

咸潮影响下长江口水源地优化布局及白茆沙水库建设可行性分析

季永兴^{1,2,3}, 李路^{1,2}, 高晨晨^{1,3}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200232; 2. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200232;
3. 上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200232)

摘要: 为提升远期上海原水水量、水质供应能力和应对突发咸潮入侵和水污染风险, 在分析长江口水源现状和咸水入侵形势基础上, 论证了长江口水源地优化布局的必要性, 结合咸水入侵监测数据及反演成果提出在白茆沙新建水库方案及原水系统优化调度方案, 并分析了白茆沙水库建设对河势变化、行洪、通航、渔业资源及生态环境等方面的影响。结果表明: 在白茆沙新建水库是较可行的方案, 可对上海境内的长江口水源地进行优化布局, 扩大供水规模并上移取水口; 拟建的白茆沙水库位于白茆沙整治工程内侧, 既可确保围堤安全稳定, 也不影响行洪、通航, 对河势变化、渔业资源及生态环境影响微小; 布置于水库南侧微弯水道处的取水口, 既可避免淤积对取水口的影响, 也可避免北支咸潮倒灌的影响; 上岸后的输水管与崇明岛原水复线共建, 增强了崇明岛原水的供水安全, 与现有长江口和黄浦江水源地的原水系统互联互通, 可实现上海原水系统“双源供水、一网调度”的目标。

关键词: 咸潮入侵; 供水工程; 原水系统; 水源地; 长江口; 白茆沙

中图分类号: TV85; TV148

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)01-0025-08

Optimization of water source distribution and feasibility analysis of Baimaoshan Reservoir construction under influences of saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary//JI Yongxing^{1,2,3}, LI Lu^{1,2}, GAO Chenchen^{1,3}
(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China; 2. Shanghai Engineering Research Center on Coastal Zone, Shanghai 200232, China; 3. Engineering Research Center on Flood Control and Disaster Reduction of Shanghai Water Authority, Shanghai 200232, China)

Abstract: In order to improve the amount and quality of raw water supply in Shanghai in the future, and cope with the risk of sudden saltwater intrusion and water pollution, the necessity of water source layout optimization in the Yangtze Estuary is demonstrated based on the analysis of the current situation of water sources in the Yangtze Estuary and the situation of saltwater intrusion. In combination with saltwater intrusion monitoring data and inversion results, the scheme of building a new reservoir in Baimaoshan and the optimal operation scheme of the raw water system are proposed, and impacts of the reservoir construction on river regime change, flood discharge, navigation, fishery resources, and ecological environment are discussed. The results show that building a new reservoir in Baimaoshan is a relatively feasible scheme to optimize water source layout in the Yangtze River Estuary in Shanghai, which can also increase the water supply scale and move the water intake upstream. Located inside the Baimaoshan Regulation Project, the safety and stability of the dike of the Baimaoshan Reservoir to be constructed can be ensured, and the construction of the Baimaoshan Reservoir will not affect flood discharge and navigation, and has little impact on river regime change, fishery resources, and ecological environment. The water intake arranged in the slightly curved channel on the south side of the reservoir can avoid the impact of sedimentation on the water intake and the impact of saltwater intrusion from the North Branch. After the water delivery pipe reaches Chongming Island, it will be built with the raw water double line there, which can enhance the water supply safety of Chongming Island, and also interconnect with the raw water systems of the existing water sources in the Yangtze River Estuary and the Huangpu River, realizing the goal of “dual source water supply and one network dispatching” of Shanghai raw water system.

Key words: saltwater intrusion; water supply works; raw water system; water source; Yangtze River Estuary; Baimaoshan

