

新孟河运南支河闸控方案下 河湖水动力影响探讨

吴昱甫, 吴攀, 陆彦, 王志力

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:通过构建太湖流域北部一维、二维耦合的河湖水动力数学模型,模拟并分析了新孟河延伸拓浚工程运南段主要无闸控支河设控前后对引水沿线河道和漏湖水动力的影响。结果表明,新孟河运南段支河口门设控下,引水后运南段河道水位、流速将明显上升,经北干河东侧入漏湖流量有所增加,但支河闸控有利于北干河西侧分流比升高,支河口门东侧闸控将导致漏湖北部水体交换能力降低、水动力有所减弱,漏湖东侧出湖河道流量受新孟河运南段支河闸控的影响较小。为提高新孟河工程引水效益,探讨提出了支河闸控方案在引水期、非引水期和应急排水期等时期的实施建议,为新孟河工程运行及优化调度提供一定的参考。

关键词:新孟河引水; 运南支河; 闸控方案; 漏湖; 水量分配

中图分类号:TV212

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)02-0027-0006

Discussion on the hydrodynamic responses of rivers and lakes under the gate-controlled schemes of the southern branch of the Xinmeng River

WU Yufu, WU Pan, LU Yan, WANG Zhili

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: By constructing a one-dimensional and two-dimensional coupled river lake hydrodynamic mathematical model in the north of the Taihu Lake basin, this paper simulates and analyzes the influence of the main non gate-controlled tributaries in the southern section of the Xinmeng River extension and dredging project on the hydrodynamic forces of the rivers and Gehu Lake along the water diversion line before and after the gate control is set. The results show that under the control of the estuary gate of the southern branch of the Xinmeng River, the water level and flow velocity of the southern section of the river will significantly increase after water diversion, and the flow into Gehu Lake will increase on the east side of the northern main river. However, the gate control of the branch river is conducive to the increase of the diversion ratio on the west side of the northern main river. The gate control on the east side of the estuary gate of the branch river will lead to a decrease in the water exchange capacity and a weakening of hydrodynamic forces in the northern part of Gehu Lake. The flow of the river on the east side of Gehu Lake is less affected by the gate control of the southern branch river of the Xinmeng River. In order to improve the water diversion efficiency of the Xinmeng River project, implementation suggestions for the gate-controlled

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022041, 2023018); 长江水科学联合基金项目(U2240208)

作者简介: 吴昱甫(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: wuyufunky@163.com

通信作者: 吴攀(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河湖水环境研究工作。E-mail: pwu@nhri.cn

scheme of branch river during the water diversion period, non water diversion period, and emergency drainage period were discussed and proposed, providing a certain reference for the operation and optimization scheduling of the Xinmeng River project.

Key words: water diversion through Xinmeng River; the southern branch of the Xinmeng River; gate-controlled scheme; Gehu Lake; water allocation

新孟河延伸拓浚工程(以下简称“新孟河工程”)是《太湖流域水环境综合治理总体方案》安排的提高水环境容量(纳污能力)引排工程关键实施项目之一,北起长江,自幸福洲大夹江向南新开河道接老新孟河,然后沿老新孟河拓浚至京杭运河,长江至大运河段沿线两岸支河口门实施控制。新孟河穿京杭运河后新开河向南延伸至北干河,沿线连通支河口门不设控,拓浚北干河连接洮湖、漏湖,拓浚太漏运河和漕桥河入太湖,全长116.69 km。平水年引长江水入湖水量达到25.2亿 m^3 ,枯水年流域水资源配置引江入湖水量21.4亿 m^3 ,100年一遇流域防洪排江水量7.9亿 m^3 ,对改善太湖西北部水域和上游地区河湖水环境具有重要的意义。新孟河工程于2015年11月开工建设,目前已基本建设完成,于2022年10月20日至12月16日开展抗旱调水试运行。

由于新孟河运南段的鹤溪河、夏溪河、湍里河等主要支河没有实施有效控制,将影响新孟河引水后沿线流量分配及支河的水动力过程,也将对漏湖、洮湖的水环境将造成一定影响。如对运南段引水沿线支河设控,将有助于提高引水效率,但对主要支河设控前后的沿线河湖水动力影响尚不清楚。本文旨在通过建立新孟河工程引水沿线河湖水动力数学模型并进行计算,设定新孟河运南支河闸控方案,模拟方案实施后河湖水动力变化,对比分析支河设控前后沿线河道引水流量分配及对漏湖水动力特性的影响,探明新孟河运南支河闸控方案下的引水传输规律,为新孟河工程运行及优化调度提供研究参考。

