## 1 研究区概况

菜子湖包括嬉子湖、白兔湖和菜子湖,1950s末湖泊总面积300 km<sup>2</sup>。菜子湖原与长江天然沟通,1959年建成枞阳闸后始成为水库型湖泊。建闸前,菜子湖水位涨落与长江水位基本一致;建闸后,流域来水排泄入江和引江由枞阳闸控制。枞阳闸主要作用是汛期防洪拒江水倒灌,汛后排泄湖水,干旱季节蓄积湖水控制湖水位或引江水灌溉。根据枞阳闸控制运用办法,现状汛期蓄水位分月控制:6月为8.6~9.1 m,7、8月为9.1~9.6 m。干旱年份抗旱需要湖泊蓄水位控制在10.6 m以内。水位人为调控和调度过程维持了菜子湖丰水期水位上涨,枯水期滩涂出露的湿地变化节律<sup>[16]</sup>。湖区水位在7、8月最高,9月湖区水位开始逐渐下降,次年3月水位逐渐上升。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

本文所使用的数据主要包括菜子湖车富岭水位站(30°50′0.6″N,117°6′53″E)1956—2018年共63年逐

日水位数据. 数据来源于安徽省水文局, 文中所有水位数据均采用 85 国家高程.

## 2.2 研究方法

相比湖泊生态水文研究, 河流生态流量研究起步较早, 建立了较为完整的水文变化评估指标体系<sup>[2]</sup>, 其中代表性的是水文变化指标体系(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)<sup>[23-25]</sup>. IHA 法从流量、频率、发生时间、历时和变化速率共 5 个方面确定了 33 个具有生态意义的关键水文参数. 变异性范围法(Range of Variability Approach, RAV)建立在分析 IHA 指标参数的基础上, 被广泛应用于河流生态流量估算及人类活动对河流水文条件的影响研究<sup>[26-28]</sup>. 湖泊具有与河流相似的水文变化规律, 因此 RVA 法亦应用于湖泊生态水位过程确定<sup>[2-3]</sup>. 本文首先采用 pettitt 突变检验法检验车富岭水位站水位变化特征, 并以 pettitt 突变检验的结果为依据, 分析车富岭水位站是否存在突变点. 如存在突变点, 则基于突变前的水位序列分析菜子湖车富岭水位站低水位值, 并计算低水位发生时间、低水位历时、水位变化速率 3 个关键水文要素指数的动态变化. 若不存在突变点, 则基于车富岭水位站的整个时间序列分析菜子湖车富岭水位站低水位值, 并计算关键水文要素指数的动态变化. 最后, 借鉴 RVA 法确定河流生态需水的标准, 分别取 33% 和 67% 分位数计算低水位发生时间、低水位历时、水位变化速率等关键水文要素的上、下限, 以此作为生态水位的区间值.

**2.2.1 突变检验** 采用 pettitt 突变检验法<sup>[29]</sup>对菜子湖车富岭水位站、枞阳闸上水位站和枞阳闸下水位站长时间序列水位数据进行突变性检验. pettitt 突变检验法的原理是在一长度为  $n$  的时间序列  $x_i (1 \leq i \leq n)$  寻找突变点, 判断突变点前后的累计分布函数是否具有统计意义上的显著水平<sup>[29]</sup>. 该方法利用 Mann-Whitney 统计量  $U_{t,n}$  来检验样本  $x_1, x_2, \dots, x_t$  和  $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$  是否来自于同一总体. 统计量  $U_{t,n}$  的计算方法如下<sup>[29-31]</sup>:

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

pettitt 突变检验法通过统计量  $U_{t,n}$  计算统计序列的最大值  $K_t$  并对该值进行显著性检验以判断突变点在统计意义上是否显著<sup>[29-31]</sup>. 该方法的原假设  $H_0$  为: 长时间序列数据  $x_i (1 \leq i \leq n)$  的分布函数在时间  $t$  不存在突变点; 备择假设  $H_1$  为: 长时间序列数据  $x_i (1 \leq i \leq n)$  的分布函数在时间  $t$  存在突变.