咸潮入侵严重影响了世界各国沿海城市居民的生产生活。美国、墨西哥和加拿大等北美地区因咸潮入侵影响关闭了许多地下水供应井^[1],北非沿海含水层地下水盐度增加和海水入侵导致淡水资源危机^[2],印度东海岸也在采取措施避免咸潮对地下水供应产生影响^[3]。我国沿海城市的淡水资源供应和饮用水水质也遭受咸潮入侵影响,尤其对长江口、珠江口和钱塘江口等地区的影响较为严重^[4]。珠江口枯水期咸潮持续时间增加,咸潮界不断上移,导致位于珠江口的许多取水口上移^[4-5],研究人员提出了“上补-中蓄-下阻”的综合防控技术体系^[6]。上海为保障经济社会发展用水,在长江口建设了陈行、青草沙和东风西沙等多座“避咸蓄淡”水库,缓解了水质型缺水城市的原水水量和水质供需矛盾^[7]。然而,近年受上游来流、海平面上升和风暴潮增水等影响,位于长江口的水库遭受咸潮上溯影响的风险加大。2014年2月,长江口出现了较严重的咸潮,影响了长江口水源地水库取水^[8-9]。2022年7月,长江流域发生了1961年以来最严重的气象干旱,出现罕见的汛期反枯、盛夏枯水,上游来水持续减少,导致长江口水源地持续遭遇咸潮入侵影响^[10]。青草沙水库取水口自2022年9月5日起氯化物浓度超标,直至12月11日咸潮预警解除,水库连续不宜取水时间达98d,超过原设计连续不宜取水时间68d的工况^[11],导致青草沙水库持续无水可用。在此期间,上海市采取内河取水应急补充,并请求长江三峡水库突击放水“补淡压咸”,才勉强度过咸潮入侵影响期。经历多次严重的咸水上溯影响后,上海市政府提出研究新的原水水源和优化长江水源地布局的可行性,以提升应对特殊和连续枯水年、咸潮上溯及其他各类供水风险事件的能力,支撑经济社会高质量发展。为此,本文在分析长江口水源现状和咸水入侵形势的基础上,论证长江口水源地优化布局的必要性,并结合2022年咸水入侵期氯化物监测数据及反演成果,提出长江口水源地优化布局的可行性方案,对白茆沙水库建设布局和相关影响进行了初步研究,以供相关部门决策参考。

1 长江口水源地现状及咸潮入侵形势

1.1 长江口水源地现状

长江口水源地主要为上海提供原水水源。上海地处长江和太湖下游,三面环水,过境水资源丰富,但本地水资源受上游流域来水和下游近海咸潮影响,属典型的水质型缺水城市^[12]。为保障城市生产生活用水,经过多年规划建设,在长江口已建成投运陈行、青草沙、东风西沙水库,并在黄浦江上游建成

金泽水库,形成了“两江并举、集中取水、水库供水、一网调度”原水供水格局^[13]。

位于长江口的陈行、青草沙和东风西沙3座水库保障了上海约3/4人口的供水安全。陈行水库建于20世纪90年代,位于上海市宝山区罗泾陈行镇长江岸段,地处长江口南支下段南岸,是上海市利用长江水源建造的第一座避咸蓄淡水库,水库总面积1.35 km²,设计有效库容为830万m³,2008年经加固增能,达到960万m³,主要向嘉定、宝山供应原水,供水规模为150万m³/d^[14-15]。青草沙水库于2011年6月建成供水,位于长江口南支下段南北港分流口水域,由长兴岛西侧和北侧的中央沙、青草沙以及北小泓、东北小泓等水域组成,是上海境内供水规模最大、工程投资最大、受益人口最多的水库,水库总面积66.15 km²,设计有效库容为4.38亿m³,死库容为0.89亿m³,设计总库容为5.27亿m³,主要向上海中心城区、浦东新区以及长兴岛、横沙岛供应原水,供水规模为719万m³/d^[7,11]。东风西沙水库于2014年1月建成供水,位于长江口南支上段北侧、崇明岛西南部,处于东风西沙与崇明岛之间的夹泓地带,水库总面积约3.74 km²,总库容约976万m³,有效库容为890万m³,主要向崇明岛供应原水,供水规模为40万m³/d^[16]。

