

苏州河清淤对河槽动库容利用效率影响研究

吴 春

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 针对平原感潮河网“外潮、内涝、上洪”的复杂特征,探究苏州河清淤对河槽调蓄效率的影响,解决传统静库容计算忽略动库容占用的问题。通过一维非恒定流模型,以“竹节草”台风为工况,模拟不同清淤方案,量化分析不同清淤深度与有效库容、水位降幅的关系。结果表明,清淤通过降低水面比降显著提升有效库容,其与清淤深度呈非线性边际效益关系,据此推荐了兼顾除涝效益与工程经济性的最优方案。基于动库容理论的清淤优化策略,可为苏州河及类似河网的除涝能力提升提供理论依据。

关键词: 苏州河;底泥清淤;河槽调蓄;动库容;一维非恒定流;平原河网;除涝能力

中图分类号: TV85

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0272-08

Research on Impact of Suzhou Creek Dredging on Utilization Efficiency of River Channel Dynamic Storage Volume

WU Chun

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In view of the complex characteristics of the plain tidal river network, such as “external tides, internal waterlogging and upstream flooding”, the impact of dredging on the storage efficiency of the Suzhou Creek is explored in order to resolve the issue where traditional static storage calculations neglect the occupation by dynamic reservoir capacity. Utilizing a one-dimensional unsteady flow model under the “Zhujiacao” typhoon scenario, various dredging schemes are simulated to quantitatively analyze the relationship between different dredging depths and the effective reservoir capacity as well as the decrease in water level. The results indicate that the dredging significantly increases the effective reservoir capacity by reducing the specific drop of the water surface, which has a nonlinear marginal benefit relationship with the depth of dredging. Based on this, the optimal scheme that takes into account both the flooding control benefits and the economic feasibility of the project is recommended. The dredging optimization strategy based on the dynamic reservoir capacity theory can provide a theoretical basis for improving the flooding control capacity of the Suzhou Creek and similar river networks.

Keywords: Suzhou Creek; sediment dredging; river channel regulation storage; dynamic reservoir capacity; one-dimensional unsteady flow; plain river network; waterlogging drainage capacity

0 引 言

苏州河作为上海市的重要水系,承担着防洪、除涝、航运及生态景观等多重功能。随着主城区雨水管网系统提标改造的快速推进,沿线雨水泵站总流量不断增加,汇流速度进一步加快,导致内涝风险加剧^[1]。同时,受黄浦江潮汐顶托影响,苏州河排水不畅,极易形成“上排下堵”的不利局面。2025年7月30日,“竹节草”台风降雨量大,两翼除涝和市政泵站共向苏州河排水3 386万m³,雨峰与高潮于当日下午

碰头,涝水外排受高潮位严重顶托,河道水位持续上升,导致苏州河水位全线超警戒,除赵屯站外,其余水位代表站点均打破历史记录。底泥清淤作为恢复河道过流能力和提升调蓄能力的传统手段,效果评估通常主要关注起调水位以上断面面积的增加(即有效库容的增加)^[2]。然而,在平原河网排涝过程中,由于水面比降的存在,起调水位至设计水位之间的库容并不能全部用于调蓄削峰,其中一部分被行洪水流占据,即“动库容”效应^[3]。苏州河在外江高潮位顶托的情况下,自身河槽调蓄库容将起着重要的调蓄作用,充分利用好有效调蓄库容能有效应对外江高潮位顶托问题。

目前,关于河道清淤的研究多集中于污染物去

收稿日期: 2026-04-13

作者简介: 吴春(1985—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程规划工作。

除、生态修复及单纯的过流能力提升^[4]。例如,朱伟等^[2]系统阐述了河湖库底泥清淤的内涵与发展方向,强调清淤目标正从单纯的行洪恢复向生态清淤、精准清淤转变。刘昭辰等^[4]以珠江流域为例探讨了生态修复技术在防洪治理中的融合应用。在库容研究方面,传统静库容计算法假定水面水平,在河道型水库及感潮河网中误差显著。李光炽等^[5]提出了河道型水库动库容分析方法,证实动库容对调蓄演算结果影响较大。高成等^[6]探讨了圩区排涝模数与河道调蓄库容的关系,指出水面比降是影响有效库容的关键因素。吴春等^[3,7]进一步分析了圩区及河道中影响河槽调蓄库容的因素,并探讨了雨洪调蓄设施的布局。然而,针对平原感潮河网地区,清淤如何影响河槽“有效调蓄库容”(即扣除行洪动库容后的剩余库容)的研究相对较少,鲜有学者量化清淤对动库容和静库容的综合影响及二者的转化机制。特别是在“风、暴、潮、洪”多碰头的复杂条件下,如何通过清淤与闸泵联合调度最大化提升河槽有效调蓄能力,是优化清淤方案、提升苏州河除涝韧性亟待解决的关键科学问题。