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (3)$$

$$P \cong 2\exp\{-6(K_t)^2/(n^3 + n^2)\} \quad (4)$$

### 2.2.2 关键水文要素 (1) 低水位值.

采用长系列日水位频率大于 75% 保证率的水位作为低水位值, 计算公式为<sup>[2-3]</sup>:

$$LWL = P_{75\%}(DWL_i) \quad (5)$$

式中,  $LWL$  为低水位(m),  $DWL_i$  为实测日平均水位(m),  $P_{75\%}(DWL_i)$  为 75% 保证率下的日平均水位(m).

### (2) 低水位发生时间.

湖泊低水位发生时间是指湖泊水位初次消落至低水位的日期<sup>[2-3]</sup>. 为避免水位日波动造成的误差, 将连续 7d 的水位均值达到低水位值的事件认定为低水位事件, 计算公式为<sup>[2-3]</sup>:

$$LWL_{st} = \min(JD), \text{ s.t. } \frac{1}{7} \sum_{i=JD}^{JD+6} DWL_i \leq LWL \quad (6)$$

式中,  $LWL_{st}$  为低水位发生时间(年积日),  $JD$  为日期(年积日).

### (3) 低水位历时.

低水位历时是指低水位发生的持续时间, 为低水位从发生日期到结束日期的持续时间, 计算公式为<sup>[2-3]</sup>:

$$LWL_d = LWL_{et} - LWL_{st} \quad (7)$$

$$LWL_{et} = \max(JD), \text{ s.t. } \frac{1}{7} \sum_{i=JD}^{JD+6} DWL_i \leq LWL \quad (8)$$

式中,  $LWL_d$  和  $LWL_{et}$  分别为低水位持续时间(d)和低水位结束日期(年积日).

(4) 候鸟越冬期水位变化速率.

候鸟越冬期水位变化速率指枯水期时段内邻近 2 日内水位的变化速率,正值表示上升,负值表示下降,计算公式如下:

$$WL_{\text{rat}} = WL_{i+1} - WL_i \tag{9}$$

式中,  $WL_{\text{rat}}$  表示候鸟越冬期水位变化速率(m/d),  $i$  表示第  $i$  天.

(5) 候鸟越冬期生态水位.

由于菜子湖水位的年际和年内波动,生态水位的取值也应当有一定的可变范围. 在确定低水位阈值后,可计算出低水位发生时间、低水位历时及候鸟越冬期水位变化速率. 借鉴 RVA 法确定河流生态需水的标准,取 33% 和 67% 分位数作为生态水位区间的上、下限<sup>[2]</sup>,以反映水位指标的不确定性及其年际和年内自然波动.

3 结果与分析

3.1 水位变化特征

3.1.1 年内变化特征 根据菜子湖车富岭水位站多年逐日水位观测数据(1956—2018 年),菜子湖水位在年内具有明显的高、低水位变化(图 1). 多年平均情况下,最低水位发生在 2 月 9 日,为 6.88 m;最高水位发生在 7 月 25 日,为 11.08 m. 相同日期的最高和最低水位在 63 年内最大差值达 7.24 m. 从多年日均值来看,以 7 月 25 日为界,全年可分为 2 个水位变化时期,2 月 9 日至 7 月 25 日为水位上升阶段,7 月 25 日至年末为水位下降阶段.

