

望虞河排水能力初步研究

董岩芳^{1,2}, 闻余华¹, 鲍建腾³

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水旱灾害防御调度指挥中心, 江苏 南京 210029)

摘要:通过收集和处理 2015—2020 年望虞河代表站的水位、潮位和排水量数据,采用多元回归法对上游水位、长江潮位和望虞河排水流量进行回归分析,计算得到望虞河的排水能力。另外,比较多元回归法和一潮推流法计算的日排水量发现,多元回归法计算公式的系数固定,能客观反映望虞河的排水能力,而一潮推流法计算公式的率定参数每年都有变化,在实际应用中较为复杂。研究表明,望虞河的排水能力与上游水位呈正相关关系,与长江潮位呈负相关关系。

关键词:望虞河; 多元回归法; 上游水位; 长江潮位; 排水能力

中图分类号:TV882.8 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2021)09-0016-05

Preliminary study on drainage capacity of Wangyu River

DONG Yanfang^{1,2}, WEN Yuhua¹, BAO Jianteng³

(1. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, China;
2. Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Province Flood and Drought Disaster Control Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: By collecting and processing water level, tidal level and displacement data of representative stations of Wangyu River from 2015 to 2020, the water level, tidal level and drainage discharge of Wangyu River in the upper reaches of the Yangtze River were analyzed by using multiple regression method, and the drainage capacity of Wangyu River was calculated. In addition, compared with the daily displacement calculated by multiple regression method and one - tidal push method, it's founded that the coefficient of multiple regression method was fixed, which could objectively reflect the drainage capacity of the Wangyu River, while the calibration parameters of the one - tidal push method vary every year, which was more complex in practical application. The results showed that the drainage capacity of Wangyu River was positively correlated with the upstream water level, and negatively correlated with the tidal level of the Yangtze River.

Key words: Wangyu River; multiple regression method; upstream water level; tidal level of the Yangtze River; drainage capacity

随着经济社会的快速发展,太湖流域生产、生活、生态用水需求越来越大,也使得望虞河引排水形势发生显著变化。2002 年,水利部太湖流域管理局等有关单位正式实施“引江济太”调水工程,望虞河作为连接太湖与长江的主要通道,一方面

可以将长江水引入太湖,加快水体交换,改善太湖水质;另一方面可以将太湖洪水、区域涝水排入长江,减少太湖流域因洪涝灾害带来的损失^[1]。目前,关于“引江济太”引水情况的研究成果较为丰富,但对于其自然情况下排水能力实际情况的研

收稿日期:2021-04-16

作者简介:董岩芳(1998—),女,硕士研究生,研究方向为土木水利专业。E-mail: 1398277645@qq.com

究分析较少。望虞河的排水能力受多种因素的综合影响,本文通过对相关水文数据进行处理和分析,旨在归纳主要因素对望虞河排水能力影响的具体规律。望虞河排水涉及太湖洪水排泄和望虞河两岸涝水排泄,影响太湖流域洪水调度决策。进行望虞河排水能力分析不仅有利于太湖流域防洪排涝工作的展开,更能为该流域防洪调度一体化提供决策服务。

1 工程概况及水文站设置

1.1 望虞河工程概况

望虞河位于江苏省境内,南起太湖边的沙墩口,在常熟耿泾口流入长江,全长 62.3 km,沿线地形平坦,底宽约 72~94 m,河底高程 -3 m。望虞河西部为澄锡虞高地,地面高程约 4.5~5.5 m,东部为阳澄淀柳区,地面高程约 3.5 m。作为太湖的主要引排水通道,当洪涝发生时,望虞河承泄太湖洪水,外排澄锡虞高地涝水。在干旱情况下,望虞河从长江引水入太湖,补充太湖水资源量。望虞河工程兼顾防洪、排涝、供水、航运效益,于 1991 年 11 月开工,2006 年 4 月通过竣工验收。工程由总长 60.8 km 的河道、干流上游的望亭水利枢纽、下游的常熟水利枢纽、两岸支流口门控制建筑物组成^[2]。