1.2 长江口咸潮入侵形势

潮汐河口普遍存在高盐水随潮汐向上输移,并与上游下泄淡水混合,造成咸潮入侵现象。相关研究表明,咸潮入侵程度主要与上游来水量、潮汐动力、海平面变化、河势变化、土地利用、风暴潮等因素密切相关^[17-20]。长江口径流量较大,洪、枯季变化明显,每年5—10月径流量较大,11月至次年4月径流量较小。冬季枯水期,特别是天文大潮期,上游大通水文站流量小于18 000 m³/s时,咸潮上溯将影响工农业生产和人们生活用水^[20-21]。受河口形态影响,长江口水源地的咸潮入侵影响包括两个方面:①在径流量较小情况下,南支咸水随涨潮流上溯,影响水源地;②北支咸水随涨潮流上溯倒灌南支,进而影响水源地^[22]。有学者研究得出,枯季通过水资源调度,加大三峡水库下泄,增加径流量,可改善咸水上溯^[23]。监测资料显示,我国沿海海平面平均每年升高约3.3 mm,其累积升高加剧了长江口咸潮入侵强度^[20,24]。此外,许多学者从河势变化、潮汐动力和咸水入侵角度等方面,系统分析了长江口20世纪60年代以来的咸潮入侵规律^[25-27]及其对长江口水源地的影响^[28]。河势变化包括上下游水情变化导致的泥沙冲淤变化以及航道整治、滩涂治理、围垦造地、港口码头建设等人类活动导致的河势演变。研

究表明,拦门沙对咸水上溯具有较好的拦阻作用,但是深水航道开通降低了拦门沙底槛高程,会造成底层含盐浓度高的咸水加速上溯^[5,25],此外,上游河道的下切会增加咸水上溯的可能性^[29]。三峡水库蓄水会导致河道含沙量骤减,进而造成中下游河道深槽下切^[30],南京以下12.5m深水航道整治也会导致河道深槽加深^[31]。这些河势变化对咸水上溯影响不容忽视。

统计资料显示,2010—2020年青草沙水库上游泵闸受到咸潮影响共16次,下游水闸受到咸潮影响共41次^[21],其中2014年2月春节期间连续20多天无法取水。2022年夏季长江口受到长江流域1961年以来最严重的气象干旱影响,出现了罕见的汛期反枯、盛夏枯水现象,导致特别严重的咸潮入侵。根据长江口水文水资源勘测局咸潮期监测数据,2022年8月与9月大通水文站月平均流量分别为20951、11614 m³/s,低于2010—2021年同期的月平均流量(43476、33866 m³/s);最小流量分别为13900、7340 m³/s,低于2010—2021年同期的最小流量(36842、29650 m³/s),也是历史最低流量。2022年9月1日,大通水文站流量为14700 m³/s,仅为2010—2021年同期平均值的38.3%(图1)。受上游来水持续减少和“梅花”台风风暴潮的双重影响,长江口咸潮上溯加剧。经多部门协调,三峡等水库于10月2—11日开展抗咸潮应急补水调度,增加向下游补水量超41.53亿m³,日均下泄流量超12000 m³/s的时间持续了8d(图2)。监测显示,三峡水库新增下泄流量10月8日开始影响大通水文站流量,10月16日开始影响长江口水源地氯化物浓度。长江口南支青草沙水库以上河段的氯化物质量浓度降至250 mg/L以下(图3(a));南北港氯化物质量浓度有所下降,但仍超250 mg/L(图3(b));长江口北支灵甸港站氯化物浓度有所下降,连兴港站基本不变。10月22日以后,南北支的氯化物浓度开始回升,受潮汐影响,其规律性较强。直至12月12日,咸潮对长江口青草沙水源地的影响结束,总

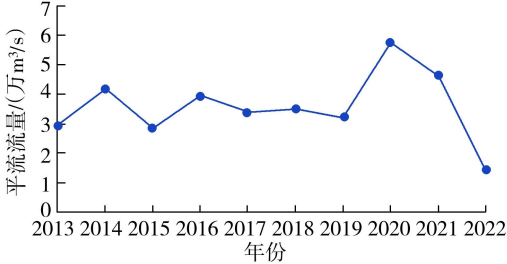


图1 2013—2022年大通水文站9月1日平均流量
Fig.1 Average water discharge on September 1 during 2013-2022 at Datong Hydrological Station

计历时98d。其间,对陈行水库累计影响约49d,对东风西沙水库累计影响约62d。

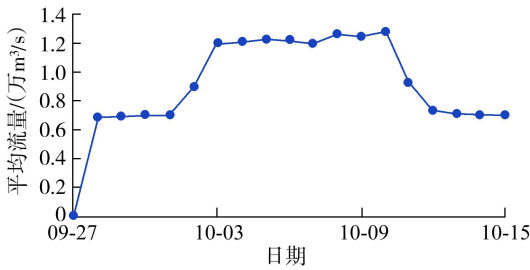


图2 2022年咸潮入侵期三峡水库应急补水过程
Fig.2 Process of emergency water replenishment from Three Gorges Reservoir during saltwater intrusion in 2022