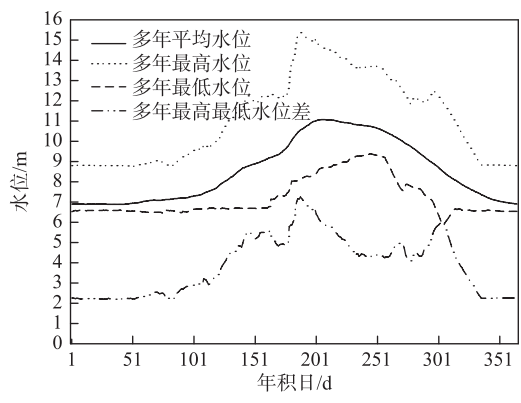


图 1 菜子湖车富岭水位站 1956—2018 年日水位变化

Fig.1 Daily water levels of Chefuling Station in Lake Caizi during 1956—2018

根据各水位站多年月平均水位统计结果(图 2),车富岭水位站年内最高水位出现在 8 月,为 10.90 m;年内最低水位出现在 1 月,为 6.90 m. 从多年月平均水位来看,以 8 月为界,全年可分为 2 个水位变化时间,1—8 月为水位上升阶段,8—12 月为水位下降阶段.

3.1.2 水位突变特征 突变检验分析结果表明,车富岭水位站 1956—2018 年年平均水位数据未出现显著性超过 0.05 的突变点( $K_t = 62, P > 0.05$ )(图 3).

3.2 低水位发生时间与历时

菜子湖低水位,即 75% 保证率水位为 6.94 m. 从发生时间来看,菜子湖低水位一般开始于 11 月或 12 月,但不同年份之间存在一定波动,年际低水位发生时间的标准差为 27 d. 1956—2018 年记录的低水位最早和最迟发生时间分别为 10 月和次年 3 月,其中 1978、1997、2015—2018 年未发生低水位事件.

从水位历时来看,低水位的年均历时为 69 d,历史上低水位历时最大值为 167 d(1956 年),低水位历时最小值为 0 d(1978、1997、2015—2018 年),年际低水位历时的标准差为 49 d(图 4).

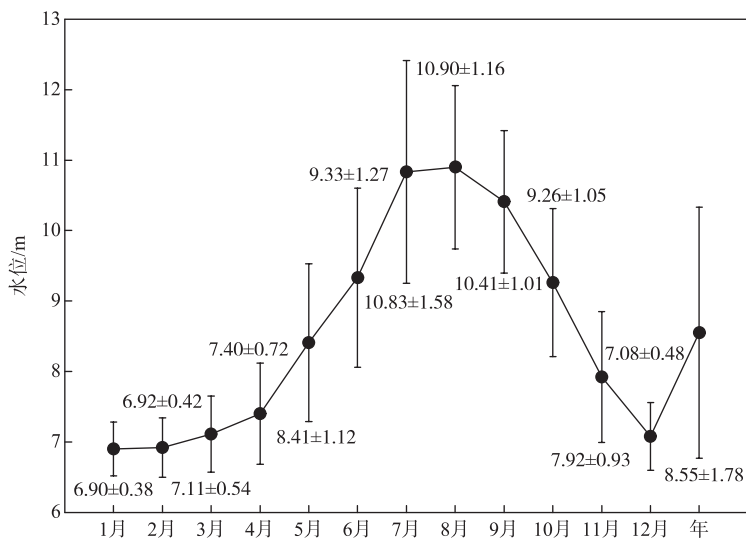


图2 菜子湖车富岭水位站 1956—2018 年月平均水位统计值

Fig.2 Statistics of the monthly average water level of Chefuling Station in Lake Caizi during 1956–2018

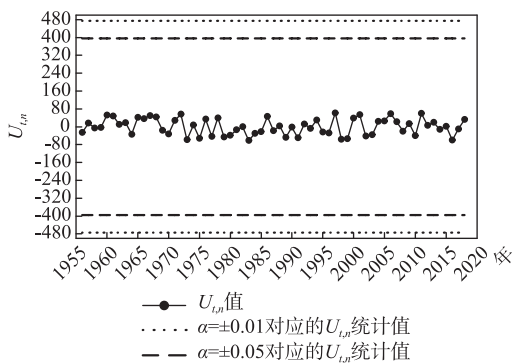


图3 菜子湖车富岭水位站 1956—2018 年平均水位突变检验

Fig.3 Abrupt change test of annual average water level of Chefuling Station in Lake Caizi during 1956–2018