区别于传统仅关注清淤后静库容增加的研究视角,本文引入“动库容”概念,系统揭示了清淤通过降低水面比降释放有效调蓄空间的“流态改善效应”,量化了该效应在不同清淤深度和调度方式下的边际效益,为平原感潮河网地区清淤方案的优化提供了新的理论依据和工程实践路径。

本文旨在结合“竹节草”台风实测水位数据、2021年和2025年苏州河实测断面数据与模型成果,引入“动库容”概念,分析不同清淤方案下苏州河河槽调蓄库容的最大化利用策略。通过构建一维非恒定流模型,模拟典型暴雨与风暴潮组合工况,揭示清淤深度与河槽有效调蓄库容之间的非线性关系,为苏州河底泥清淤和内涝防治的科学决策提供支撑。

1 研究区域概况

苏州河是太湖流域的一条行洪排涝河流,流经江苏、上海,贯穿中心城区,东连黄浦江,上海境内段长53.1 km,平均河宽64 m,贯穿青浦、嘉定、普陀、长宁、静安、虹口、黄浦等区,承担着流域行洪、区域排涝、航运及环境景观生态等综合功能。

苏州河规划设计高水位为4.79 m^[8],防汛墙设计标高为5.20 m^[9]。苏州河入黄浦江口有已建的苏州河口闸。河口闸主要功能为防潮、引水、排水和蓄

水,能有效改善苏州河水质和水环境,提高苏州河防汛能力。水闸防洪标准为千年一遇重现期,相应防御水位为6.26 m,水闸规模为1孔净宽100 m,为液压水下卧倒门^[10]。苏州河西侧有已建苏西闸,距离苏州河口约38 km,主要功能为挡洪,水闸规模为1孔净宽60 m,为浮体一字门^[11]。苏州河沿线支流河道共81条,现状除涝泵闸共69座;苏州河沿线市政雨水排水系统共有31个,服务面积总计66 km²,现状共有雨水强排泵站30座。

近年来,在2021年“烟花”、2022年“梅花”、2024年“康妮”、2025年“竹节草”等台风暴雨期间,苏州河两岸地区多次出现河道水位过高、市政泵站限制排放导致两岸内涝积水^[12]。2025年“竹节草”台风期间,除赵屯站外均创历史新高,其中北新泾最高水位4.63 m,曹家渡以东河段全面超4.71 m^[13],中心城区沿线两岸防汛除涝压力和风险骤增。

2 一维非恒定流模型构建

2.1 模型控制方程

本文采用丹麦水利研究院(DHI)开发的MIKE 11水动力模块构建苏州河一维非恒定流模型。模型基于一维明渠非恒定渐变流圣维南方程组,其数值离散采用Abbott-Ionescu六点隐式有限差分格式。该格式可在较大的克朗数下保持计算稳定性,适用于感潮河网中往复流与急缓流交替的复杂流态模拟^[14-15]:

(1)连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (1)$$

(2)运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: x 为沿河道纵向距离,m; t 为时间,s; Q 为断面流量,m³/s; A 为过水断面面积,m²; h 为水位,m; R 为水力半径,m; C 为谢才系数,m^{1/2}/s; g 为重力加速度,m/s²; q 为旁侧入流流量,m²/s; α 为动能校正系数,本文取1.0。

2.2 模型参数

模型计算范围覆盖苏州河干流,河道长53 km。共概化计算断面217个,平均断面间距约250 m。根据上、下游及沿线实测断面资料,上游段采用2021年实测大断面数据,中下游段(外环线至河口)采用2025年实测大断面数据,以充分反映近年来的河床冲淤变化。

关键参数选取如下:

(1)河道糙率。根据苏州河河道形态与床面特征,参考《水力学计算手册》及苏州河历史洪水率定成果,主槽糙率 n 取0.025~0.032,滩地糙率取0.035~0.045。采用“竹节草”台风实测水位过程进行率定。

(2)求解方法比选。显式差分格式(如Lax-Wendroff格式)受克朗条件限制,计算时间步长需小于波速与空间步长之比,在感潮河网易出现不稳定情况;Preissmann四点隐式格式虽无条件稳定,但对急缓流交替适应性较差。综合计算稳定性与精度,本文选用Abbott-Ionescu六点隐式有限差分格式,水位点与流量点交替布置,可有效处理感潮河网中的超临界流过渡问题。时间步长取30 s,空间步长自适应调整(50~500 m)。

(3)内边界条件。沿线31个市政雨水排水系统及69座除涝泵闸概化为旁侧入流边界,根据各泵站设计规模及“竹节草”台风期间实际运行记录确定流量过程。

2.3 边界条件与验证

2.3.1 流量边界

根据“竹节草”台风实际降雨情况,采用径流系数法同时考虑泵站规模进行汇流计算,得到各座泵站的外排流量过程。苏州河两岸现状排涝泵站总规模363.3 m³/s,雨水强排泵站总规模369.83 m³/s。

