

黄浦江河口建闸研究40年回顾与展望

季永兴^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2. 上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要:在简要阐述黄浦江历史演变、水文特性和历年风暴潮灾害的基础上,回顾了黄浦江河口建闸研究历程及相关成果,并提出了下一步主要研究方向。前期研究结果表明:黄浦江河口建闸是黄浦江防洪能力提升总体方案的重要组成部分,是解决上海永久防洪(潮)问题的必然选择;挡潮闸的基本功能是挡风暴潮、适应通航,合理调度挡潮闸对洪、潮共同作用引起的流域超标准高水位具有较大控制作用;挡潮闸设防标准建议为100年使用期末可防御千年一遇潮位,且闸孔单孔总净宽超过300 m,对行洪、航运、河势影响较小且能控制闸室淤积。下一步研究重点为弯道建闸对河势、航运的影响,关闸时机和频次对挡潮效果、航运的影响,挡潮闸闸型对功能、关闸时长、河道淤积的适应性以及突破跨度对受力的影响等。鉴于河口建闸并不能完全解决中上游堤防的防洪能力提标,建议同步实施中上游堤防加高加固,并在两项工作完成前做好防汛应急预案。

关键词:挡潮闸;风暴潮;城市防洪;黄浦江河口;上海

中图分类号:TV66;X43

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)05-0001-09

Review and prospect of research on sluice construction at Huangpu River Estuary in past 40 years//JI Yongxing^{1,2}
(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China; 2. Engineering Research Center on Flood Control and Disaster Alleviation, Shanghai Water Authority, Shanghai 200061, China)

Abstract: After briefly describing the historical evolution, hydrological characteristics and storm surge disasters of the Huangpu River, the history and results of the study on the tidal sluice at the Huangpu River Estuary were reviewed, and the main future research interests were proposed. The results of the preliminary study show that the tidal sluice at the Huangpu River Estuary is an important part of the flood control capacity improvement scheme of the Huangpu River, and is an inevitable choice to solve the permanent flood (storm surge) control problems in Shanghai. The basic function of the sluice is to resist storm surge and adapt to navigation, and reasonable regulation of the sluice has a great effect on the extraordinary high level of the river basin caused by the combined action of flood and tide. The defense criterion of the designed tidal level of the sluice is based on the 1000-year return period at the end of 100-year service. The total net width of the single hole of the sluice is greater than 300 m, which has little impact on flood discharge, navigation and river regime, and the siltation of the barrier chamber can be controlled. Key points of future research should be focused on the impact of the sluice built at the bend on the river regime and navigation, the impact of the closing time and frequency on the effect of storm surge control and navigation, the adaptability of the barrier type to the function, the closing time, the siltation of the river channel, and the impact of the span on the stress. Finally, since the flood control capacity of the middle and upper reaches of the Huangpu River cannot be completely improved by the sluice construction at the estuary, heightening and reinforcing the embankment is suggested simultaneously, and flood control emergency plans must be prepared before the two works completed.

Key words: tidal sluice; storm surge; urban flood control; Huangpu River Estuary; Shanghai

上海濒江临海,地势低平,地面高程一般为3.0~4.0 m(吴淞基面,下同),平均每年要遭遇6级风力以上热带气旋影响3.2次,致使东风风暴潮倒流入长江口,逼近黄浦江,抬高黄浦江水位,威胁城

市安全。来自上游太湖流域的洪水和本地区的涝水,会沿贯穿整个上海大陆,也是太湖流域最大的行洪排涝通道——黄浦江向东排泄。因此,遭遇洪水过境和风暴潮时,上海会发生严重的洪潮灾害。黄

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022022);上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(19DZ1201500);华东建筑集团科学技术研究课题项目(22-1类-0101-利)

作者简介:季永兴(1970—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水利工程研究与设计工作。E-mail:jyix@sh163.net

浦江两岸原来无防汛墙,20世纪50年代由于出现高潮位越岸,相关部门开始在两岸修建防汛墙,至1974年市中心防汛墙基本封闭。1974年8月上海遭遇“7413”号台风袭击,沿岸出现严重险情,黄浦江公园水文站出现4.98 m高潮位^[1],上海市防汛指挥部颁布新的黄浦江防汛墙设计标准(俗称“七四标准”,即百年一遇标准),之后的黄浦江防汛墙按此标准修筑。1981年9月上海遭遇“8114”号台风袭击,黄浦江沿岸出现漫溢险情,打开浦东支流纳潮削峰,黄浦江公园水文站出现5.22 m高潮位^[1]。1982年8月21—28日,上海市政府、国家水利电力部、交通部在上海召开上海水利座谈会,上海市水利局规划设计室(上海市水利工程设计研究院有限公司前身,以下简称“上海市水利院”)代表上海市水利局提出黄浦江河口建设开敞式大闸方案的设想,以彻底解决上海防洪(潮)问题^[1]。自黄浦江河口建闸提出至今已40年,黄浦江遭遇了“9711”号、“派比安”“桑美”“麦莎”“海葵”“菲特”“烟花”等多次台风袭击,黄浦江河口建闸研究也开展了规划、选址、设防标准和规模、土地预控等相关研究工作。2021年7月上海遭遇“烟花”台风袭击,出现台风、暴雨、洪水和天文大潮“四碰头”情况,黄浦江中上游出现超历史高潮位水情^[2],黄浦江防洪(潮)能力提升方案又被社会各界提上议事日程。为更好地开展黄浦江河口建闸研究和尽快推进项目立项,有必要对前期研究成果进行总结,并提出下一步研究的重点,以供相关决策部门参考。

1 黄浦江概况

1.1 流域水系

黄浦江旧称“黄浦”,为吴淞江(上海市区段称“苏州河”)的一条支流。明朝隆庆三年(1569年),巡抚海瑞疏凿吴淞江黄渡至宋家桥(今福建中路桥)段的河道,黄浦江与吴淞江才开始在外白渡桥位置汇流(史称“江浦合流”)^[3]。其后,由于吴淞江逐渐淤积萎缩,而黄浦江因洪水下泄、潮流上溯逐渐变宽,从而转变为太湖洪水下泄的主通道。目前,黄浦江已经发展成为上海城市的中心河流,成为上海

的母亲河,具有防洪、供水、排水、航运、生态、景观、旅游等综合功能。黄浦江自淀山湖至吴淞口总长约113 km,流域面积约2.4万 km²,流经青浦、松江、奉贤、闵行、徐汇、黄浦、虹口、杨浦、宝山、浦东新区等区,至吴淞口注入长江(图1)。黄浦江干流河面宽一般为300~770 m,绝大部分河段面宽为400~600 m,河底高程为-15~-5 m,槽蓄容量约为3.65亿 m³。