望亭水利枢纽位于望虞河和京杭大运河交汇处,是望虞河水量进出太湖最近的控制工程,采用“上槽下洞”立体交叉的布置形式,设计流量为 400 m³/s。常熟水利枢纽距望虞河入江口 1.6 km,作为望虞河连接长江的控制建筑物,是太湖泄洪和供水的主要控制性工程之一。常熟水利枢纽中间设置泵站,可进行双向抽水,用于引水和排水,共有 9 台设计流量为 20 m³/s 的机组。另外泵站下层流道可实现自由引排水,设计流量 125 m³/s。泵站两侧各设置 1 个节制闸,设计流量 375 m³/s。常熟水利枢纽采用闸泵联合调度方式,在长江潮位影响下,只有闸门关闭时,才使用泵站进行抽排水。由于常熟水利枢纽位于望虞河下游,既是“引江济太”的龙头工程,又是望虞河排水入江的最后一道控制性口门,因此望虞河的引排水能力主要取决于常熟水利枢纽引排水能力^[3-4]。

1.2 望虞河相关水文站设置

望虞河是“引江济太”调水试验工程的主干道之一,其警戒水位为 3.80 m,保证水位为 4.20 m。望虞河干流主要布设了 5 个水文站点,望虞闸水文站位于望虞河常熟水利枢纽,观测闸上引排水量,

张桥水文站处于望虞河中部,甘露水位站位于鹅真荡下游,琳桥水位站位于西塘河与望虞河交界处,望亭(立交)水文站位于望亭水利枢纽,观测望虞河进出太湖水量。另外,徐六泾水文站位于常浒河入江口,监测长江潮位。

2 影响望虞河排水能力主要因素分析

望虞河排水能力受到多种因素的综合影响,目前对其排水能力的研究较少,关于其影响因素的探索空间还很大,次要影响因素包括河道情况、海平面变化、外江水位。主要影响因素为上游水位和长江潮位。

2.1 河道情况的影响

河道情况主要包括河道形状、比降、淤积情况,不同形状的河道过流能力不同,梯形河道过流能力大于扁圆形河道,河道比降也影响河道的排水能力。曼宁公式为

$$V = \frac{k}{n} R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (1)$$

式中: V 为流速, m/s; k 为转换常数,国际单位制中值为 1; n 为糙率; R 为水力半径, m; S 为坡度,即比降。

由式(1)可知,当河道糙率和过流断面形状一定时,比降越大,河道的过流能力越大;王桂风等^[3]在望虞河扩大方案研究中发现,河道淤积会使其过水面积减小,沿线水位雍高,部分河段出现阻水现象,影响其排水能力。

2.2 海平面变化的影响

王腊春等^[5]通过分析海平面变化对太湖流域排涝的影响发现,当长江口海平面上升,望虞河的排涝过程会受到一定程度的影响,外排水量减小。

2.3 外江水位的影响

王跃奎等^[6]通过分析 2009 年望虞河泄洪影响因素发现,持续降雨会导致外江水位长期高于望虞河水位,由于外江水位的顶托作用,常熟水利枢纽排水能力下降。

2.4 上游水位和长江潮位的影响

望虞河排水能力同时受上游水位和长江潮位的影响,上游水位的变化导致上下游水位差改变,进而影响其排水能力,长江口海域潮汐的顶托作用也会阻碍望虞河排水。选取 2020 年 7 月 24 日至 30 日张桥站流量、张桥站日平均水位、徐六泾日平均高潮、望虞河日平均排水流量(表 1)进行分析。其中张桥站流量代表望虞河中段的行洪能力,张桥