2.3.2 下游潮位边界

苏州河河口与黄浦公园水位站距离较近,故苏州河河口水位边界采用黄浦公园站“竹节草”台风实测潮位过程(见图1)。

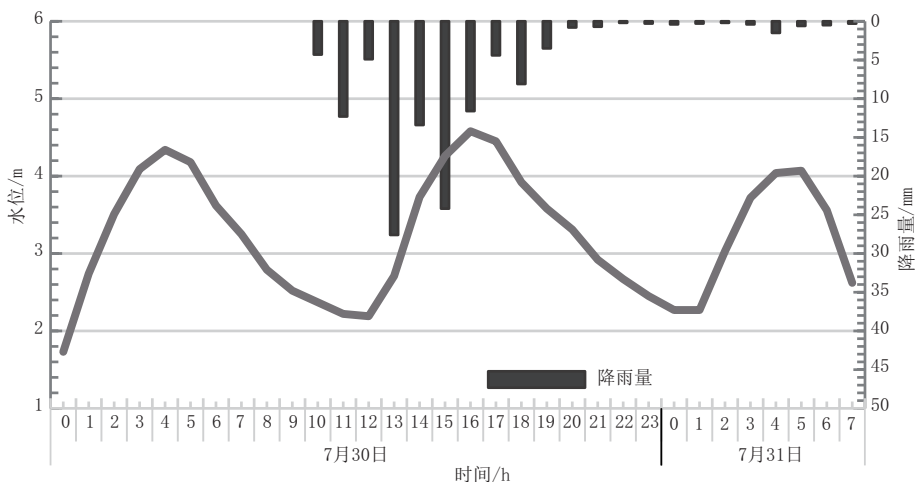


图1 黄浦公园潮位过程及实测雨量过程

2.3.3 模型验证

选取“竹节草”台风的实测降雨量和水位进行验证。模拟结果显示,北新泾、黄渡及蕰藻浜闸外三个断面的模拟最高水位分别为4.69、4.46、4.38 m,三个断面的实测最高水位分别为4.62、4.43、4.33 m,模拟水位过程值与实测水位过程吻合度较高,误差在允许范围内,证明模型能真实反映苏州河的水动力过程。

3 河槽动库容与静库容的关系

3.1 库容相关规范术语引述

根据《水利水电工程技术术语》(SL 26—2012)及《河道整治设计规范》(GB 50707—2011),“静库容”通常指某一水位以下或两水位之间的河道容积,假定水面线为水平;“死库容”指基准面至最低运行水位(或起调水位)之间的容积,在常规调度中不参与调蓄。在河道排涝设计中,“起调水位”一般为排

涝开始时刻(来水流量开始大于外排流量、河道水位开始上涨的时刻)对应的水面线水位;“设计水位”为排涝最高控制水位。

本文定义“过流动库容(V_d)”为起调时刻实际水面线以下至河底的容积。该部分库容因需维持排水动能而被水流占据,不能用于调蓄削峰。“静库容(V_s)”为设计高水位对应的水平面以下容积。“有效调蓄库容(V_e)”定义为 $V_e = V_s - V_d$,即扣除过流动库容后,可用于调蓄涝水的实际空间。河槽静库容、动库容和有效调蓄库容定义示意图如图2所示。

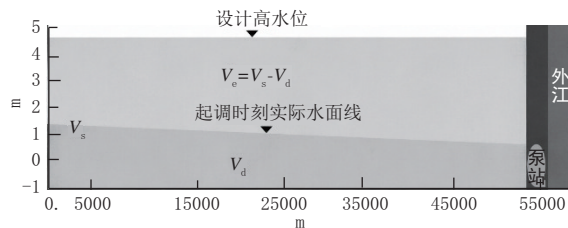


图2 河槽静库容、动库容和有效调蓄库容定义示意图

3.2 传统静库容理论的局限性

在传统的排涝模数法或水量平衡法中,河槽调蓄库容通常被简化为水位-容积曲线的差值,即假设河道为静止水体,有效库容 $V_e=V_s-V_0$ (V_0 为起调水位死库容,假设水面水平)。然而,对于具有较大水面比降或排水距离较长的骨干排涝河道,这种假设会导致较大误差。起调时刻水面线呈现明显的纵向比降,起调水位以上的一部分空间会被水流占据以形成动能排水,这部分空间被称为“动库容”,它无法参与削峰调蓄^[3]。河道纵比降越大,传统方法高估有效库容的程度越严重。

3.3 清淤对库容结构的改造机制

清淤通过直接扩容效应和流态改善效应两个途径影响有效库容。

3.3.1 直接扩容效应

增加断面面积,除涝高水位以下的静库容(V_s)得到提升,起调水位以下的过流断面也随之增大。若简单套用传统静库容方法,仅关注起调水位以上的库容增量,会得出“河道清淤主要增加死库容,对排涝调蓄贡献有限”的错误判断。