1 数学模型建立与验证

1.1 控制方程

河道采用一维河网模型进行模拟,湖泊采用水深平均二维模型进行模拟,一维模型和二维模型进行耦合^[1]。采用半隐式有限体积法与有限差分结合的方法建立二维水动力模型,得到离散方程组,从而得出水位、流速、流向。

(1) 一维河网模型

一维圣维南方程的守恒性格式可以写为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S_0(U) + S_f(U) \quad (1)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}, F(U) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{bmatrix}, S_0(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gI_2 - gA \frac{\partial z_b}{\partial x} \end{bmatrix},$$

$$S_f(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ S_f \end{bmatrix}$$

式中: A 为过水断面面积; Q 为流量; g 为重力加速度; z_b 为河床底高程; S_f 为阻力项; I_1 为静水压力项。

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (2)$$

$$I_1(x, A) = \int_0^{h(x, A)} [h(x, A) - s] b(x, s) ds \quad (3)$$

式中: n 为曼宁系数; R 为水力半径; h 为水深; $b(x, s)$ 为距离河床 s 处的河宽。

(2) 二维湖泊模型

二维浅水方程为,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} = S_0 + S_f \quad (4)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} \phi h \\ \phi hu \\ \phi hv \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \phi hu \\ \phi hu^2 + g\phi h^2/2 \\ \phi huv \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \phi hv \\ \phi huw \\ \phi hv^2 + g\phi h^2/2 \end{bmatrix},$$

$$S_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\phi gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{gh^2}{2} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ -\phi gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{gh^2}{2} \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$S_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -\phi gh \frac{n_m^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - (1 - \phi) gh C_s u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -\phi gh \frac{n_m^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - (1 - \phi) gh C_s v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix}$$

式中: h 为水深; u 为 x 方向的流速; v 为 y 方向的流速; ϕ 为孔隙率,反应不过水建筑物的影响; $\phi = 1$,代

表没有阻水建筑物; $\phi=0$ 代表阻水建筑物占据整个控制体; n_m 为曼宁系数; C_L 为建筑物局部阻力系数。

1.2 模型范围和网格

模拟范围如图1所示,包括太湖及湖西区河网,南北向约160 km,东西向约140 km,总面积超过22 000 km²。长江和太湖流域河道采用一维模型,共有河段1 722个,断面20 685个,河段总长度5 075 km,概化了126个水利枢纽。二维模型包括太湖、漭湖和洮湖模拟面积2 599 km²,采用三角形网格进行空间离散,共有计算网格7.1万个,边10.7万条,平均边长292 m。

在河湖网格计算中,河道断面比较顺直,采用矩形网格计算效率较高。在河口区域计算中,由于漭湖、洮湖岸线曲折复杂,采用非结构网格对计算域进行剖分是非常合适的。采用非结构网格剖分计算域,既可以克服矩形网格锯齿形边界所造成的流动失真,也可以避免生成有结构贴体曲线网格的复杂计算和其他困难。因此,为了更好地拟合研究区域的形状以及岸带等,采用河网四边形网格、湖区三角形混合的非结构网格单元组成,对研究区域进行局部加密。

1.3 模型验证

采用2022年10月20日至11月20日新孟河工程抗旱调水试运行实测资料进行模型验证,期间新孟河界牌水利枢纽日均引水流量60~100 m³/s;根据调水试运行方案,在新孟河运北段水质稳定优于Ⅲ类后,10月21日开启奔牛水利枢纽地涵。数模模拟条件为新孟河界牌水利枢纽泵引100 m³/s,奔牛水利枢纽南断面初始水位为3.58 m。

表1给出了新孟河引水沿线主要断面总体引水量、各河道入漭湖水量与方向、出漭湖水量及入太湖水量,模拟值与实测值较为接近,验证结果基本满足模型模拟要求。

2 模拟方案

新孟河运南支河无闸控条件下,主干河道流量经支河分流,进入北干河断面及入漭湖的流量有所下降,为此可以设置主要支河闸控方案。由于新孟河工程引水线路经漭湖,而且漭湖流域地势总体为“西高东低”,考虑主要支河西侧闸控、东侧开启为一种闸控方案,支河东西侧全部关闭为第二种闸控方案。从新孟河工程抗旱调水试运行实测资料分析可知,漭里河西侧入洮湖的流量最高可达20.6 m³/s,流量损失较大,可考虑漭里河西侧单独闸控方案。模拟新孟河引水流量按照设计泵引流量300 m³/s计算。本研究中新孟河运南主要支河闸控方案见表2,计算分析断面见图2。