图1 黄浦江水系示意图

1.2 水文特性

黄浦江为非正规半日潮感潮河流,每天两涨两落,平均涨潮历时为4 h 33 min,平均落潮历时为7 h 52 min,全潮历时为12 h 25 min。根据水文资料分析,吴淞站历史最高潮位为5.99 m(1997年8月19日),历史最低潮位为0.25 m,多年平均高潮位为3.24 m;黄浦公园站历史最高潮位为5.72 m(1997年8月19日),历史最低潮位为0.24 m,多年平均高潮位为3.12 m;米市渡站历史最高潮位为4.79 m(2021年7月26日),历史最低潮位为0.64 m,多年平均高潮位为2.71 m。由于全球气候变化、海平面上升、风暴潮加剧、地面沉降等自然环境因素以及人类社会活动影响等原因,黄浦江沿岸水位出现了趋势性抬高,导致水文频率分析结果不断变化(表1)。

1.3 洪潮灾害

黄浦江是长江下游南岸唯一一条未设闸控制的最大支流,也是太湖流域重要的泄洪通道,易受下游高潮、上游洪水和区域暴雨的共同影响。1949—2022年,共有28次较大的强风暴潮灾害影响上海,其中“4906”“5612”“6207”“8114”“9711”“0012”

表1 黄浦江高潮位历次分析结果

频率/%	吴淞站潮位/m			黄浦公园站潮位/m			米市渡站潮位/m		
	1984年	2004年	2021年	1984年	2004年	2021年	1984年	2004年	2021年
0.01	6.76	7.12	7.15	6.29	6.80	6.75	4.26	4.80	5.48
0.1	6.27	6.60	6.58	5.86	6.26	6.24	4.10	4.58	5.13
0.2	6.11	6.44	6.41	5.72	6.09	6.09	4.04	4.51	5.02
0.5	5.90	6.22	6.17	5.54	5.88	5.88	3.97	4.41	4.88
1	5.74	6.05	6.00	5.40	5.70	5.72	3.92	4.33	4.76
2	5.59	5.88	5.82	5.26	5.53	5.56	3.85	4.25	4.65

“0509”“1323”“2106”“2212”号台风引起的强风暴潮造成的灾害尤为严重。统计资料表明,吴淞站年最高水位都与风暴潮有关(表1),1997年8月“9711”号台风期间,吴淞站达历史最高水位5.99 m。来自黄浦江上游的太湖流域性洪水多发生在6—7月的梅雨期,降雨历时长、总量大、范围广,易造成流域性洪涝;8—10月为台风多发期,降雨集中、强度大,易造成区域性洪涝。由于河道水面比降小,平均坡降约十万分之一,流速缓慢,泄洪时常受高潮顶托,洪水受阻在黄浦江上游地区,致使黄浦江上游水位抬高。新中国成立以来,流域性的大洪水有5次,分别为1954年、1991年、1999年、2016年和2020年,均造成黄浦江上游水位达到当年最高值。近年,受台风、暴雨、高潮、洪水多灾害叠加影响频次增多,2021年7月“2106”号台风期间,不仅吴淞口出现了5.55 m高潮位,黄浦江上游地区潮位亦突破历史极值,米市渡站最高潮位达4.79 m(表2),超过设防水位4.10 m。

表2 典型台风期间黄浦江沿线3个水文站高潮位

台风编号	发生日期	潮位/m			
		吴淞站	黄浦公园站	米市渡站	吴淞站与米市渡站差值
8114	1981-09-01	5.74	5.22	3.70	2.04
9711	1997-08-18	5.99	5.72	4.27	1.72
0012	2000-08-31	5.87	5.70	4.15	1.72
0509	2005-08-06	5.04	4.94	4.38	0.66
1323	2013-10-08	5.15	5.17	4.61	0.54
2106	2021-07-26	5.55	5.50	4.79	0.76
2212	2022-09-15	5.53	5.44	4.63	0.90

1.4 防洪(潮)工程体系

历史上的黄浦江两岸为自然岸坡,20世纪50年代出现高潮位漫溢后才开始修建防汛墙,以后逐年建设和加固,1974年市区基本实现了封闭。在遭遇了多次台风袭击后,上海于1974年提出黄浦江防汛墙按百年一遇标准建设和加固。但是,1981年9月上海遭遇了“8114”号台风风暴潮,黄浦江沿岸又出现漫溢。1984年9月17日,国家水利电力部同意上海市区防洪墙的加高加固可按千年一遇标准(相应黄浦公园水位5.86 m,吴淞口水位6.27 m)进行。1988—2001年上海完成了208 km的市区防汛墙加高加固工程,2002—2005年完成了黄浦江干流徐浦大桥—千步泾段的新增防洪工程,1994—2004年完成了黄浦江上游干流千步泾—三角渡段的防洪工程。至此,黄浦江两岸(含支河两岸至第一座挡潮闸)已形成从吴淞口到江浙地界的封闭防线,其中市区段(吴淞口—千步泾)可防御千年一遇高潮位(1984年水文分析成果),上游干流(千步泾—三角渡)及其支流段(太浦河、拦路港、红旗塘、大泖

港)为50年一遇防洪标准。

2 前期研究回顾

2.1 河口变迁及治理

黄浦江河口在“江浦合流”以前为吴淞江河口^[4]。不管吴淞江还是黄浦江都是湖源型河流,上游无沙或很少沙输出,所以河口变迁主要受随潮进入的长江泥沙和潮流影响,呈现冲淤交替和季节性变化。原河口有拦门浅滩(即吴淞外沙)将河口分为两支,在距河约11 km的高桥港处汇合。北支为轮船主航道(亦称“老航道”),出口处亦有拦门浅滩(即吴淞内沙)(图2)。鸦片战争后,为使吃水水深6.7 m的大船能趁最低高潮进出,荷兰和德国等多位工程师为如何治理黄浦江河口提出不同意见,最终时任黄浦河道局总工程师的荷兰人奈格的意见获得通过,主要是①建设左凹岸导堤(1910年10月完成)和右凸岸顺坝(1911年4月完成),缩窄河口;②堵塞北支上口,开挖南支新航道。此后,1912年新成立的黄浦江浚浦局总工程师瑞典人海德生和继任的英国人查得利基本沿用奈格的治理思路^[3]。虽然奈格的增加进潮量减少黄浦江河口淤积的理论站不住脚,但河口还是被固定了下来。20世纪90年代末,上海市水利院对使用多年的吴淞左导堤开展修复设计,并在头部新建了导航灯塔。右岸由于为凸岸,泥沙淤涨,为维持一定的航道水深和宽度,航运管理部门经常性疏浚维护^[5]。