3.3.2 流态改善效应

增大过水断面面积,根据曼宁公式及圣维南运动方程,同等流量下河道流速降低、阻力减小,从而直接导致水面比降减缓。起调时刻实际水面线得以压低,释放起调水位上方的部分行洪空间,使其转化为可用于调蓄的有效库容。

在平原河网地区,由于排水距离较长,第二种效应往往被忽视,但对提升调蓄效率至关重要。为此,清淤表面上只增加了静库容,但实际上能改善流态,降低起调时刻水位,能有效增加可供调蓄的有效库容。

4 清淤方案对调蓄库容影响的模拟分析

4.1 清淤方案拟定依据与方案设计

清淤方案的确定需综合考量河道的水力特性、水环境质量及水生态状况,遵循“必要、适度、安全、生态”的原则进行拟定。

首先,从过流能力需求出发,依据苏州河现状断面与设计行洪流量,分析不同清淤深度对水位壅高、流速变化及行洪安全的影响。2021年和2025年两次实测大断面资料对比表明,苏州河中下游段(外环线至河口约16 km)普遍淤积,平均淤积厚度约0.5~0.8 m,局部缩窄段(如曹家渡弯道、昌化路桥束窄

段)淤积厚度达1.0~1.5 m,是壅高水位的控制节点。

其次,兼顾水环境改善目标。参考近年苏州河底泥污染调查成果,中下游段底泥营养盐及重金属富集层厚度约0.4~0.7 m,清除该层可有效削减内源污染释放。

再次,充分考量生态保护及岸坡稳定需求。为避免清淤深度过大,破坏底栖生物栖息环境,引发河床下切、防汛墙基础失稳,清淤底高程不宜低于河床设计最低断面控制线,并保留0.3~0.5 m自然底泥层以维持水生生态系统的结构与功能。参考上海地区类似河道清淤经验,清淤深度一般控制在0.5~1.5 m之间。

综合上述水力、环境、生态和结构安全约束条件,拟定以下两个清淤方案:

方案1:中下游段16 km平均清淤0.7 m,局部缩窄段挖深1~1.5 m,清淤方量约57万 m^3 。

方案2:中下游段16 km平均清淤1.0 m,局部缩窄段挖深1.5~2 m,清淤方量约90万 m^3 。

4.2 现状工况下清淤前后河槽库容变化分析

4.2.1 排涝起调时刻确定

“竹节草”台风降雨开始于7月30日上午10时,黄浦公园最高潮位4.58 m,发生在30日下午4时,苏州河下游温州路断面最高水位发生在16时15分左右,中上游北新泾断面最高水位4.62 m发生在16时55分左右,模型计算成果的高水位普遍在16时30分左右出现,与模型计算结果、实际水位情况较为接近。

“竹节草”台风期间,7月30日4时外江开始退潮,至7时外江潮位已低于内河水位,此时开启河口闸,预降内河水位。7时至10时预降过程中,外排流量维持在100 m^3/s 左右,10时后,涝水开始排入苏州河,但外江仍处于退潮期,12时潮位开始上涨,同时两岸泵站排入流量显著增加,河道由净出流转为净流入。因此,选取12时整作为起调时刻。该时刻水面线以下库容即为过流动库容。苏州河排涝调蓄过程水位、流量示意图如图3所示。

4.2.2 各清淤方案下河槽库容变化情况分析

苏州河排涝调蓄起调时刻(12时整)水面线如图4所示。

计算表明,该时刻下的现状、方案1和方案2的苏州河(苏西闸—河口段)过流动库容分别为899万、937万和957万 m^3 。方案1、方案2动库容较现状分别增加38万、58万 m^3 ,原因是清淤增大了断面面积,