3 模拟结果与讨论

3.1 运南支河闸控对河道水动力的影响

新孟河引水60 d后,沿线河道水位和流速普遍上升。新孟河运南段河道和支河水位平均增加0.366~0.844 m,由北向南递减,流速为0.42~0.62 m/s,由于鹤溪河西侧、夏溪河西侧流向由入新孟河转为出新孟河,两河西侧流速下降至0.21~0.33 m/s;北干河水位增加约0.34 m,流速约为0.48 m/s;漭湖东侧河道水位增加约0.22 m,流速为0.18~0.32 m/s。除了河道进出漭湖口门流速稍大(>3 cm/s)外,整个湖区流



图1 数学模型范围及网格

表1 新孟河泵引 100 m³/s 期间相关断面流量实测值与模拟值对比

断面	实测值		模拟值	
	流量/(m³/s)	方向	流量/(m³/s)	方向
新孟河(340省道大桥)	59.7~114	北向南	96.07	北向南
鹤溪河西	4.09~7.17	入漏湖	5.87	入漏湖
鹤溪河东	0.47~3.54	入漏湖	1.73	入漏湖
夏溪河西	4.66~10.3	入漏湖	12.60	入漏湖
夏溪河东	4.08~11.6	入漏湖	6.62	入漏湖
湟里河西	0~20.6	入漏湖	10.57	入漏湖
湟里河东	4.98~10.2	入漏湖	17.17	入漏湖
北干河西	8.27~37.4	入漏湖	14.56	入漏湖
北干河东	51.4~83.6	入漏湖	63.57	入漏湖
武南河(武南路桥)	12.2~19.9	入漏湖	15.56	入漏湖
锡漂漕河(祝庄大桥)	40.4~50.2	东向西	46.64	东向西
太漏运河(黄埭桥)	35.6~51.2	入太湖	56.83	入太湖
漕桥河(漕桥(三))	31.2~42.6	入太湖	35.53	入太湖
殷村港(浯溪桥)	20.7~33.6	入太湖	30.65	入太湖
烧香港(赋九桥)	22.3~30.2	入太湖	29.56	入太湖

表2 新孟河运南主要支河闸控方案

方案	引水流量/(m³/s)	鹤溪河口门	夏溪河口门	湟里河口门
1	300	西侧闸控/东侧开启	西侧闸控/东侧开启	西侧闸控/东侧开启
2	300	全闸控	全闸控	全闸控
3	300	全开启	全开启	西侧闸控/东侧开启

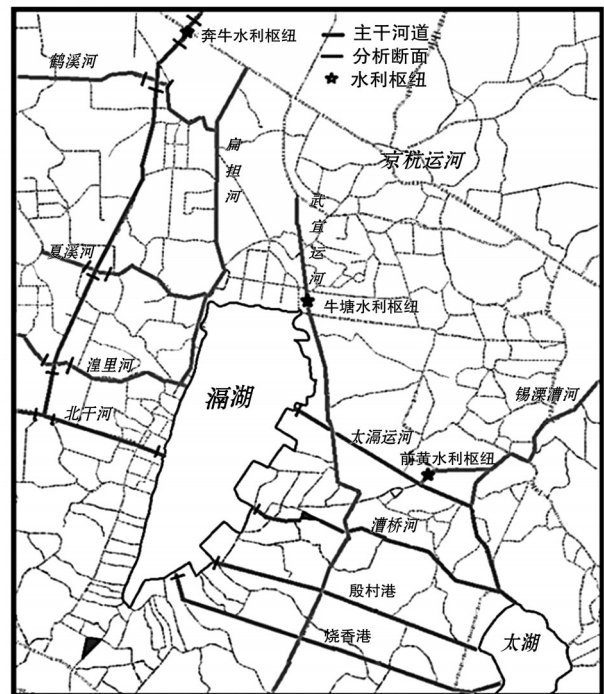


图2 新孟河工程引水沿线河道监测断面示意

速较小,为1~3 cm/s。

新孟河引水后运南段沿线河道流量有所上升,由于经过支河分流,主干河道断面流量从北向南逐渐下降(表3)。运南支河闸控方案实施后,通过与现状条件下的河道断面流量变化可知,将导致新孟河运南主干河道流量不同程度增加,其中支河全闸控下,新孟河—湟里河南断面流量增加最大,达132.1 m³/s,北干河东西两侧分流流量增加。另外,支河西侧闸控将导致支河东侧流量有所上升。漏湖东侧主要出湖河道太漏运河、漕桥河、殷村港、烧香港的流量变化不大,增幅为0.8~2.4 m³/s,可能与漏湖调蓄作用有关^[2]。