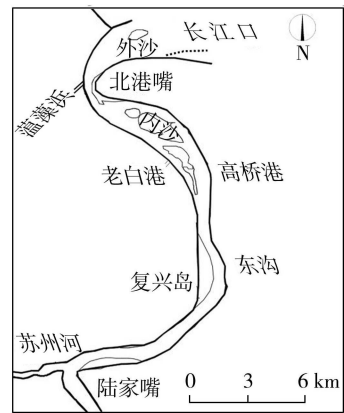


图2 1900年初黄浦江河口示意图

2.2 建闸研究过程

上海市区最初集中在黄浦江西侧很小范围,其余均为农村,所以遭受风暴潮高潮位影响后主要防御思路是建设防汛墙。1981年9月“8114”号台风侵袭上海,黄浦公园站水位突破历史记录,外滩防汛墙出现漫溢,浦东支河打开纳潮,降低黄浦江潮位。1982年,上海市水利院代表上海市水利局提出黄浦江河口建设开敞式大闸方案的设想。1996年,上海

市水利局组织的海平面上升对上海影响及对策研究课题组建议把在黄浦江河口建闸作为上海市远景规划的防汛措施。

1997年8月上海遭遇“9711”号台风后,上海市科委于1998年1月正式立项“黄浦江河口建闸工程规划研究”。2000年12月,上海市水利局主持,22家高校、科研单位参与,对黄浦江防洪形势、河口建闸必要性、建闸条件、挡潮闸功能、闸址选择、工程布置、环境影响进行了初步研究。研究结果表明:上海市中心城区黄浦江防汛墙防洪能力已降为不足200年一遇,为恢复和提高上海市区的防汛能力,在黄浦江河口建挡潮闸势在必行^[6]。

2002年4月,在水利部支持下,上海市水务局组织编制《黄浦江河口建闸预可行性研究暨项目建议书》。上海市水利院联合多家单位开展了勘测调查、水文分析、建闸选址等工作。由于经费、资料等原因,2005年后工作基本停滞。2008年2月16日,国务院以“国函[2008]12号”文批复的《太湖流域防洪规划》提出,由于水情工情变化、海平面上升、地面沉降等原因,黄浦江防汛墙已不能满足原定防洪标准要求,需采取相应措施提高防洪能力,黄浦江河口建闸是解决上海城市防洪的重要措施,也有助于流域防洪。据此,课题组对前期研究成果进行汇总分析,编制了《黄浦江防汛墙防汛风险初步分析》《黄浦江河口挡潮闸的设防标准和闸孔规模研究》两份研究报告,重点论述了建闸的必要性,基本确定河口闸的基本功能为挡风风暴潮、适应通航,挡潮闸设防标准为千年一遇,初拟闸孔总净宽为375 m,主通航孔净宽为225 m,底坎顶标高为-12.0 m。

2011年,上海市水务局立项并组织开展“黄浦江河口建闸吴淞口选址可能性”专题研究。2013年,黄浦江建闸吴淞口选址的相关研究——吴淞口水势河势及河口形态优化利用研究得到水利部公益性科研专项计划支持。两项课题综合运用数学模型、物理模型、船舶航行仿真试验等多种手段,从水动力、河势、防洪、通航、涉水工程等方面,对吴淞口形态优化进行合理性分析,结果认为吴淞口闸址建闸的可行性很低,不建议将河口挡潮闸选址在吴淞口口门。2014年,黄浦江河口建闸工程选址研究被列为上海市发改委重大工程前期研究项目。上海市水务局组织,上海市水利院主持,从黄浦江河口到河口第一直道段末端老白嘴约9.5 km范围内进行选址,委托上海海事大学开展了通航安全和通航规模专题分析,结合防洪效益、水流条件、通航影响、用地条件、制约因素等方面的对比分析,于2019年4月完成研究报告,结果表明,军工路码头闸址目前建闸

可行性相对最高,吴淞码头闸址若能解决海军码头置换问题,防潮(洪)效益最大,两个方案都应进行规划控制。

2018—2020年,在上海市水务局科研计划支持下,上海市水利院又主持开展了黄浦江河口建闸前期水沙及河势动态跟踪与研究和黄浦江河口建闸应对流域超标准洪水的行洪作用及功能定位深化研究,结论为:①吴淞口外河势在人工干预下基本稳定,军工路闸址呈冲刷趋势,吴淞码头闸址冲淤基本平衡,整体河势变化不大;②流域下垫面变化导致黄浦江洪量明显增加,河口建闸对降低太湖高水位效果不明显,对降低区域及片内水位作用有限;③鉴于已有水沙资料的不连续性,应及早制定长期观测计划,并开展吴淞口河势演变和水沙输运特性的动力机理研究。同期,上海市水利院主持开展了《黄浦江河口建闸前期技术储备研究》,并被列入《2020年上海市水务重大工程“二库一计划”目标管理手册》。2020年11月5日,经上海市人民政府以“(沪府[2020]75号)”批复的《上海市防洪除涝规划(2020—2035年)》提出,黄浦江防汛墙达标主要依靠黄浦江河口建闸,尽快推进相关研究与论证工作,做好河口闸规划选址和用地预控,条件成熟后择机建设;过渡期间,须制订并落实防汛防台应急预案,保障城市安全。2020年底,上海市城市规划设计研究院联合上海市水利院完成了黄浦江河口建闸选址规划,对吴淞码头闸址和军工路码头闸址进行了土地预控。

2021年7月26—28日,遭遇“烟花”台风袭击后的黄浦江中上游出现超历史高潮位,黄浦江河口建闸提升黄浦江防洪(潮)能力又被提上议事日程。上海市水务局于2021年9月17日向包括上海市水利院在内的国内较有名的设计单位发函,邀请参加黄浦江河口闸技术储备研究投标。2021年12月17日,上海市水务局组织听取了4家投标单位的方案汇报会,重点是对闸门门型的比选。2022年1月15日,上海市水务局又邀请了多位行业内院士参与的专家咨询会,听取了上海市水利院主持开展的黄浦江防洪能力提升总体方案(以下简称“总体方案”),一致认为河口建闸与中上游加高加固组合方案对提升黄浦江防洪(潮)能力总体合理可行。2022年8月15—17日,水利部水利水电规划设计研究总院会同太湖流域管理局对总体方案进行审查,同意推荐采用“河口建挡潮闸与中上游堤防加高加固相结合方案”,并于10月11日以“水总规[2022]290号”文将审查意见报送水利部。2022年11月9日,水利部办公厅以“办规计函[2022]1017号”文