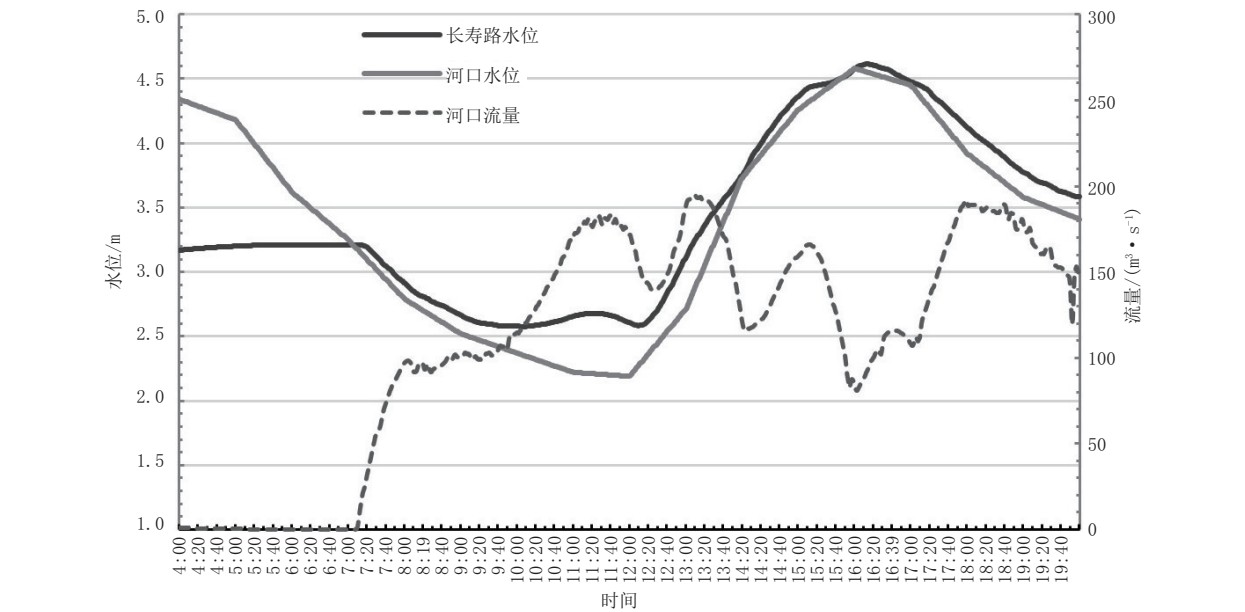


图3 苏州河排涝调蓄过程水位、流量示意图

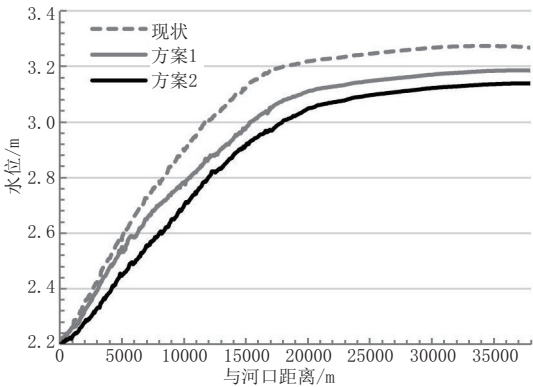


图4 苏州河(苏西闸—河口段)起调时刻水面线示意图

同等水位下过水断面更大,起调时刻水面线以下的蓄水量相应增多。

苏州河苏西闸至河口段设计运行最高水位为4.79 m。该水位以下现状、方案1和方案2苏州河(苏西闸—河口段)的静库容分别为1 344万、1 401万和1 434万m³。

根据上述过流动库容和静库容情况,可以得到现状苏州河(苏西闸—河口段)有效调蓄库容为445万m³,按方案1清淤后,有效调蓄库容增加至464万m³,与现状相比增加19万m³;按方案2清淤后,有效调蓄库容增加值477万m³,与现状相比增加32万m³。有效库容增量(19万、32万m³)分别小于各自静库容增量(57万、90万m³),原因是动库容同步增加抵消了部分增益(见表1)。

4.2.3 水位成果合理性复核

根据前文分析,排涝起调时刻为12时0分,最高水位出现在16时30分。本文根据苏州河在此排涝调蓄期间的排水量、外排量及所需调蓄水量,分析

表1 各方案库容变化情况 单位:万m³

方案	过流动库容	静库容	有效库容	与现状比有效库容增加值
现状	899	1 344	445	—
方案1	937	1 401	464	19
方案2	957	1 434	477	32

统计该时间段内的水量是否平衡,从而间接判断模型成果的合理性。

从一维非恒定流模型计算成果内统计分析得到,12时0分至16时30分,苏州河来水量为829万m³,现状断面情况下苏州河西侧苏西闸和东侧河口闸的外排水量分别为217万m³和185万m³,所需调蓄水量为427万m³,清淤方案1和方案2所需调蓄水量分别为442万m³和464万m³。一维非恒定流模型计算表明,现状、方案1和方案2苏州河(苏西闸—河口段)最高水位分别为4.65、4.64、4.63 m。该水位对应现状断面、方案1和方案2的有效调蓄库容分别为425.3万、444.1万和456.7万m³。该库容与所需调蓄水量误差较小,相对误差均在5%以内。由此可见,一维非恒定流水位成果基本合理,来水量、排水量和调蓄水量可以实现平衡。

排涝调蓄期间(12时0分—16时30分)水量平衡成果如表2所示。

表2 各方案水量平衡分析 单位:万m³

方案	来水量	河口外排量	苏西闸外排量	需调蓄水量	最高水位对应有效调蓄库容
现状	829	217	185	427	425.3
方案1	829	220	167	442	444.1
方案2	829	208	157	464	456.7