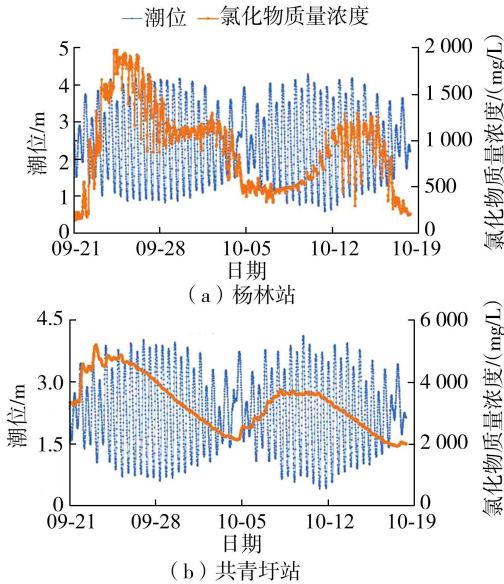


图3 2022年咸潮影响期长江口南支潮位与氯化物质量浓度过程
Fig.3 Tidal level and chloride mass concentration in South Branch in the Yangtze Estuary during saltwater intrusion in 2022

2 长江口水源地布局优化必要性及思路

2.1 长江口水源地布局优化必要性

为解决上海饮用水水源突发水污染^[32]、氮磷超标、藻类暴发、单库规模不足、单管供水安全性不足等问题,经研究提出了原水系统互联互通方案^[13],实现互济互补,并拟在“十四五”期间启动建设。然而,2022年汛期长江口咸潮入侵事件暴露了上海原水系统的更多风险,包括:现有水源地布局合理性、现有水源水量和连续取水可靠性、现有水库规模适应性、已研究原水系统互联互通方案合理性等方面的问题。因此,上海市政府提出研究上海新的原水水源和优化长江水源地布局的可能性,以提升应对特殊和连续枯水年、咸潮上溯及其他各类供水风险事件的能力。

提升上海供水保障能力的主要思路是开发新水源、上移取水口、布局再优化、多源可互补。在新水源开发方面,可利用皖南已建和拟建水库多余水量,通过明渠、隧洞、管道等长距离输送至上海西部金泽水库;或可利用千岛湖及周边水库多余水量,通过管、渠长距离输送至金泽水库;或可在东太湖设置取水口,利用管道输水至金泽水库。在取水口上移方面,可将取水口上移至徐六泾上游,再沿国道 G346 或长江堤防设置原水管道输水至陈行水库;或利用“引江济太”工程从长江常熟段以上取水,再经太湖净化,由太浦河或新设原水管输送至金泽水库^[33]。在水源地布局方面,重点优化长江口水源地布局,或新增长江口水库,或扩容现有水库,或上移现有水库取水口,或实现现有水库互联互通。

经水资源调查、取水口布置、输水线路选择和技术论证,初步研究结果表明,从皖南已建和拟建水库引水,或从千岛湖及周边水库引水,工程线路长、工程建设复杂、工程投资巨大(工程费用约 600 亿元或 480 亿元),且在建设线路、生态补偿、水权交易等方面省市间协调难度较大;长江口水源取水口上移至徐六泾以上,同样工程线路长、工程建设复杂、工程投资巨大(工程费用约 150 亿元),且在建设线路、道路港口交叉等方面省市间协调难度较大;由“引江济太”工程从长江常熟段以上取水,再由东太湖经太浦河流至金泽水库(工程投资约 200 亿元),这是目前黄浦江上游金泽水库现有的取水模式,只需协调太湖流域水资源调度和金泽水库扩容,近期实现的可能性较大;直接在东太湖设取水口,再由原水管道输水至金泽水库,可满足管道供水相对较安全的需要;在长江口新增水库,或上移现有水库取水口,或实现现有水库互联互通,优化长江口水源地布局,在上海境内提升原水保障能力,总体思路较可行。

综上,近期较可行的方案是优化长江口水源地布局和对黄浦江上游水源地扩容。由于金泽水库目前主要解决上海西南地区(青浦、松江、金山、闵行和奉贤 5 个区)原水供应,供水规模仅为 $351\text{万 m}^3/\text{d}$ ^[34],即使金泽水库扩容和原水系统互联互通,黄浦江上游供水规模仍难满足长江口 98 d 咸潮影响期全上海的原水供应。因此,优化长江口水源地布局,减轻咸潮入侵影响,增加水库供水规模,是一项非常必要的措施。