分析北干河两侧的分流比可知,支河无闸控下北干河西侧与东侧的分流比约为28%:72%,北干河东侧占引水流量之比约为42%。在支河西侧闸控、支河全闸控、仅湟里河西侧闸控这3种方案下,北干河东侧占引水流量比例分别上升至45%、61%、43%,仅在支河全闸控方案下流量上升幅度较大,其

表3 新孟河运南支河闸控方案与无闸控条件下相应断面流量差值

单位: m^3/s

断面	支河无闸控	支河西侧闸控	支河全闸控	仅湟里河西侧闸控
	现状	差值	差值	差值
新孟河—奔牛断面	299.9	0.0	0.0	0.0
新孟河—鹤溪河南	257.5	20.9	42.3	6.0
新孟河—夏溪河南	207.1	28.7	92.6	11.0
新孟河—湟里河南	167.5	34.4	132.1	7.7
鹤溪河西	13.1	-13.1	-13.1	0.3
鹤溪河东	4.9	11.1	-4.9	0.4
夏溪河西	17.1	-17.1	-17.1	-0.1
夏溪河东	14.6	15.1	-14.6	0.9
湟里河西	23.1	-23.1	-23.1	-23.1
湟里河东	33.4	1.5	-33.4	0.7
北干河西	35.6	20.1	70.7	2.6
北干河东	126.0	7.6	57.8	3.1
太滬运河	100.1	2.4	4.1	2.4
漕桥河	24.9	0.8	1.0	0.8
殷村港	21.7	0.8	1.3	0.8
烧香港	32.9	1.2	1.3	1.2

余方案下闸控前后北干河东侧流量变幅不大;相比无闸控情形,3种闸控方案下,北干河东侧分流比分别下降至42%、58%、30%,表明支河闸控更有利于北干河西侧流量的增加和分流比升高。

3.2 运南支河闸控对漏湖水动力的影响

在此分析支河西侧闸控与全闸控下漏湖水动力特性的变化。模拟结果表明,支河西侧闸控后,由于北干河入漏湖口流速提升,漏湖南部湖流流速整体有所增加,但平均增幅小于 0.01 m/s ;漏湖北部仅湟里河入湖口流速有所增加,北部湖区流速变化不大(图3(a))。支河全部闸控后,北干河东侧入漏湖流量增加,入湖口区域流速增加 $0.01\sim 0.05\text{ m/s}$,其他湖区流速均有所下降,特别是北部湖区,由于鹤溪河、夏溪河、湟里河等流量阻断,导致支河入漏湖口区域流速下降明显,降幅达 0.01 m/s (图3(b))。

分析支河闸控后漏湖水体置换率变化,以界牌来水占漏湖水量比例而言,相比支河无闸控情形,支河西侧闸控下支河东侧和北干河东侧共入漏湖总体流量稍高,界牌来水占比在引水初期的25 d内相对较高(图4),但差异小于5%,引水25 d后几乎与无闸控情形同步变化,到引水60 d后界牌来水占

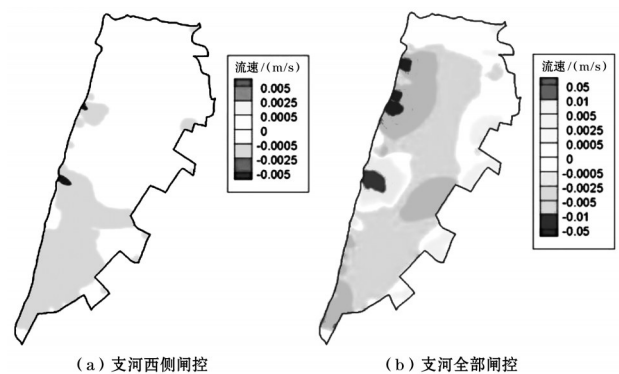


图3 支河闸控前后漏湖流速变化

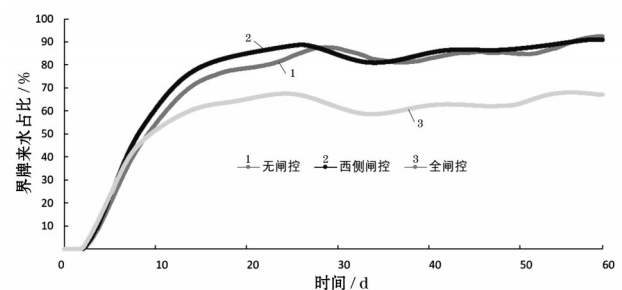


图4 漏湖内界牌来水占比变化过程

比约为90%;而支河全闸控情形下,引水10 d后界牌来水占比显著小于无闸控情形,且到引水60 d后

界牌来水占比仅约为65%,这可能与支河全闸控条件下,仅有北干河东侧流量进入溇湖有关,湟里河等支河入湖受到严重影响,溇湖北部湖区水动力明显减弱,湖区整体水体置换减缓。