4.2.4 现状工况下清淤排涝效益分析

现状工况下,河口未建设排涝泵站,内河水位预降窗口期较短,仅有 3 h(见图 2,7 月 30 日 7 时至 10 时)。由于预降时间短,至 12 时排涝起调时刻,内河水位处于 2.2~3.3 m 之间,过流动库容较大,导致两种清淤方案对降低高水位的贡献均不明显,即苏州河最高水位降幅有限。现状工况下,方案 1、方案 2 最高水位分别为 4.64、4.63 m,较现状的 4.65 m 仅降低 0.01、0.02 m,排涝效益甚微。为充分发挥苏州河河槽调蓄库容,有效应对高潮位顶托,建议在苏州河口建设排涝泵站,于涨潮期通过泵站提前预降内河水位,使过流动库容维持在较小水平,从而腾出更大的有效库容,以应对“风、暴、潮”遭遇的不利排涝工况。

4.3 河口泵站与苏西闸联合调度下库容利用分析

4.3.1 泵-闸-河网联合调度方案

根据相关规划,苏州河河口未来将建设排涝泵站,装机规模为 90 m³/s,泵站将与现有河口闸联合调度,在遭遇黄浦江高潮位顶托情况下采用泵站抽排涝水。

苏州河排涝预降水位,除受高潮位顶托影响,还受上游吴淞江洪水入境影响,为进一步论证不同清淤方案的效果,针对河口泵站及苏西闸,拟定以下两个联合调度方案:

调度方案 a:苏西闸敞开仅泵站预降内河水位,外江涨潮期间泵站预降水位,预降水位最低控制在 1.7 m。

调度方案 b:苏西闸与泵站联合预降内河水位,外江涨潮期间泵站预降水位,预降水位最低控制在 1.7 m,苏西闸同步关闭以阻挡上游洪水入境。

4.3.2 调度方案 a 不同清淤方案排涝效益

4.3.2.1 各清淤方案下河槽库容变化情况分析

排涝调蓄起调时刻为 12 时整,该时刻下的现状、方案 1 和方案 2 的苏州河(苏西闸—河口段)过流动库容分别为 857 万、901 万和 926 万 m³,该库容与 4.2.2 节现状工况下的动库容相比分别减小了 42 万、36 万和 31 万 m³。由此可见,通过泵站可以延长预降时长,腾出更多库容参与排涝调蓄。

苏州河设计高水位 4.79 m 以下的静库容与前文一致,根据上述过流动库容和静库容情况,可以得到现状情况下苏州河(苏西闸—河口段)有效调蓄库容为 487 万 m³,按方案 1 清淤后,有效调蓄库容增加至 500 万 m³,与现状相比增加 13 万 m³;按方案 2 清淤后,有效调蓄库容增加值 508 万 m³,与现状相比增加 21 万 m³(见表 3)。

表 3 调度方案 a 对应各方案库容变化情况 单位:万 m³

方案	过流动库容	静库容	有效库容	与现状比有效库容增加值
现状	857	1 344	487	—
方案 1	901	1 401	500	13
方案 2	926	1 434	508	21

4.3.2.2 清淤排涝效益分析

“竹节草”台风期间若采用调度方案 a 进行调度,即河口增设泵站提前预降内河水位,苏西闸保持敞开状态,经模型计算表明,现状、清淤方案 1 和清淤方案 2 苏州河(苏西闸—河口段)最高水位分别为 4.61、4.57、4.54 m。由此可见,两种清淤方案对高水位降低具有一定排涝效益。清淤方案 1 和清淤方案 2 与现状不清淤相比,苏州河高水位分别降低了 0.04、0.07 m。

泵站投入运行后,苏州河最高水位较现状工况降低了 0.04 m;而清淤方案 1 和方案 2 在与泵站联合运行后,最高水位分别降低了 0.08、0.09 m。对比可见,清淤方案的水位降幅显著高于仅依靠泵站运行的工况,表明清淤措施与泵站联合调度能够有效提升河道排涝预降能力,可以充分发挥清淤的排涝效益。

4.3.3 调度方案 b 不同清淤方案排涝效益

4.3.3.1 各清淤方案下河槽库容变化情况分析

排涝调蓄起调时刻仍为 12 时整,该时刻下的现状、方案 1 和方案 2 的苏州河(苏西闸—河口段)过流动库容分别为 750 万、792 万、817 万 m³,该库容与 4.2.2 节现状工况下的动库容相比分别减小了 149 万、145 万、140 万 m³。由此可见,通过泵站和苏西闸挡水,可以腾出苏州河更多库容参与排涝调蓄。

苏州河设计高水位 4.79 m 以下的静库容与前文一致,根据上述过流动库容和静库容情况,可以得到现状情况下苏州河(苏西闸—河口段)有效调蓄库容为 594 万 m³,按方案 1 清淤后,有效调蓄库容增加至 609 万 m³,与现状相比增加 15 万 m³;按方案 2 清淤后,有效调蓄库容增加值 617 万 m³,与现状相比增加 23 万 m³(见表 4)。