站日平均水位代表上游水位,徐六泾日平均高潮代表长江潮位情况,常熟水利枢纽日平均排水流量代表望虞河日平均排水流量^[7-8]。

其潮位能够代表长江潮汐的变化情况。望虞闸上水位能代表一潮推流法中的内河水位。选取张桥站、徐六泾、望虞闸 3 个代表站 2015—2020 年的水

表 1 望虞河 2020 年典型洪水期日平均流量、水位和高潮一览

| 日期 | 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 日平均水位/m | 日平均高潮/m | 日平均排水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) |
|------------|---|---------|---------|--|
| 2020-07-24 | 377.0 | 4.18 | 5.25 | 380.1 |
| 2020-07-25 | 392.0 | 4.12 | 4.83 | 383.7 |
| 2020-07-26 | 387.0 | 4.04 | 4.85 | 338.2 |
| 2020-07-27 | 352.0 | 4.07 | 4.62 | 361.2 |
| 2020-07-28 | 339.0 | 4.10 | 4.34 | 374.4 |
| 2020-07-29 | 332.0 | 4.09 | 4.12 | 383.2 |
| 2020-07-30 | 324.0 | 4.06 | 4.08 | 395.1 |

由表 1 可知,张桥站位于望虞河中段,受潮汐影响较小,其流量只能代表河道中段行洪能力,与常熟水利枢纽日平均排水流量不呈线性关系。如 2020 年 7 月 30 日长江高潮位相对较低,张桥站流量 $324 \text{ m}^3/\text{s}$ 最小,而常熟水利枢纽日平均排水流量 $395 \text{ m}^3/\text{s}$ 最大。因此,张桥站的流量不能真正反映望虞河的排水能力。

另外还发现,望虞河同水位下,长江潮位越高,其排水流量越小,反之亦然。如 2020 年 7 月 26 日至 30 日张桥站日平均水位介于 $4.04 \sim 4.10 \text{ m}$,基本处在同级水位。7 月 26 日平均高潮 4.85 m 相对较高,对应的排水流量 $338.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 最小,7 月 30 日平均高潮 4.08 m 相对最低,对应的排水流量 $395.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 最大。同级潮位下,望虞河水位越高,其排水流量越大,反之亦然。如 2020 年 7 月 25 日至 26 日平均高潮 $4.83 \sim 4.85 \text{ m}$,基本处在同级潮位。7 月 25 日张桥水位 4.12 m ,明显高于 7 月 26 日的 4.04 m ,对应的排水流量 7 月 25 日 $383.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 明显大于 7 月 26 日的 $338.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为准确揭示影响望虞河排水能力的主要因素,本文将选取更多代表性数据,采用多元回归等分析方法,研究望虞河的排水能力。

3 数据来源及分析方法

3.1 数据来源及处理

张桥站位于望虞河中段,其平均水位对望虞河水位有一定的代表性。徐六泾位于常浒河入江口,

文资料并进行分析,来研究望虞河排水能力。由于受到长江潮汐的影响,望虞河的水位、流量不呈简单线性关系,并且没有相应公式来计算瞬时流量,因此将望虞河的水位、潮位和排水流量过程概化为日过程,统一采用日平均数据。一般来说,望虞河水位不高的情况下,望虞闸不全部开闸排水。当望虞河水位较高,达到或超过警戒水位 3.80 m (张桥)以上时,望虞闸闸门全开,全力抢排。受潮汐顶托影响,当长江水位高于内河水位时,望虞闸关闸,启用泵站抽排入江。因此本次选择的样本均为张桥站日平均水位在警戒水位 3.80 m 以上的数据,相应的排水流量为河道最大排水流量,以获得真实的望虞河排水能力。

3.2 多元回归法

从徐六泾潮位数据中挑选每日 2 个高潮水位,取其平均高潮作为每日高潮水位。将 2015—2020 年望虞河日平均排水流量、张桥站日平均水位、徐六泾日平均高潮数据资料进行回归分析,建立望虞河排水流量和上游水位、长江潮位的回归方程。若回归方程的相关系数低,则回归效果不佳;若相关系数较高,则回归效果较好。在本次回归分析时,对少部分不合理的样本数据进行剔除,最后确定了 44 组样本。2015 年选取了 6 月 19 日至 7 月 21 日共 10 组样本,张桥站日平均水位为 $3.81 \sim 4.47 \text{ m}$,徐六泾日平均高潮为 $4.17 \sim 4.85 \text{ m}$,望虞河日平均排水流量为 $320.6 \sim 687.5 \text{ m}^3/\text{s}$;2016 年选取了 6 月 28 日至 7 月 26 日共 19 组样本,张桥站