2.2 长江口水源地布局优化思路

2022 年夏季咸潮,一方面使青草沙水库最长不宜取水时间由 68 d 延长至 98 d,对水库供水有效库容提出了新要求;另一方面使长江口水源地的咸潮影响由北支倒灌因素为主变为北支咸潮倒灌与南支

咸潮上溯共同作用。所以,长江口水源地不仅需要新增水库或扩容现有水库,满足长历时咸潮影响期供水需求,还需要上移取水口位置,尽量减少咸潮上溯的影响,同时实施水库群互联互通,最小程度影响取水口,达到水库群共同协调蓄水,保障供水安全。

由于外海潮汐动力、上游径流和科氏力的影响,长江口北支长期受咸潮影响,合适的水源地主要分布于南支上游段(图 4)。为增加水源地有效库容,可通过对现有水库边滩进行疏浚,扩大调蓄库容,也可以新建水库。而通过疏浚挖潜现有水库,新增的调蓄库容较有限,因此,新建水库是解决远期供水规模难题的适宜方案。根据长江口南支上游段的河势、航道、周边工程现状及可能产生的影响,新建水库的位置主要有白茆沙和下扁担沙(图 4)。

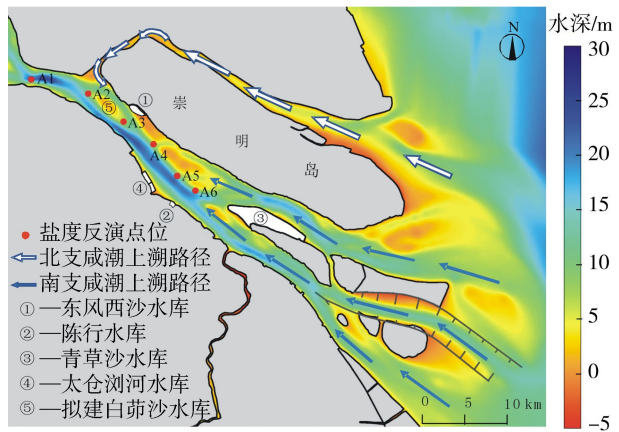


图 4 长江口咸潮入侵形势及南支水源地分布

Fig. 4 Saltwater intrusion and main water source area distribution in South Branch in the Yangtze River Estuary

根据长江口水质模型反演的 2014 年 2 月和 2022 年夏秋季氯化物质量浓度(图 5),长江口南支上段自南北支分流口至青草沙水库,受咸潮影响的程度和影响因素差异性较大。拟建的白茆沙水库位于南北支分流口,氯化物主要来自北支倒灌的咸潮,2014 年 2 月和 2022 年夏秋季每月最长不宜取水时间小于 7 d(表 1)。扁担沙分上扁担沙和下扁担沙,两者位置虽较青草沙水库更接近上游,但与陈行水库位置相近,不仅受到北支外海咸潮倒灌影响,也受到南支咸潮上溯的影响,尤其下扁担沙位置在特殊年份与青草沙水库接近,几乎整月无法取水。若在下扁担沙位置新建水库,除增加调蓄库容外,对取水时间的影响效果不明显。因此,从最长不宜取水时间的影响方面看,在白茆沙位置新建水库优势更明显。