将审查意见印送上海市水务局。

2.3 主要研究成果

2.3.1 河口建闸是国内外滨海城市防潮经验

世界上受台风或飓风等影响严重、经济发达的河口三角洲地区,如太平洋地区、波罗的海东岸地区、地中海北岸地区、北大西洋西岸等,英国、荷兰、意大利、德国、俄罗斯等欧洲国家,以及美国、日本等各国沿海城市的防潮措施,均走过了从加高加固防洪堤、防洪墙到河口建挡潮闸历程。我国在渤海湾、江苏和浙江沿海主要入海河口也建有规模不同的挡潮闸。1974年,英国经投资、土地、建设周期比选加高加固防洪堤和建挡潮闸方案后,启动了泰晤士河挡潮闸建设,1984年5月8日正式开闸运行。1987年,荷兰开工建造鹿特丹新水道挡潮闸,1997年竣工,估算比加高加固防洪堤缩短工期约20 a。目前,由于城市扩大和海平面上升、风暴潮灾害加剧,英国正研究将泰晤士挡潮闸向河口外移^[7-8],美国也在研究在韦拉札诺海峡建设挡潮闸保护纽约大都市区的防潮安全^[9]。这些充分说明河口建闸是提高防汛能力的合理途径,值得借鉴。

2.3.2 河口建闸是黄浦江防洪(潮)唯一途径

黄浦江设计高水位目前使用的是1984年水文分析成果。受全球气候变化、城市热岛、雨岛效应影响,台风多发性、暴雨突发性、潮位趋高性以及风、暴、潮、洪遭遇的风险性更为复杂多变,致使上海洪涝水灾频次、量级、强度和风险呈增大趋势,黄浦江沿线水位呈趋势性抬升。2021年水文分析成果在吴淞站、黄浦公园站、米市渡站的设防高潮位分别上升了0.31、0.38、0.55 m,相应堤防超高下降0.09~0.72 m,堤防安全超高严重不足,2021年“烟花”台风期间上游局部已经出现了漫溢险情。黄浦江上游高水位抬升尤为明显,且越往上游抬升幅度越大,米市渡站在“9711”号台风、2005年“麦莎”、2013年“菲特”以及2021年“烟花”台风期间最高水位分别达4.27、4.38、4.61、4.79 m,基本每隔8年刷新一次历史最高水位。黄浦江市区段实际防御能力已从千年一遇降至20~300年一遇,上游段已从50年一遇降至10~20年一遇^[10]。对吴淞口可能高潮位,2020年采用随机水文过程等预测方法,考虑海平面上升、地面沉降和风暴潮事件,分析结果表明:①未来30年内如不出现大于5.80 m的高潮位,2050年吴淞口千年一遇高潮位与现状基本保持一致;②未来30年内,吴淞口出现1、2次超过5.50 m高潮位时,其千年一遇设计高潮位相对现状设防水位分别高出0.45 m和0.55 m^[11]。然而,2021年“烟花”台风期间吴淞口潮位达到了5.55 m,2022年“梅花”台

风期间吴淞口潮位达到了5.53 m。由于历经5次加高加固完成的防汛墙基础薄弱,中心城区两岸滨水空间开发已基本完成,再次按最新水文分析成果全线加高1.5~2.0 m防汛墙难以实现,而且投资巨大、影响城市景观,为应对黄浦江高水位不断抬升,完善流域和区域防洪体系,结合既有防汛墙,在黄浦江河口建闸,实现“闸+墙”组合提升黄浦江防汛能力非常必要和迫切。

2.3.3 挡风暴潮是黄浦江河口闸的主要功能

黄浦江河口闸主要防止台风风暴潮高潮位对沿岸的淹没影响,数值计算结果显示,河口建闸挡潮可明显降低黄浦江沿程高水位^[12],所以挡风暴潮是河口闸的主要功能。另外,黄浦江具有防洪、供水、排水、航运、生态、景观、旅游等综合功能,所以黄浦江河口闸应满足和提升这些功能的发挥。黄浦江是上海港的发源地,航运是黄浦江不可或缺的功能,所以河口闸应满足现状和规划的航道等级规模。黄浦江也是太湖流域东排的主要行洪通道,所以河口闸应不降低或有利于太湖流域行洪功能。数值计算结果显示,对于以洪、潮叠加作用为代表的“烟花”台风期间高水位,若能合理调度河口挡潮闸,可降低黄浦江干流及中上游沿程水位;对于以1999年梅雨期间为典型的洪水,河口闸启闭对降低高水位作用有限。黄浦江是城市中心河流,承担着区域排水功能,上游分布着一部分水源地,所以河口建闸后需要满足水资源、水环境调度要求,并为黄浦江两岸打造世界级滨水空间创造条件。因此,黄浦江河口闸的功能定位为:挡风暴潮,适应通航,兼顾流域、区域行洪及水环境应急调度。挡潮闸平时敞开,遇风暴潮关闸挡潮,同时可为超标准流域行洪、突发水环境事故应急调度、黄浦江两岸滨水空间打造等创造条件。

2.3.4 河口闸与堤防组合防潮体系的标准需考虑多种因素

1984年国家水利电力部以“(84)水电水规字第94号”文《关于“上海市区近期防洪水位标准的意见”的复函》批复的黄浦江加高加固按千年一遇标准,2008年国务院批复的《太湖流域防洪规划》、2013年国务院批复的《太湖流域综合规划》,以及国务院以“国函[2017]147号”批复的《上海市城市总体规划》(2017—2035年)、上海市政府以“沪府[2020]75号”批复的《上海市防洪除涝规划》(2020—2035年)均明确黄浦江按千年一遇高潮位设防。所以,黄浦江河口闸的高水位设防标准应不低千年一遇,相应闸外防汛墙的设防标准也应一致。鉴于伦敦、荷兰等国外大型城市的河口挡潮闸的设防标准均较高^[7,13],黄浦江河口闸的设防标准可以

采用千年一遇高潮位设防,并采用万年一遇高潮位校核。河口建闸后,黄浦江的防洪(潮)体系由“单一堤防”防御转变为“河口闸+堤防”组合防御。闸内防汛墙市区段堤防应同时满足城市防洪(潮)千年一遇、流域防洪百年一遇和区域防洪百年一遇设防要求;上游干流段堤防应同时满足城市防洪(潮)百年一遇、流域防洪百年一遇和区域防洪百年一遇设防要求;原则上按现状高程予以加固保留。闸顶高程应采用考虑海平面上升、地面沉降等主要防汛风险因素在内的设计100年使用期末千年一遇潮位设计。