日平均水位为 3.81 ~ 4.55 m, 徐六泾日平均高潮为 3.88 ~ 5.09 m, 望虞河日平均排水流量为 342.6 ~ 621.5 m³/s; 2020 年选取了 7 月 6 日至 8 月 3 日共 15 组样本, 其中张桥站日平均水位为 3.82 ~ 4.48 m, 徐六泾日平均高潮为 3.86 ~ 5.29 m, 望虞河日平均排水流量为 338.2 ~ 505.3 m³/s。

回归分析的 R^2 为 0.741, 回归情况较好, 用来分析上游水位和长江潮位对望虞河排水能力的影响具有可靠性。回归方程为

$$y = 302.43 x_1 - 93.42 x_2 - 390.67 \quad (2)$$

式中, y 为望虞河日平均排水流量, m³/s; x_1 为张桥站日平均水位, m; x_2 为徐六泾日平均高潮, m。

由式(2)可知, 望虞河排水能力与上游水位呈正相关, 与长江潮位成呈负相关。上游水位的回归系数为 302.43, 长江潮位的回归系数为 -93.42, 可知上游水位对望虞河排水能力的影响约是长江潮位对其影响的 3 倍, 相当于上游水位上升 0.10 m 和长江潮位下降 0.30 m 对望虞河排水能力的影响是大致相同的。

3.3 一潮推流法

一潮推流法是潮汐要素与一次开闸(引水或排水)的平均流量相关整编推流的方法, 是目前较为成熟的推流方法之一。一个落潮期从平潮开始排水至落潮憩流止, 期间每小时测流 1 次。当闸上水位即内河水位高于长江潮位时, 望虞闸排水。当长江潮位与内河水位一致时开启闸门或关闭闸门, 将此时的水位作为稳定水位 Z , 一个落潮期的最低潮位记为 $Z_{低}$, 则波高 $\Delta Z = Z - Z_{低}$ 。开闸时间记为 T_1 , 关闸时间记为 T_2 , 则一潮历时为 $T_2 - T_1$ 。望虞闸的一潮推流法平均排水流量通用公式为

$$Q = KZ\alpha\Delta Z\beta \quad (3)$$

式中, Q 为排水流量, m³/s; Z 为稳定水位, m; ΔZ 为波高, m; K 为系数; α 、 β 为指数, 根据当年实测资料率定得到。

由于徐六泾一日有 2 个低潮, 相应地有 2 个排水期。按照式(3)计算一日第一潮的平均排水流量, 再乘以一潮历时将其转化为排水量, 记为排水量 1。按照相同方法得到一日第二潮的排水量, 记为排水量 2。将一日内两潮排水量相加, 再加上当日泵站抽排水量, 得到一潮推流日排水量。

3.4 两种方法的比较

选择 2015 年、2016 年、2020 年大水年典型洪水期, 将一潮推流法与多元回归法计算得到的日排水量结果进行比较, 见表 2。

可以看出 2015 年、2016 年、2020 年大水年典型洪水期, 一潮推流法与多元回归法计算得到的日排水量相差不大, 相对误差较小, 可以认为采用多元回归法由上游水位和长江潮位根据回归方程计算的流量结果较为可靠, 能代表望虞河的排水能力。

多元回归法侧重根据回归方程来分析上游水位和长江潮位对望虞河排水能力影响的具体规律。该法计算过程简单, 应用起来较为方便。一潮推流法侧重根据长江潮位和闸上水位之间的关系, 采用望虞闸既有的推流公式来计算排水量。在实际应用过程中, 每年的一潮推流公式中的系数 K 和指数 α 、 β 都需要当年 20 次以上实测流量资料率定得到, 且计算过程较为复杂。