3.3 支河口门闸控方案影响探讨

通过上述分析发现,支河口门设控后,新孟河运南段引水沿线水位、流速有所上升,仅在支河全闸控方案下北干河流量上升幅度最大,但北干河东侧分流比均有所降低,支河闸控更有利于北干河西侧流量的增加和分流比升高,出溇湖河道的流量增幅不大。支河口门东侧闸控将导致溇湖北部水动力减弱,溇湖水体交换能力减弱。

新孟河工程引水主要是为了使得太湖北部湖湾得到长江引水补给,改善湖湾及沿线河湖的水环境,提升河湖水动力是水环境改善的重要基础。运南段支河大多穿过集镇、工业、农业、养殖等区域,水体污染相对较重^[3-4],支河闸控将导致沿线河湖水网连通性降低^[5-6],但也可能减少引水期间支河污染入溇湖。

因此,对于支河口门的闸控措施,可根据不同时段分开施行:

(1)在引水时期,当新孟河运南段支河水质较差(劣于地表水Ⅲ类标准)时,可考虑支河口门两侧闸控措施,短期内将有利于保障新孟河引水入溇湖流量;当新孟河运南段支河西侧或东侧水质得到改善或自身较好(满足地表水Ⅲ类标准)时,建议保持水质较好一侧口门敞开,将有利于提升支河、连通河道或溇湖北部的的水动力条件,改善局部水环境。

(2)在太湖无须引水时期,保持支河口门东侧敞开,利用新孟河引水提升支河和溇湖北部的的水体交换能力。

(3)在应急排水时期,保持支河口门西侧和东侧敞开,畅通新孟河运南段、支河及连通河道、溇湖的水力联系及水体交换。

由于支河口门闸控措施需要结合新孟河工程引排水调度,夏溪河、湟里河通航需求及考虑工程建设成本等,需要综合权衡考量。

4 结 语

新孟河运南段无闸控支河对引水沿线流量产生影响,本文建立了太湖流域北部的一维、二维耦合的河湖水动力数学模型,对2022年新孟河抗旱调水试运行实测资料进行验证,验证结果良好,通过模型模拟并分析了运南段主要支河闸控方案实施对引水沿线河道和溇湖水动力的影响。支河口门设控下,新孟河引水后运南段引水沿线水位、流速明显上升,经北干河入溇湖流量有所增加,但支河闸控更有利于北干河西侧流量的增加和分流比升高,而出溇湖河道的流量增幅不大。支河口门东侧闸控将导致溇湖北部水动力减弱,降低溇湖水体交换能力。

新孟河运南段支河闸控需结合引排水调度、通航需求等多因素综合考量,从提高引水效益角度,支河闸控方案需根据引水期、非引水期和应急排水期进行科学制定和实施,建议后续进一步开展运南段支河闸控影响下污染物迁移过程等研究,加强新孟河工程引水后河湖的水环境监测,为优化调度方案提供借鉴。

参考文献:

- [1] 王志力,耿艳芬,陆永军,等. 基于广义垂线坐标系的三维非结构数学模型及其在珠江口的应用[J]. 水科学进展,2019,30(6):884-891.
- [2] 闫红飞. 新孟河延伸拓浚工程对溇湖水量水质影响研究[J]. 水利水电技术,2015,46(4):35-38.
- [3] 徐锦前,钟威,蔡永久,等. 近30年长荡湖和溇湖水环境演变[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(7):1641-1651.
- [4] 王礼权,刘钰,张毅敏,等. 长荡湖、溇湖、竺山湾藻类功能群结构组成与环境因子的关系[J]. 水资源保护,2023,39(2):224-232.
- [5] 黄廷杰,吴忠,邵勇,等. 新孟河引水对沿程无闸控支河水动力泥沙特性的影响与修复对策[J]. 江苏水利,2020(12):4-8,16.
- [6] 高学平,胡泽,闫晨丹,等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. 水资源保护,2022,38(2):41-47.