2.3.5 规划预控闸址涉及防洪效益与动拆迁难度

黄浦江河口到第一直道末端约9.5 km范围内,现有穿跨江建构筑物设施主要有500 kV高压架空线、DN2400原水管、合流一期污水总管、1.6 MPa天然气管、轨道交通10号线,长江路隧道、长江西路隧道、G1503隧道、S20隧道等,规划穿跨江建构筑物设施主要有沪通铁路、闸殷路-双江路隧道、轨道交通21号线等,相对空余且顺直的河段并不多。统筹考虑既有设施、城市规划、防洪效益、河势稳定、航运、拆迁等因素后,认为在该段最大支河口蕴藻浜以外较为合适的闸址为吴淞码头方案(距吴淞口约1.7 km),蕴藻浜以内较为合适的闸址为军工路码头方案(距吴淞口约6 km)(图3)。吴淞码头闸址最大优势在于将蕴藻浜纳入保护范围,最大限制因素为海军码头整体搬迁难度大。军工路码头闸址优势在于河道直段,河床偏槽不明显,两岸企事业单位规划都将搬迁;劣势在于未能将蕴藻浜纳入保护范围。因此,若海军码头能够搬迁,优先选择防洪效益显著和对城市发展带动作用显著的吴淞码头闸址,军工路码头闸址为目前可行性相对较高的方案,建议对两个方案都进行规划控制。根据两闸址位置城市规划,初步对土地进行预控,吴淞码头闸址两岸所需陆域用地约15.32 hm²,军工路码头闸址两岸所需陆域用地约17.93 hm²。



图3 现状及规划黄浦江河口段穿跨江设施

2.3.6 通航是影响闸孔总净宽的主要因素

闸孔总净宽的确定应以最大限度满足行洪过流和最小通航净宽为原则,同时考虑减少闸室淤积、减轻对上下游河势的影响。规划黄浦江航道规模为:河口段为3万t级,至吴淞段为2万t级,至巨潮港段为3000t级,再往上为1000t级。考虑未来黄浦江核心区段航运功能调整,2万t级海轮和7万t级国际邮轮是重点考虑的大型船型。基于现状地形和规划通航船型,经航模试验分析,2万t级及内河船舶(队)双向通航和7.6万t级邮轮控制单向(或与千吨级船舶交会)通航,吴淞码头闸址最小通航净宽为238 m,军工路码头闸址最小通航净宽为225 m,通航水深均为12.0 m,以底槛顶高程为-12.0 m控制。不同的闸址位置在不同水位情况下的过流断面不同,现状基本通过疏浚满足9.0 m水深的航道宽200 m(图4)。为分析闸孔过流能力,顺应地形拟定单孔、双孔、三孔和四孔方案(图5),经数学模型分析,闸孔规模从250 m到500 m变化时,挡潮闸净泄量变化在0.4%~3.7%左右,即闸孔规模大小对黄浦江泄洪能力和沿程最高水位影响较小,干流和各

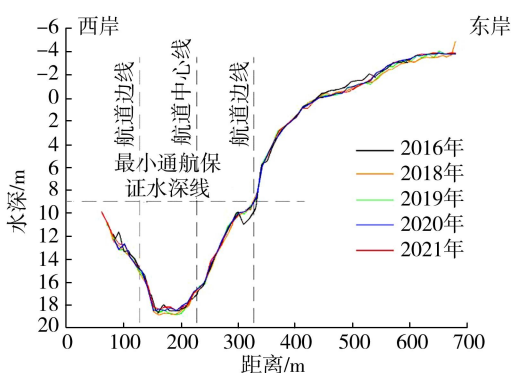


图4 吴淞码头闸址现状断面及维护示意图

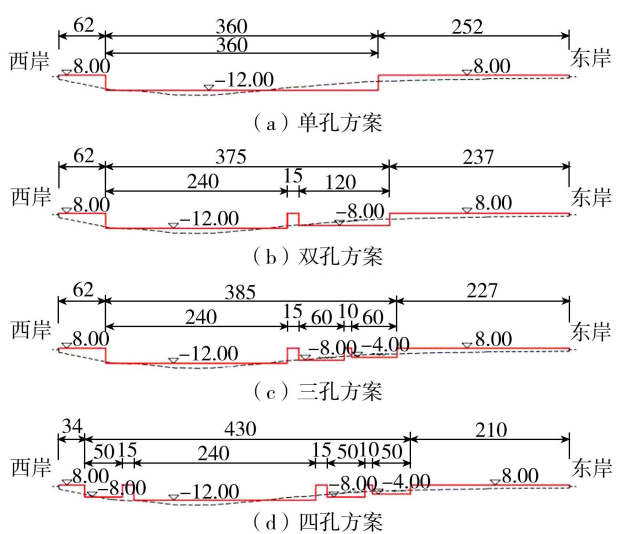


图5 吴淞码头闸址拟定闸孔净宽示意图(单位:m)

水利片平均最高水位差别均不超过 2 cm。各闸孔规模情况下,涨落流速变化范围均可控制在闸上下游 400 m 范围以内,从挡潮闸自身防护范围分析看,闸孔总规模宜控制在 300 m 以上。

2.3.7 启闭频次对流域行洪的贡献

黄浦江是太湖流域东排的重要通道。太湖流域发生的超标准洪水主要有两种类型,一种是 6—7 月的梅雨季节全流域遭遇暴雨产生的洪水,另一种是下游高潮位顶托与上游洪水下泄组合。近年全球气候变化和水情、工情发生变化,黄浦江中上游连续突破历史高潮位。以 2021 年“烟花”台风期间太湖流域水情实况为典型,经数学模型反演,结果显示:若河口已实施挡潮闸,在涨潮时启闭 1 次挡潮,可以降低黄浦江中上游高潮位约 0.5 m 左右,对杭嘉湖地区高水位影响不明显;若河口挡潮闸随潮汐连续启闭多次,不仅黄浦江上游水位下降明显,杭嘉湖地区高水位也会下降,但仍不能满足上游设防水位要求。以 1999 年 6—7 月梅雨期发生的特大洪水为典型,数学模型分析结果表明河口挡潮闸调度对太湖流域梅雨引起的洪水效果不明显,也无不利影响。