4 研究结论

望虞河的排水能力受包括上游水位、长江潮

表 2 一潮推流与多元回归推流结果对比

| 日期 | 排水量 1/ 万 m ³ | 排水量 2/ 万 m ³ | 泵站抽排水量/ 万 m ³ | 一潮推流日 排水量/万 m ³ | 回归计算水量/ 万 m ³ | 相对误差/ % |
|------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|
| 2015-07-01 | 1 704.0 | 1 851.0 | 0 | 3 555.0 | 3 456.9 | -3 |
| 2015-07-19 | 1 451.0 | 1 358.0 | 441.5 | 3 250.5 | 2 918.5 | -10 |
| 2016-06-28 | 2 048.0 | 2 036.0 | 54.9 | 4 138.9 | 4 016.6 | -3 |
| 2016-06-29 | 2 346.0 | 2 164.0 | 0 | 4 510.0 | 4 221.3 | -6 |
| 2020-07-06 | 1 394.0 | 1 851.0 | 247.4 | 3 492.4 | 3 669.2 | 5 |
| 2020-07-07 | 1 790.0 | 1 754.0 | 245.9 | 3 789.9 | 3 964.3 | 5 |
| 2020-07-08 | 1 327.0 | 1 411.0 | 417.9 | 3 155.9 | 3 489.8 | 11 |

位、河道情况等多种因素的综合影响,本文对上游水位和长江潮位 2 个主要因素进行了多元回归分析,由其与望虞河排水流量建立的回归方程可知,望虞河的排水能力与上游水位和长江潮位有较强的关联,且上游水位对望虞河排水能力的影响约是长江潮位对其影响的 3 倍。与上游水位呈正相关关系,当上游水位上升时,上下游水位差增大,望虞河排水能力增强。与长江潮位呈负相关关系,当长江潮汐的顶托作用增强时,望虞河排水能力减弱。

采用多元回归法进行望虞河排水能力的分析有一定的可靠性和代表性,但还需要更多的可靠数据作为支撑,进一步分析以提高其准确性。望虞河排水能力的影响因素十分复杂,未来需要对更多因素进行定性和定量分析,以更准确地反映其排水能力。

参考文献:

- [1] 胡祉冰, 逢勇, 胥瑞晨, 等. 走马塘排水对望虞河引水水质的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(2):135-140.
- [2] 张睿, 杨高升, 周玉康. 太湖流域望虞河工程后评价[J]. 水利经济, 2005(1):23-24.
- [3] 潘元喜, 刘江伟. 常熟水利枢纽水闸监控系统的修复[J]. 江苏水利, 2003(3):28-30.
- [4] 王桂风, 李灿灿, 宋丽花. 望虞河扩大方案研究[J]. 中国水利, 2016(6):17-20.
- [5] 王腊春, 周寅康, 都金康, 等. 海平面变化对太湖流域排涝的影响[J]. 海洋与湖泊, 2000(6):689-696.
- [6] 王跃奎, 陈润, 高怡. 2009 年望虞河泄洪影响因素分析[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(5):48-49.
- [7] 王建群, 董增川. 太湖流域平望水位和米市渡潮位过程预报研究[J]. 湖泊科学, 2003(3):229-235.
- [8] 江苏省水文水资源勘测局. 2016 年江苏省暴雨洪水[M]. 南京:河海大学出版社, 2018.
- [14] 初长虹, 刘超, 孙玉民, 等. 泵站进水口淹没深度对漩涡的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6):178-186.
- [15] 何耘, 刘成. 水泵吸水口临界淹没深度及其近场水力特性试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(1):92-96.
- [16] 杜敏, 高学平. 进水口最小淹没水深和消涡措施[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007(增刊2):237-239.

(上接第 7 页)