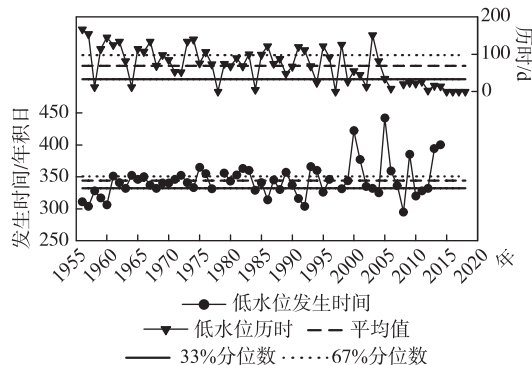


图4 车富岭水位站 1956—2018 年低水位发生时间与历时

Fig.4 Timing and duration of low water level of Chefuling Station in Lake Caizi during 1956–2018

### 3.3 候鸟越冬期水位变化速率

从菜子湖候鸟越冬期多年水位值的计算结果来看,菜子湖候鸟越冬期水位变化速率的均值为 $-0.009$  m/d,但水位变化速率存在一定的年内和年际波动. 从年际变化速率来看,候鸟越冬期水位变化速率年均值为 $-0.034 \sim 0.009$  m/d (图 5a). 从年内变化速率来看,候鸟越冬期水位变化速率日均值为 $-0.051 \sim 0.016$  m/d (图 5b).

### 3.4 候鸟越冬期生态水位

候鸟越冬期菜子湖生态水位是由低水位发生时间与历时、候鸟越冬期水位变化速率等天然水位情势指标构成的. 基于菜子湖车富岭水位站低水位发生时间与历时以及水位变化速率等计算结果,计算出 33% 和 67% 分位数数值作为生态水位的区间阈值. 根据菜子湖生态水位的区间阈值的计算结果,菜子湖低水位发生时间的区间阈值为 332~351 d (11 月 27 日至 12 月 16 日),历时的区间阈值为 33~98 d. 菜子湖候鸟越冬

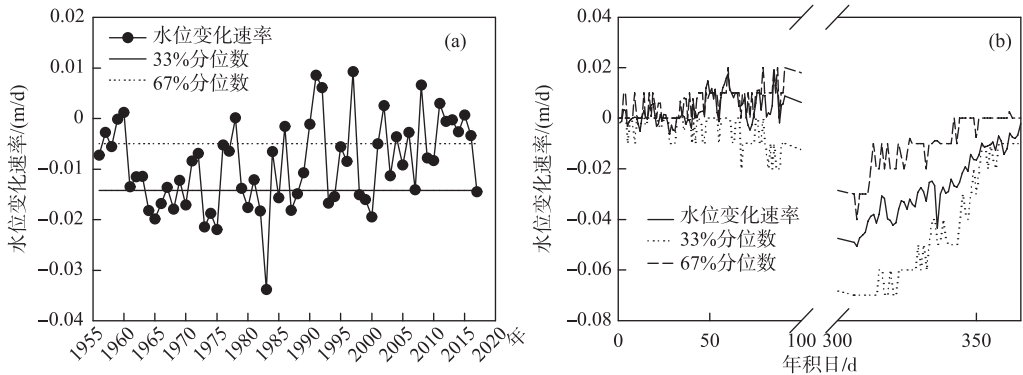


图5 车富岭水位站 1956—2018 年 11 月—次年 3 月水位变化速率  
Fig.5 Changing rate of water level of Chefuling Station in Lake Caizi from 1956—2018 during the overwintering period

期水位变化速率的区间阈值为 $-0.070 \sim 0.020$  m/d.