2.3.8 航运影响分析涉及闸孔净宽及启闭频次

黄浦江河口挡潮闸的基本功能为挡潮,挡潮闸平时开敞,遭遇风暴潮且预报黄浦江将发生一定高水位情况下才关闭,所以挡潮闸启闭的频率非常低。同时,在风暴潮天气情况下,船舶本身也会避风停航。因此,河口建闸对正常航行影响非常小。依据航道规划,现场调研统计,并经船模仿真实验,确定了吴淞码头和军工路码头闸址的通航孔最小净宽分别为 238 m 和 225 m,比现行航道 180 m 宽度还大。如果能研究采用单孔净宽超 300 m 以上闸型,则会改善闸址位置的通航条件。若为降低多灾害组合造成的杭嘉湖地区高水位,连续启闭挡潮闸调度,则挡潮闸关闭时间较长,可能会增加船舶停航时长。

2.3.9 河口闸门型研究是建闸研究的重点

黄浦江河口挡潮闸防御外海风暴潮引起的高潮位,挡潮闸状态是挡潮;协助太湖流域行洪可以利用低潮位关闸,减少涨潮对洪水的顶托,增加槽蓄量,挡潮闸状态也是挡潮。所以,河口挡潮闸单向挡潮可以实现挡潮、协助行洪功能。国外既有的河口大跨度挡潮闸基本都是单向挡潮,如荷兰新水道挡潮闸(总宽 180×2 m)^[14]、俄罗斯涅瓦河挡潮闸(总宽 110×2 m)^[15]、威尼斯潟湖挡潮闸(总宽 20×78 m)等^[16]。国内苏州河河口单跨 100 m 的挡潮闸实现了双向挡水^[17-18]。根据大跨度挡潮闸建设成功经验,荷兰新水道挡潮闸和俄罗斯涅瓦河挡潮闸均采用同样的浮箱扇形门门型,利用水体浮力减轻闸门

重力影响,改变传统闸门受力方式,化解跨度对受力的影响。后期建设的俄罗斯涅瓦河挡潮闸优化了闸门启闭方式,改荷兰新水道挡潮闸的锅驼机带动齿轮启闭方式为动力机车推拉启闭方式。所以,目前黄浦江河口挡潮闸较可行且有成功经验借鉴的门型是浮箱扇形门,并可以借鉴此类门型在结构形态、材料、启闭方式等方面进行优化改进。

3 研究展望

3.1 立项决策研究

大型挡潮闸规模大、投资多、影响广,所以决策时间长。荷兰在 1953 年 1 月遭遇北海特大风暴潮灾害一个月后成立三角洲委员会,研究建设防潮防洪基础设施建设,经历 30 多年研究决策,于 1987 年开工建设世界上最大的挡潮闸工程,1997 年竣工^[14]。英国也是在 1953 年 1 月遭遇北海特大风暴潮灾害后成立了以 Waverley 勋爵为首的部级委员会和泰晤士技术委员会,研究伦敦的挡潮防洪问题,最终决定修建挡潮闸^[19],1973 年 7 月开始招标,1984 年 5 月 8 日开始运行^[20]。前苏联在 1955 年遭遇波罗的海风暴潮后决定研究建设芬兰湾挡潮闸,于 1978 年 10 月启动建设,后因公众怀疑建闸会影响水质和生态环境于 1995 年暂停,经再次调查论证无负面影响后复工,由于苏联解体和经济危机,2005 年才正式恢复建设,2011 年 8 月 12 日正式启动运行^[15]。国外大型挡潮闸的建设都是在遭遇特大风暴潮灾害后,经历少则 20 多年、多则 30 多年的决策过程。黄浦江也是经历了 1981 年 9 月“8114”号风暴潮、1997 年 8 月“9711”号风暴潮、2021 年 7 月“2106”号风暴潮灾害,历经 40 年研究尚未有明确决策建设的意见,说明河口建闸在黄浦江防洪减灾体系中的不可替代性和紧迫性,以及协调解决各方面的相关关系等还未引起足够重视。建议在决策中始终不能忘记挡潮防洪、降低灾害损失是挡潮闸立项与否的决定性因素,否则会因各方面关系协调而拖滞。

3.2 弯道建闸与航运影响

黄浦江是上海国际航运中心建设的重要组成部分,河口闸建设必须充分重视黄浦江航运功能,适应航运现状及未来发展需求。规划预控的两闸址均位于河道弯段,船舶在弯段水流影响下操控性较差,尤其是 1 000 t 级船舶会趁流航行,涨潮上行,落潮下行,以减少航行能耗,受涨落流速影响较大。虽然前期以 2 万 t 级双向通航和 7 万 t 级邮轮控制单向通航航模试验确定了两闸址的最小通航净宽和水深,并且有英国泰晤士闸也建在微弯河段的经验,说明宽大水域弯道建闸对航运影响可以接受,但是下

一步还需要进一步论证不同涨落急流速对不同等级船舶在弯道航行的影响,在有条件情况下尽量拓宽主通航孔净宽或直接采用单孔净宽,尤其是航运管理部门建议水中尽量不设闸墩,采用单孔挡潮闸。弯道河槽断面的不对称性与单孔净宽挡潮闸的对称性是一对矛盾,所以需要研究确定大跨度单孔挡潮闸的合理净宽,既要满足闸室不淤积,也不会对上下游河势造成大的影响。

3.3 关闸时机和频次

河口挡潮闸的关闸时机和频次与挡潮效果、涨潮时长、挡潮闸关闭准备时间和关闸时间关系密切,也与航运的响应和影响关系密切。初步研究成果显示,较低潮位关闸对降低中、上游高水位效果较好,提前1 d关闸和多次连续关闸还能降低杭嘉湖地区的高水位,也能增加太湖流域洪水净泄量。但是,提前关闸和连续关闸对航运影响较大,且需要以潮汐和洪水准确预报为基础。较低水位关闸缩短了挡潮闸关闭准备时间,可增加挡潮闸关闭时间;较高水位关闸,挡潮闸关闭准备增加,挡潮闸关闭时间则缩短。另外,影响河口挡潮闸挡潮效果和降低高水位风险,与预报什么样的高潮位时挡潮闸必须关闸关系较大。这涉及挡潮闸关闸频次,也会涉及关闸对航运和社会影响的程度。统计近30年风暴潮引起的吴淞站最高潮位,超过5年一遇潮位5.18 m的最高潮位共有6次,超过2年一遇潮位4.90 m的最高潮位共有18次。所以,在风暴潮期间关闸的频次和时长应是流域防洪、城市防洪和航运等管理部门都能接受的。由于气候变化、海平面上升和水情、工情变化等,导致了許多国家的河口高潮位持续抬升^[21]。这导致了河口挡潮闸的关闸频次增加,英国泰晤士河挡潮闸和荷兰新水道的挡潮闸近些年的关闸频次明显增加^[8,22]。