3 白茆沙水库方案及可行性分析

3.1 白茆沙及周边水域情况

白茆沙位于长江口南北支分流口下游的南支

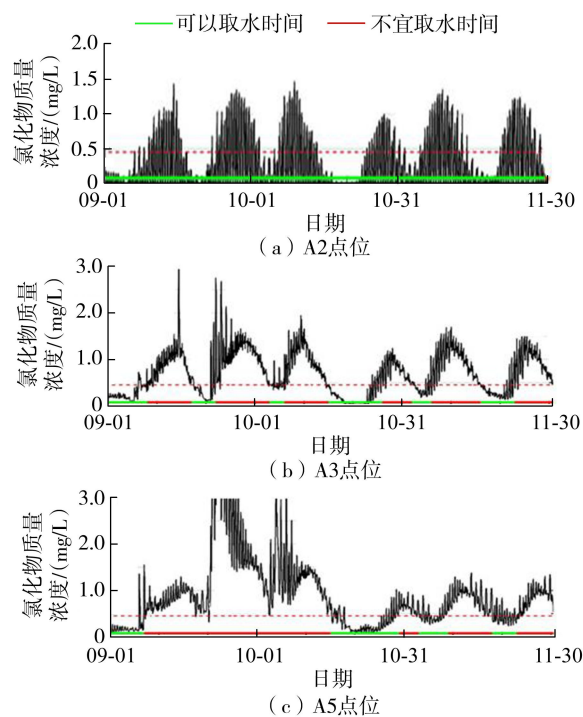


图 5 2022 年咸潮期长江口南支上段氯化物质量浓度反演过程

Fig.5 Inversion results of chloride mass concentration during saltwater intrusion in 2022 in upper South Branch of the Yangtze River Estuary

表 1 长江口水源地区域最长不宜取水时间反演结果
单位:d

Table 1 Inversion results of longest unfavorable water intake duration in water source area in the Yangtze River Estuary unit: d

位置	2014 年	2022 年			
	2 月	8 月	9 月	10 月	11 月
A2	5.38	0.00	5.65	5.68	6.25
A3	15.82	0.00	15.89	16.81	18.78
A4	24.08	0.18	22.68	22.23	26.99
A5	20.78	0.00	22.26	19.73	21.88
A6	23.17	0.08	23.28	21.23	25.10
青草沙	26.41	1.22	24.53	27.99	30.00

注:以氯化物质量浓度超过 250 mg/L 作为不宜取水控制标准。
主槽头部。白茆沙的发育与长江主流进入南北支分流口后水面突然变阔、流速减小关系密切。白茆沙最初形成于 20 世纪 50 年代,由规模较小的暗沙逐渐演变为低潮出水的江心沙。根据相关文献^[35-37]分析,1997 年以前白茆沙及其南、北水道组成的滩槽系统未发生较大的变化;1997 年以后沙体由细长型逐步演变为椭圆形,沙体尾部由于冲刷而后退。2014 年以后,随着白茆沙整治工程的实施,其头部出现淤涨并向上游延伸,沙体两侧受南、北大堤固定,冲刷受到遏制,沙体尾部则持续冲刷。近年观测发现,在整治工程的护沙堤保护区内,沙体呈现四周高、中部洼陷的马蹄形。近护沙堤边缘出现淤涨,局部高程超过 2.0 m,并长出海三棱蔗草和芦苇。

白茆沙南、北水道的分流格局随徐六泾两侧岸线整治及沙体冲淤变化而变化。沙体淤涨扩大早期,北水道的分流占主导;徐六泾两侧岸线整治及沙体淤涨扩大后,南水道主槽逐渐刷深,分流逐渐加大。20 世纪末,南水道落潮分流比超过北水道,2002 年达到 57.2%,2012 年达到 72.2%^[37]。白茆沙整治工程实施以后,南水道落潮分流比基本维持在 70% 以上。在南水道主槽刷深的同时,主槽深泓线也有所南移,南侧太仓岸线的稳定受到威胁。

2014 年实施的白茆沙整治工程包括护沙堤、潜堤和丁坝(图 6)。护沙堤分为南堤和北堤,分别长约 8562 m 和 4888 m。其中,白茆沙头部南堤 4562 m 和北堤 3238 m 处顶高程为 1.0 m,其余尾部为潜堤,堤顶顺应滩势,堤高为 2.0 m。白茆沙头部向上游延伸设置潜堤,总长为 3500 m,顶高程为 -7.0 ~ 1.0 m。南堤的南侧布置 3 道丁坝,长度分别为 1300、1600 和 800 m,丁坝坝根顶高程与南堤顶齐平,坝头高度为 2.0 m;北堤的北侧布置 4 道丁坝,长度均为 100 m,坝体高度约为 2.0 ~ 3.0 m。



图 6 白茆沙水库布置及其与整治工程关系

Fig.6 Layout of Baimaoshan Reservoir and its relationship with regulation works

3.2 水库及取输水设施布置

白茆沙整治工实施后,可以利用白茆沙的护沙堤作为水库围堤的保滩工程,水库围堤位于护沙堤内侧,顺应护沙堤走向布置,水库围堤与护沙堤距离控制在 100 m 左右。考虑到南侧护沙堤尾部已经超出上海与江苏的分界线,水库围堤在此顺势转向北侧,与北侧围堤成平顺圆弧连接(图 6)。初步布置后,水库面积约 10 km²,围堤总长约 12 km。参考青草沙水库的特征水位,拟定咸潮期白茆沙水库的最高蓄水位为 7.00 m,死水位为 -1.50 m,水库可调蓄库容超过 8000 万 m³。