#### 4 讨论

水位是湖泊水文情势的主要特征指标,是直接或间接影响湖泊湿地生态系统结构、过程和功能的主要环境要素之一<sup>[1]</sup>. 当前,湖泊生态水位研究主要集中于计算湖泊的最低生态水位<sup>[10-15]</sup>. 然而,众多研究表明:水位的高低、出现时间、持续时间以及变化速率等构成了水位变化过程的主要要素<sup>[2-3]</sup>. 因此,维持与湖泊生态系统结构、过程和功能密切相关的湖泊生态水位过程是当今湖泊科学领域面临的重要科学问题<sup>[2-5,22]</sup>,也是实现湖泊生态系统健康(包括结构、过程和功能完整性)的重要需求.

“引江济淮”工程是综合性战略水资源配置工程,对保障工程安全运行和维护工程效益意义重大<sup>[16]</sup>. “引江济淮”工程运行后,规划水平年 2030、2040 年菜子湖候鸟越冬期(11 月—次年 3 月)水位分别按 7.5 m 和 8.1 m 控制(85 国家高程),较天然水位情势下菜子湖低水位值会有所抬升,将从一定程度上影响菜子湖在长期的发育过程中已形成的适宜水位变化规律,对越冬候鸟泥滩地和草本沼泽等适宜生境的出露及越冬候鸟的栖息环境和食物资源可利用性产生不利影响<sup>[16]</sup>. 在长江大保护的政策背景下,“引江济淮”工程前期设计阶段,多家设计单位就菜子湖水位的优化调度进行数次论证,但如何全面协调工程效益和生态大保护之间的关系,如何维持菜子湖生态系统结构、过程和功能完整性,仍是“引江济淮”这项大型跨流域调水工程的重大难点<sup>[16]</sup>. 从湖泊生态系统结构和过程的完整性角度出发,“引江济淮”工程运行期间菜子湖需维持典型的水位变化过程. 但鉴于菜子湖车富岭水位站 2015—2018 年连续 4 年也未发生低水位事件,而且缺乏客观数据和研究成果表明工程运行后菜子湖候鸟越冬期水位较天然水位情势下低水位值抬升时会对冬候鸟适宜生境造成不可逆影响. 建议结合越冬期湿地生境保护适应性水位调度试验和生态环境监测,研究菜子湖湿地生境、重要水鸟种群数量、种群空间分布格局和群落结构、候鸟栖息地选择对水位的响应关系,揭示低水位值抬升对菜子湖越冬候鸟适宜生境及重要越冬水鸟种群数量和分布格局的影响机制,为运行期菜子湖水位优化调控、湿地生境保护提供数据支撑,为落实水利工程建设绿色发展理念提供指导.

#### 5 结论

本文利用 pettitt 突变检验法对菜子湖 1956—2018 年的年均水位进行突变检验. 利用年保证率法计算菜子湖低水位值,借鉴河流生态流量计算中的变异性范围法(RVA),分析低水位发生时间、历时和水位变化速率等在内的生态水位指标体系. 具体结论有:

1) 菜子湖车富岭水位站 1956—2018 年年均水位无显著突变. 从发生时间来看,菜子湖车富岭水位站低水位一般开始于 11 月或 12 月,低水位发生时间的均值为 344 d,年际低水位发生时间的标准差为 27 d,其中

有6年未发生低水位事件. 从水位历时来看, 低水位的年均历时为69 d, 历史上低水位历时最大值为167 d, 最小值为0 d, 标准差为49 d. 菜子湖候鸟越冬期水位变化速率的均值为 $-0.009$  m/d, 但水位变化速率存在一定的年和年际波动. 候鸟越冬期水位变化速率年均值为 $-0.034 \sim 0.009$  m/d, 日均值为 $-0.051 \sim 0.016$  m/d.