3.4 闸型设计要素

挡潮闸功能和闸孔净宽是闸型设计的主要因素,但关闸频次和闸门启闭时长也是闸型确定的重要因素。苏州河河口挡潮闸单跨100 m,双向挡水,每天启闭两次,可以说是国际上运行频次最多的挡潮闸。挡潮闸闸型设计的另一项要素是挡潮闸闸门启闭的时长。国际上既有的200 m以上的大跨度挡潮闸闸门启闭时间均较长,俄罗斯涅瓦河挡潮闸利用动力机车驱动将220 m的挡潮闸启闭时长控制在45 min左右^[15]。黄浦江河口的涨潮时间较短,如何在较短时间内实现大跨度闸门动水启闭是闸门选型设计的重点。大跨度闸门短时间动水启闭,造成了启闭过程动水压力巨大、挡水状态闸门内力巨大和闸墩承担的水平推力也巨大。国际上既有大跨度闸

门都改变了传统的闸门受力方式,化解了跨度对受力的影响。另外,荷兰新水道挡潮闸、俄罗斯涅瓦河挡潮闸、威尼斯潟湖挡潮闸均利用了水的浮力,减轻了闸门重力的影响。这些都给黄浦江河口挡潮闸门型设计提供了很好的思路。与国际上大跨度挡潮闸相比,黄浦江河口挡潮闸还有一项突出的难点是河口水体泥沙含量较高,如何利用水流或挡潮闸启闭减少闸室淤积,或者是挡潮闸设置冲淤系统,也是挡潮闸门型设计需要考虑的因素。

3.5 生态环境影响

黄浦江是一条受潮汐影响的湖源型自然河流,上通太湖,下连长江,直达东海。黄浦江上游有金泽水库等水源地^[23],出口直对长江口内最大的江心水库——青草沙水库^[23-24]。虽然黄浦江河口闸平时敞开,风暴潮期才关闭挡潮闸,而且一次关闸时长仅4~6 h,但是只要在河口建闸,不可避免会让社会各界怀疑其是否会对黄浦江水环境质量、水环境容量和自然生态系统产生影响。俄罗斯圣彼得堡挡潮闸就因为公众怀疑建闸会对水质和生态环境产生影响于1995年暂停,后经调查论证无负面影响后再复工建设^[25]。所以,不管河口建闸对生态环境有无影响,应在决策时做好评价,以消除公众疑虑。生态环境影响评价不仅要负效应评价,也要做正效应评价。历史上,2012年12月长江口发生过船舶溢油污染事件^[26],2013年3月黄浦江上游曾发生过死猪事件^[27],这些均对黄浦江生态环境造成了影响。如果有河口闸,可以通过挡潮闸启闭调度减轻或消除突发性水污染事件对黄浦江水环境或长江口水环境的影响。

4 结 语

黄浦江是太湖流域沿长江唯一开敞支流,每年遭受台风、暴雨、高潮和洪水多重灾害叠加影响。受全球气候变化、海平面上升、地面沉降、风暴潮和上游水情、工情变化,黄浦江水位呈现趋势性抬升明显,中上游堤防已发生多次堤顶漫溢险情。为满足上海经济社会发展要求,抵御风暴潮和洪水灾害,提升流域和区域防洪(潮)能力,保障上海城市防洪(潮)安全,并为两岸滨水空间更新改造创造条件,实施黄浦江河口挡潮闸工程非常必要和紧迫。40年研究表明,黄浦江河口建闸是解决上海永久防洪(潮)问题的必然选择,挡潮闸的基本功能是挡风暴雨、适应通航,合理调度挡潮闸对洪、潮共同作用引起的流域超标准洪水具有一定作用,挡潮闸设防标准建议按100年使用期末千年一遇潮位设计,统筹考虑城市规划、防洪效益、河势稳定、航运影响、拆

迁影响等因素。吴淞码头闸址和军工路码头闸址均具有可行性,闸孔单孔总净宽超过 300 m 对行洪、航运、河势影响较小且能控制闸室淤积。未来研究建议聚焦黄浦江河口建闸在防洪减灾体系中的不可替代性及建闸时机的论证,弯道建闸可行性及对河势、航运的相互影响,洪、潮遭遇组合可能性及挡潮闸调度原则的确定,关闸时机和频次对挡潮效果、航运的影响,挡潮闸闸型对功能、关闸时长、河道淤积的适应性以及突破跨度对受力影响,生态环境影响负效应和正效应评价等。黄浦江河口建闸并不能完全解决中上游堤防的防洪能力提标,需要同步实施中上游堤防加高加固,并在两项工作完成前做好防汛应急预案。

参考文献:

- [1] 邵常坎. 解决上海市区防洪问题的设想[J]. 中国水利, 1984(5):17-19. (SHAO Changkan. Tentative ideas on solving the problem of flood control in Shanghai urban area [J]. China Water Resources, 1984 (5): 17-19. (in Chinese))
- [2] 沙治银. 上海市防御 202106 号台风“烟花”的过程及思考[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32 (4): 52-54. (SHA Zhiyin. The process and thinking of Shanghai' s defense against Typhoon “In-Fa” No. 202106[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(4) :52-54. (in Chinese))
- [3] 龚宁. 清末黄浦江治理之争与浚浦局的设立[J]. 清史研究, 2021 (6): 18-28. (GONG Ning. The regulation of the Huangpu River and the establishment of the Whangpoo Conservancy Commission in the Late Qing Dynasty [J]. The Qing History Journal, 2021 (6): 18-28. (in Chinese))
- [4] 褚绍唐. 吴淞江的历史变迁[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1980 (2): 102-111. (CHU Shaotang. Historical changes of the Wusong River [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1980 (2):102-111. (in Chinese))
- [5] 唐刚,杨晓坤. 黄浦江吴淞口弯道河段近期冲淤分析[J]. 港口科技, 2022 (3): 33-42. (TANG Gang, YANG Xiaokun. Analysis of scouring and silting in the Wusongkou bend reach of the Huangpu River recent year [J]. Port Science & Technology, 2022 (3): 33-42. (in Chinese))
- [6] 陈美发. 黄浦江河口建闸工程规划研究[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21 (5): 12-13. (CHEN Meifa. Planning for tide gate project at the HuangpujiangRiver Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(5) :12-13. (in Chinese))
- [7] LONSDALE K G, DOWNING T E, NICHOLLS R J, et al. Plausible responses to the threat of rapid sea-level rise in