考虑到水库所在位置仍然在大潮高潮期短时受北支咸潮倒灌影响,取水口选择位于水库头部的南侧。一方面,北支咸潮由于水库围堤和整治工程的头部潜堤阻隔,高盐度水基本由北水道随南支落潮

流下泄,取水口位于头部南侧可以减轻北支咸潮倒灌影响;另一方面,取水口位于南水道弯段,可以避免淤积对取水口的影响。取水设施采用泵闸结合方式,长江口水位高于水库内水位时采用水闸自引,长江口水位低于水库内水位时采用泵闸抽引。考虑水库蓄水和盐峰之间抢补淡水需求,初步拟定取水水闸净宽 40 m,取水泵站规模为 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 。

输水泵站选址于白茆沙水库与崇明岛距离最近的东北侧,采用过江管穿越白茆沙北水道(图 6)。考虑特殊咸潮期补充青草沙水库和陈行水库供水缺口合计约 424 万 m^3/d ,或替代黄浦江水源金泽水库供水 306 万 m^3/d ,输水泵站规模初拟为 500 万 m^3/d 。考虑水库换水需求,在水库东北侧尾部设置排水闸,闸孔净宽 30 m。

3.3 原水系统及运行调度优化

白茆沙水库输水管穿越北水道上岸以后,可在崇明岛海塘内侧护堤地内沿海塘向东敷设,与东风西沙水库输水管衔接后,作为崇明岛原水管复线向东,直至与青草沙头部距离最近位置,采用过江管与青草沙水库连通(图 7)。输水管规模根据白茆沙水库供水需求和崇明岛原水复线规模较大值确定。根据《上海市供水规划(2019—2035 年)》,未来将新建青草沙水库与陈行水库原水系统的连通管,并规划于“十四五”期间开工建设原水西环线工程,将长江水源地输水系统与黄浦江上游水源地输水系统连通,实现青草沙水库、陈行水库、金泽水库三者互联互通^[3]。白茆沙输水系统建成后,再将白茆沙水库、东风西沙水库、青草沙水库三者互联互通,并以青草沙水库作为中枢系统,与陈行水库、金泽水库实现互联互通。基于此,上海的原水系统可以实现“双源供水、一网调度”的目标,在黄浦江上游或长江口出现水污染事件,或长江口遭遇咸潮入侵时,实现及时切换互补。

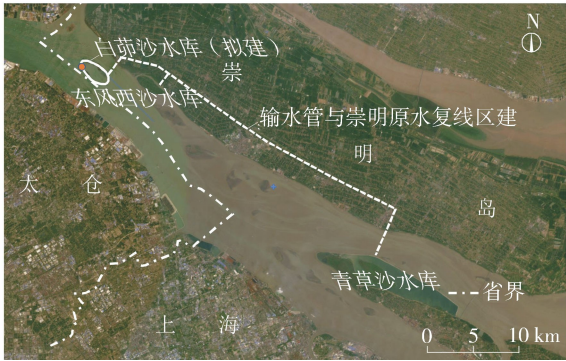


图 7 白茆沙水库与东风西沙水库、青草沙水库互通方案
Fig.7 Interconnection scheme between Baimaoshan Reservoir, Dongfeng Xisha Reservoir, and Qingcaosha Reservoir

3.4 白茆沙水库优势分析

为应对黄浦江上游水源地突发水质污染、长江口水源地咸潮影响和突发水质污染等风险,基于《上海市供水规划(2019—2035 年)》的实施,在上海境外寻求解决方案(包括长江口北支建闸挡咸)难度较大,而在上海境内实施长江口水源地优化布局可行性强。