表 4 调度方案 b 对应各方案库容变化情况 单位:万 m³

方案	过流动库容	静库容	有效库容	与现状比有效库容增加值
现状	750	1 344	594	/
方案 1	792	1 401	609	15
方案 2	817	1 434	617	23

4.3.3.2 清淤排涝效益分析

“竹节草”台风期间若采用调度方案 b 进行调

度,即河口增设泵站提前预降内河水位,苏西闸保持关闭挡水状态,经模型计算表明,现状、清淤方案1和清淤方案2苏州河(苏西闸—河口段)最高水位分别为4.61、4.52、4.45 m。由此可见,两种清淤方案对高水位降低具有一定排涝效益,清淤方案1和清淤方案2与现状不清淤苏州河高水位分别降低了0.09、0.16 m。

河口排涝泵站与苏州河西侧水闸联合调度后,现状不清淤情况下,苏州河最高水位较现状无泵站工况相比可降低0.04 m;而清淤方案1和方案2在与泵站及苏西闸联合运行后,最高水位分别降低了0.12、0.18 m。由此可见,清淤方案的水位降幅显著高于现状不清淤,表明清淤措施与泵站和苏西闸联合调度能够有效提升河道排涝预降能力,可更加充分发挥出清淤的排涝效益。

5 基于调蓄效率的苏州河清淤优化策略

5.1 清淤深度与排涝效益的边际分析及方案最优性论证

为论证方案1(平均清淤0.7 m)是否为最优选择,需分析清淤深度对有效库容增量及水位降幅的边际效益。定义边际有效库容增量 $\Delta V_e/\Delta d$ ($\text{万 m}^3/\text{cm}$)及边际水位降幅 $\Delta H/\Delta d$ (cm/cm),由模型成果计算如下:

从现状至方案1(河床平均增深0.7 m):调度方案b下,有效库容增加15 万 m^3 ,最高水位降幅0.09 m。计算得 $\Delta V_e/\Delta d=0.21 \text{ 万 m}^3/\text{cm}$, $\Delta H/\Delta d=0.13 \text{ cm}/\text{cm}$ 。

从方案1至方案2(河床平均再增深0.3 m):有效库容增加8 万 m^3 ,最高水位降幅0.07 m。计算得 $\Delta V_e/\Delta d=0.27 \text{ 万 m}^3/\text{cm}$, $\Delta H/\Delta d=0.23 \text{ cm}/\text{cm}$ 。

若以单位方量清淤效益衡量:方案1较现状清淤方量57 万 m^3 ,有效库容增量为0.27 $\text{万 m}^3/\text{万 m}^3$ 清淤量;方案2较方案1新增清淤33 万 m^3 ,有效库容增量为0.24 $\text{万 m}^3/\text{万 m}^3$ 清淤量,边际效益下降约11%。水位降幅方面,方案1单位清淤方量的水位降幅为0.16 $\text{cm}/\text{万 m}^3$,方案2新增方量的水位降幅为0.21 $\text{cm}/\text{万 m}^3$,边际效益亦未见显著提升。

由此可见,方案2在方案1基础上继续加深清淤,虽可获得额外库容与水位降幅,但边际效益明显递减。考虑到方案2需增加清淤方量33 万 m^3 (增幅59%),底泥处置成本及生态扰动均显著增加,而最高水位仅从4.52 m降至4.45 m,均可控制在4.79 m设计高水位以下。因此,从以最低工程代价实现排涝安全冗余的角度分析,方案1为最优方案。

5.2 “过流动库容”视角下的清淤优先级

基于前述分析,清淤对降低水面比降的效果在断面束窄处最为显著。结合苏州河2025年实测大断面数据,识别出水面比降变化率($\Delta i/\Delta x$)最大的三处缩窄段:曹家渡弯道段(长约1.3 km,现状平均底宽不足40 m)、昌化路桥束窄段(长约0.8 km)、武宁路桥下游束窄段(长约0.7 km)。建议将上述三段列为第一优先级清淤区域,清淤深度以恢复至设计断面底宽、底高程为准,并对边坡进行生态防护。

第二优先级为中下游其余淤积较厚河段(累计约13.2 km),维持平均0.7 m清淤深度即可。上游来水流量相对较小,水面比降平缓,过度清淤对有效库容提升有限,维持现状断面或进行局部清障即可。

5.3 清淤对生态、航运及河床稳定性的潜在影响

清淤工程对苏州河的潜在影响需全面评估。生态方面,底泥疏浚将短期扰动底栖动物群落,但清除富含营养盐的表层污染底泥(厚约0.4~0.7 m)可长效削减内源磷释放,有利于改善溶解氧水平和底栖生态恢复。方案1保留0.3~0.5 m自然底泥层,有利于底栖生物重新栖息定殖。航运方面,清淤增加了浅滩段水深,有利于维持苏州河旅游观光及公务船舶通行需求,但需在清淤后重新校核航标布置。河床稳定性方面,需结合险工段防汛墙基础埋深资料核查,避免清淤底高程超过墙前设计最低冲刷线,对曹家渡弯道等顶冲段可考虑抛石护底或软体排防护,防止河床下切引发岸坡失稳。