- the Thames Estuary [J]. Climatic Change, 2008, 91 (1 / 2): 145-169.
- [8] HALL J W, HARVEY H, MANNING L J. Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London [J]. Climate Risk Management, 2019, 24 : 42-58.
- [9] KLUIJVER M, DOLS C, JONKMAN S N, et al. Advances in the planning and conceptual design of storm surge barriers-application to the New York Metropolitan Area [M] // GOSEBERG N, SCHLURMANNT. Coastal Structures 2019. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 326-336.
- [10] KE Qian, JONKMAN S N, VAN GELDER P H A J M, et al. Frequency analysis of storm-surge-induced flooding for the Huangpu River in Shanghai, China [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(2) : 1-17.
- [11] 刘宏宽. 极端高潮位情景对上海吴淞口设计高潮位影响研究[J]. 水文, 2022, 42 (3): 27-31. (LIU Hongkuan. Influence of extreme high tide scenario on design high tide level in Shanghai Wusong Estuary [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(3) : 27-31. (in Chinese))
- [12] 崔冬, 赵庚润, 卢永金. 黄浦江河口建闸挡潮效果初步分析[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (1): 54-57. (CUI Dong, ZHAO Gengrun, LU Yongjin. Preliminary analysis of efficiency of construction of a tidal sluice in estuary of Huangpu River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1) : 54-57. (in Chinese))
- [13] BROEKX S, SMETS S, LIEKENS I, et al. Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach [J]. Natural Hazards, 2011, 57(2) : 245-266.
- [14] WATSON I, FINKL JR C W. State of the art in storm-surge protection: the Netherlands Delta Project [J]. Journal of Coastal Research, 1990, 6(3) : 739-764.
- [15] VASILEVSKY A G, KLIMOVICH V I, TIKHONOVA T S, et al. Contribution of the VNIIG IM. B. E. Vedeneeva to the design, construction, and operation of the St. Petersburg flood protection barrier [J]. Power Technology and Engineering, 2022, 55(5) : 696-701.
- [16] MEL R A, VIERO D P, CARNIELLO L, et al. The first operations of Mo. S. E. system to prevent the flooding of Venice: insights on the hydrodynamics of a regulated lagoon [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 261 : 107547.
- [17] 季永兴, 卢永金, 陈文伟, 等. 苏州河河口水闸工程设计特色[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (增刊 1): 5-7. (JI Yongxing, LU Yongjin, CHEN Wenwei, et al. Design characteristics of Suzhou Creek sluice project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (Sup1) : 5-7. (in Chinese))

(下转第 87 页)

- three-dimensional curved water flow model[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2018, 58 (10):914-920. (in Chinese))
- [8] 张炳昌,许栋,及春宁,等.大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[J].水力发电学报,2019,38(6):77-91. (ZHANG Bingchang, XU Dong, JI Chunning, et al. Research on large eddy simulation of hydrodynamic structures with large width-to-depth ratio and variable curvature curves [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2019, 38(6):77-91. (in Chinese))
- [9] 杨海波.自由面弯道水流三维数值模拟与试验研究[D].成都:四川大学,2007.
- [10] 许栋,刘召平,乾爱国,等.弯曲河道中水流运动的三维数值模拟[J].水利学报,2010,41(12):1423-1431. (XU Dong, LIU Zhaoping, GAN Aiguo, et al. Three-dimensional numerical simulation of water flow in a curved channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (12):1423-1431. (in Chinese))
- [11] 高学平,井书光,贾来飞.溢洪道弯道水流影响因素研究[J].水力发电学报,2014,33(4):132-138. (GAO Xueping, JING Shuguang, JIA Laifei. Research on factors affecting water flow in spillway bends [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2014, 33 (4): 132-138. (in Chinese))
- [12] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等.流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J].水利水电科技进展,2021,41(3):41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al.
- Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3):41-49. (in Chinese))
- [13] 张岩,吴伊平,崔鹏义,等.丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):164-170. (ZHANG Yan, WU Yiping, CUI Pengyi, et al. Numerical simulation research on the influence of spur dike length on bend hydraulic characteristics [J]. Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering, 2019, 30 (1):164-170. (in Chinese))
- [14] 陈翠霞,张小峰,冯向珍,等.弯曲型及顺直型河道水流三维数值模拟[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):84-90. (CHEN Cuixia, ZHANG Xiaofeng, FENG Xiangzhen, et al. Three-dimensional numerical simulation of water flow in curved and straight channels [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(6):84-90. (in Chinese))
- [15] 王雯,顾中明,杨杰,等.基于正交设计的大坝深层抗滑稳定敏感性分析[J].西安理工大学学报,2018,34(3):321-325. (WANG Wen, GU Zhongming, YANG Jie, et al. Sensitivity analysis of deep dam anti-sliding stability based on orthogonal design [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34 (3): 321-325. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-23 编辑:雷燕)

(上接第9页)

- [18] JI Yongxing, YANG Fei, ZHANG Hanyun, et al. A siltation simulation and desiltation measurement study downstream of the Suzhou Creek Sluice, China [J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(6):781-793.
- [19] HORNER R W. The Thames tidal flood prevention scheme [J]. Long Range Planning, 1976, 9(5):78-83.
- [20] HORNER R W. The Thames Barrier [J]. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 1987, 134 (9):752-760.
- [21] ABADIE L M, JACKSON L P, DE MURIETA E S, et al. Comparing urban coastal flood risk in 136 cities under two alternative sea-level projections: RCP 8.5 and an expert opinion-based high-end scenario [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 193:105249.
- [22] VAN DEN BRINK H W, DE GOEDEREN S. Recurrence intervals for the closure of the Dutch Maeslant surge barrier [J]. Ocean Science, 2017, 13(5):691-701.
- [23] WANG Jinhu, ZHANG Debin, ZHANG Weisheng, et al. Impacts of different dynamic factors on the saltwater intrusion in the northern branch of the Yangtze Estuary [J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(6):673-684.
- [24] JI Yongxing, LU Yongjin, LIU Xiaomei. An emergency preparedness plan (EPP) study of a water source reservoir in a tidal estuary [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2012, 16(S1):82-90.
- [25] KOSTERIN N V, SHCHEKACHIKHIN V I. St. Petersburg flood protection barrier system: first years of operation [J]. Power Technology and Engineering, 2017, 51 (4): 371-376.
- [26] WANG Min, SHA Chenyan, WU Jian, et al. Bacterial community response to petroleum contamination in brackish tidal marsh sediments in the Yangtze River Estuary, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99:160-167.
- [27] LI Chenxi, WU Kening, WU Jingyao. Environmental hazard in Shanghai, China: lessons learned from Huangpu River dead pigs incident [J]. Natural Hazards, 2017, 88 (2): 1269-1272.

(收稿日期:2023-03-06 编辑:俞云利)