2) 菜子湖低水位发生时间在年内的332~351 d之间, 历时为33~98 d, 对湖泊生态系统结构、过程和功能不会产生较大影响. 菜子湖11月一次年3月水位变化速率维持在 $-0.070 \sim 0.020$  m/d, 对维持冬候鸟栖息和觅食生境具有重要意义.

3) 加强低水位值抬升对菜子湖越冬候鸟适宜生境及重要越冬水鸟种群数量和分布格局的影响研究, 用科学试验和生态环境监测数据为菜子湖水位进一步优化调度提供科学依据.

## 6 参考文献

- [1] Yao X, Yang GS, Wang RR. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 813-821. DOI:10.18307/2014.0601. [姚鑫, 杨桂山, 万荣荣等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 813-821.]
- [2] Gan F, Tang L, Guo HC *et al.* New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 783-790. DOI:10.18307/2015.0504. [淦峰, 唐琳, 郭怀成等. 湖泊生态水位计算新方法与应用. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 783-790.]
- [3] Chen Y, Guan YQ, Miao JZ *et al.* Determination of the ecological water-level and assuring degree in the Lake Gaoyou, northern Jiangsu with long-term hydrological alteration. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 398-408. DOI:10.18307/2017.0216. [陈玥, 管仪庆, 苗建中等. 基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 398-408.]
- [4] Hellsten S, Riihimäki J. Effects of lake water level regulation on the dynamics of littoral vegetation in northern Finland. *Hydrobiologia*, 1996, **340**(1/2/3): 85-92.
- [5] Sherman DE, Kroll RW, Engle TL. Flora of a diked and an undiked southwestern Lake Erie wetland. *Ohio Journal of Science*, 1996, **96**(1): 4-8.
- [6] Holm TE, Clausen P. Effects of water level management on autumn staging waterbird and macrophyte diversity in three Danish coastal lagoons. *Biodiversity and Conservation*, 2006, **15**(14): 4399-4423.
- [7] Wantzen KM, Rothhaupt KO, Mortl M *et al.* Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Hydrobiologia*, 2008, **613**: 1-4.
- [8] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al.* Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水水位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 597-605.]
- [9] Cui BS, Zhao X, Yang ZF *et al.* Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1788-1795. [崔保山, 赵翔, 杨志峰. 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算. 生态学报, 2005, **25**(7): 1788-1795.]
- [10] Li XH, Song YD, Zhang FD *et al.* The calculation of lowest ecological water level of Lake Bosten. *J Lake Sci*, 2007, **19**(2): 177-181. DOI:10.18307/2007.0211. [李新虎, 宋郁东, 张奋东. 博斯腾湖最低生态水位计算. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 177-181.]
- [11] Liang J, Peng YR, Guo SL *et al.* Determination of ecological water-level in the eastern lake Dongting with hydrological alterations. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 330-334. DOI:10.18307/2013.0303. [梁婕, 彭也茹, 郭生练等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 330-334.]
- [12] Li XH, Song YD, Li YT *et al.* Calculation methods of lowest ecological water level of lake. *Aria Land Geography*, 2007, **30**(4): 526-530. [李新虎, 宋郁东, 李岳坦等. 湖泊最低生态水位计算方法研究. 干旱区地理, 2007, **30**(4): 526-530.]
- [13] He J, Xia ZQ, Huang F *et al.* Lake ecological water level calculation based on wet, normal and dry years. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(5): 33-36. [贺金, 夏自强, 黄峰等. 基于丰平枯水年的湖泊生态水位计算. 水电能源科学, 2017, **35**(5): 33-36.]