6 结 语

6.1 研究总结

本文基于一维非恒定流模型,结合“动库容”理论,深入研究了苏州河底泥清淤对河槽调蓄库容的影响机制与优化策略,主要结论如下:

(1)在平原感潮河网排涝计算中,应明确区分“静库容”与“动库容”。清淤通过“直接扩容效应”增大静库容,同时通过“流态改善效应”降低水面比降、减少动库容占用,两者共同提升河槽的有效调蓄库容。传统忽略动库容的方法将高估有效库容,影响除涝调度决策精度。

(2)清淤效益的发挥高度依赖预降水位调度。通过泵站与水闸联合调度降低起调时刻动库容,可充分释放清淤的排涝效益。在河口泵站与苏西闸联合挡水预降的调度方案下,方案1、2较现状可分别降低最高水位0.09 m和0.16 m。

(3)边际效益分析表明,方案1(中下游16 km平均清淤0.7 m,局部缩窄段1~1.5 m)单位工程代价的排涝效益最优,在“竹节草”台风重现期工况下可将最高水位控制在4.52 m以下,满足4.79 m设计水位要求,同时兼顾了底泥污染削减与生态保护需求,是推荐最优方案。

6.2 创新性总结

(1)构建了感潮河网清淤“动库容-有效库容”分析框架,定量揭示了清淤释放有效调蓄空间的“流态改善效应”及其边际递减规律。

(2)提出了区别于传统仅关注静库容增量的清淤效益评估方法,为同类平原河网地区清淤方案的精准优化提供了理论工具和决策依据。

6.3 研究局限

(1)本文模拟仅针对“竹节草”单场台风工况,对于不同雨型、不同潮位组合下的清淤效益普适性仍有待验证。

(2)一维模型无法精细刻画局部弯道、桥墩等复杂边界下的三维流场,对局部壅水效应的模拟存在一定概化误差。

(3)清淤对底泥污染的长期削减效果及生态恢复周期未进行定量评估。

6.4 研究展望

未来苏州河河口泵站建成后,建议建立“清淤—水位预降—实时调度”协同优化机制,定期监测中下游重点淤积段断面变化,结合多场次实际洪水进行模型滚动验证与修正。后续研究可进一步纳入三维水沙模型和生态响应模型,开展清淤工程的水沙-生态耦合效应长序列评估,并探索基于数字孪生的苏州河实时调蓄库容动态评估与智慧调度技术。

态耦合效应长序列评估,并探索基于数字孪生的苏州河实时调蓄库容动态评估与智慧调度技术。

参考文献:

- [1] 周宏,刘俊,高成,等.我国城市内涝防治现状及问题分析[J].灾害学,2018,33(3):147-151.
- [2] 朱伟,侯豪,孙继鹏,等.河湖库淤积治理中底泥清淤的内涵与发展方向[J].水利学报,2024,55(4):456-467.
- [3] 吴春,倪鹏,丁兆晖.圩区河槽调蓄库容影响因素分析研究[J].水电能源科学,2023(12):82-84.
- [4] 刘昭辰,刘惠敏,彭欣雨,等.生态修复技术在珠江流域防洪治理方案中的应用研究[J].水上安全,2025(22):88-90.
- [5] 李光灿,周晶晏.河道型水库动库容分析方法[J].水利水电科技进展,2005(5):13-15;71.
- [6] 高成,刘俊,崔韩,等.城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J].灾害学,2008,23(3):7-9.
- [7] 吴春,刘鑫,李朋.河道雨洪调蓄设施布局研究[J].城市道桥与防洪,2024(3):107-110.
- [8] 徐贵泉,陈庆江,陈长太.苏州河沿线设计高水位[J].水利水电科技进展,2012,32(6):38-41.
- [9] 翟晶.玻璃防汛墙在苏州河上的应用思考[J].城市道桥与防洪,2023(7):153-155;172.
- [10] 邵春芬,夏小娟,李志,等.苏州河河口水闸除险加固设计的思考[J].水利技术监督,2023(6):229-232;286.
- [11] 夏杰.兼具通航功能的导流明渠建设研究[J].水上安全,2024(13):1-4.
- [12] 钱真.“康妮”台风期间苏州河高水位复演与防洪除涝对策[J].长江科学院院报,2025,42(12):65-74.
- [13] 周殊凡,韦浩,文啸,等.2025年“竹节草”台风期间苏州河超历史高水位分析[J/OL].水利水电快报,1-13[2026-04-13].
- [14] 刘鑫.东南沿海城市小流域排涝计算方法探讨[J].中国给水排水,2024,40(8):80-86.
- [15] 贺礼彬.一维数学模型在河道洪水演进中的应用[J].中国水运(下半月),2009(2):174-175.