- [14] Zhao X, Cui BS, Yang ZF. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(5): 1033-1040. [赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. 生态学报, 2005, **25**(5): 1033-1040.]
- [15] Hu CM, Narengerile, You L. Study of ecological water levels of Bosten Lake for wate quality management. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 748-755. [胡春明, 娜仁格日乐, 尤立. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究. 生态学报, 2019, **39**(2): 748-755.]
- [16] Wang XY, Jiang B, Tian ZF *et al.* Impact of water level changes in Lake Caizi (Anhui province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1636-1645. DOI: 10.18307/2018.0615. [王晓媛, 江波, 田志福等. 冬季安徽菜子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1636-1645.]
- [17] Zhou X, Zhao YS, Liang WG. Modeling of water level and submersion or emersion in Poyang Lake wetland. *Geographical Research*, 2009, **28**(6): 1722-1730. [周霞, 赵英时, 梁文广. 鄱阳湖湿地水位与洲滩淹露模型构建. 地理研究, 2009, **28**(6): 1722-1730.]
- [18] Xia SX, Yu XB, Fan N. The wintering habitats of migrant birds and their relationship with water level in Poyang Lake, China. *Resources Science*, 2010, **32**(11): 2072-2078. [夏少霞, 于秀波, 范娜. 鄱阳湖越冬候鸟栖息地面积与水位变化的关系. 资源科学, 2010, **32**(11): 2072-2078.]
- [19] Liu CL, Tan YJ, Lin LS *et al.* The wetland water level process and habitat of migratory birds in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2011, **23**(1): 129-135. DOI: 10.18307/2011.0119. [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. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 129-135.]
- [20] Hu ZP. The habitat characteristics of White Cranes to live through the winter in Poyang Lake and the recreation for water level changing in the lake. *Jiangxi Science*, 2012, **30**(1): 30-35, 120. [胡振鹏. 白鹤在鄱阳湖越冬生境特性及其对湖水水位变化的响应. 江西科学, 2012, **30**(1): 30-35, 120.]
- [21] Qi SH, Zhang QM, Jiang F *et al.* Study on the effects on the landscape spatial pattern of the wintering birds' habitat from lake level in Poyang Lake wetland. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(8): 1345-1355. [齐述华, 张起明, 江丰等. 水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究. 自然资源学报, 2014, **29**(8): 1345-1355.]
- [22] Chen B, Cui P, Liu GH *et al.* Relationships between changing water levels and numbers of wintering tuber-eating birds in Poyang Lake National Nature Reserve. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 243-252. DOI: 10.18307/2014.0211. [陈冰, 崔鹏, 刘观华等. 鄱阳湖国家级自然保护区食块茎鸟类种群数量与水位的关系. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 243-252.]
- [23] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J *et al.* A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**(4): 1163-1174.
- [24] Richter BD, Baumgartner JV, Wigington R *et al.* How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 231-249.
- [25] Richter BD, Baumgartner JV, Baun DP *et al.* A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, **14**: 329-340.
- [26] Zhang Q, Li JF, Chen XH *et al.* Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with the hydrological alterations. *Acta Ecologic Sinica*, 2011, **31**(7): 4826-4834. [张强, 李剑锋, 陈晓宏等. 水文变异下的黄河流域生态流量. 生态学报, 2011, **31**(7): 4826-4834.]
- [27] Liu GH, Zhu JX, Xiong MY *et al.* Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at meigang station of xi-jiang river. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(1): 51-57. [刘贵花, 朱婧瑄, 熊梦雅等. 基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究. 水文, 2016, **36**(1): 51-57.]
- [28] Dai W, Lv DQ, Wang JF *et al.* Analysis of hydrological regime variation in three outlets of Jingjiang river after the impoundment of three gorges reservoir. *Water Power*, 2017, **43**(8): 26-30. [代稳, 吕殿青, 王金凤等. 三峡水库运行对荆江三口水文情势变异程度分析. 水力发电, 2017, **43**(8): 26-30.]
- [29] Pettitt AN. A Non-parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 1979, **28**(2): 126-135.
- [30] Moraes JM, Pellegrino GQ, Ballester MV *et al.* Trends in Hydrological Parameters of a Sourthern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. *Water Resources Management*, 1998, **12**: 295-311.
- [31] Gao P, Mu XM, Wang F *et al.* Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Science*, 2011, **15**: 1-10.