上海境内长江口水源地主要集中于长江口南支的上段,水源地优化布局主要包括青草沙水库挖潜,陈行腹背水库建设,新建白茆沙水库、上扁担沙水库或下扁担沙水库,上移取水口至扁担沙、东风西沙或白茆沙。最优的方案应既能新增长江口水源地的供水规模,又能上移取水口,避免咸潮影响。下扁担沙距青草沙水库、陈行水库较近,同样会受到浏河水污染和咸潮影响;上扁担沙位于东风西沙水库和白茆沙下游,优势也不明显;利用东风西沙水库取水口,在崇明岛布设输水管至青草沙水库,同样不能解决特殊年份供水规模需求。在白茆沙新建水库,可新增供水规模,取水口位置优于其他取水口位置,可解决上海境内“防咸保供”难题。

白茆沙建库出水可减轻北支高盐度咸水和污染水体进入白茆沙南水道,确保水库南侧取水口周围的优良水质;南水道微弯的河势可避免淤积对取水口的影响;水库围堤建于现有整治工程内侧,有利于围堤安全稳定;沿整治工程淤涨的四周滩面为水库围堤布置及施工创造了有利条件,沙体中部洼陷的马蹄形滩面为水库提供了天然的库容;上岸后的输水管与崇明岛原水复线共建,可增强崇明岛原水的供水安全;新建水库与东风西沙水库、青草沙水库互连,并与其他原水系统互联互通,可真正实现上海原水系统“双源供水、一网调度”的目标。

3.5 水库建设相关影响分析

长江口整体水动力模型计算结果表明,大、中、小潮期间,建库前后的涨落潮量几乎没有变化,南北水道的分流比仅相差 0.2%~0.4%(表 2),因此,建库对行洪和河势几乎没有影响。由于北支进口的新江心沙近年发育较快,对北支分流、涨落潮流向和白茆沙北水道造成影响,应密切关注其变化。水库建设于白茆沙整治工程内侧已经淤涨的滩面上,且水库大堤在大、中、小潮期间均高出水位,较建库前的滩面更利于通航。根据农业农村部规定,省市分界以上水域为长江刀鲚国家级水产种质资源保护区,但水库建于白茆沙整治工程内侧高滩,因此,对渔业资源影响非常有限。在生态环境方面,水库占用了白茆沙的潮间带,将减少局部湿地资源,但相较

于解决上海超大城市的饮用水安全问题,此影响在可接受范围之内。

表 2 白茆沙水库工程前后涨落潮量及南北水道分流比变化
Table 2 Changes of fluctuation tide and diversion ratio of north and south waterways before and after Baimaosh Reservoir Project

潮型	时段	断面	潮量/亿 m ³		分流比/%	
			工程前	工程后	工程前	工程后
大潮	涨潮	北水道	3.06	3.08	33.9	34.3
		南水道	5.97	5.90	66.1	65.7
	落潮	北水道	10.23	10.28	24.0	24.2
		南水道	32.37	32.24	76.0	75.8
中潮	涨潮	北水道	1.11	1.10	72.4	72.8
		南水道	0.42	0.41	27.6	27.2
	落潮	北水道	9.03	9.12	21.7	22.0
		南水道	32.50	32.36	78.3	78.0
小潮	落潮	北水道	8.48	8.56	22.0	22.2
		南水道	30.14	30.02	78.0	77.8

4 结 语

在经历多次严重咸潮影响后,研究多源互补、智慧调度,提升远期上海原水水量和水质供应能力和应对突发咸潮入侵、突发水污染风险非常必要,需对上海境内长江口水源地进行优化布局,最可行的方案是在白茆沙新建水库,新增供水规模并上移取水口。拟建的白茆沙水库位于白茆沙整治工程内侧淤涨的滩面上,可利用整治工程保障围堤安全稳定;布置于水库南侧微弯水道处的取水口,既可避免淤积对取水口的影响,也可减缓北支倒灌的影响;上岸后的输水管与崇明岛原水复线共建,可增强崇明岛原水的供水安全;新建水库与东风西沙水库、青草沙水库互连,再与其他原水系统互联互通,可真正实现上海原水系统“双源供水、一网调度”的目标。未来,若再新建陈行水库与江苏太仓浏河水库等水库间的连通管,则可以与江苏长江口边滩水库实现互联互通,提高共同应对长江口咸潮入侵风险的能力。

致谢:本文采用了华东师范大学朱建荣教授提供的咸潮入侵反演成果,在此表示感谢。

参考文献:

[1] BARLOW P M, REICHARD E G. Saltwater intrusion in coastal regions of North America [J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18 (1): 247-260.

[2] AGOUBI B. A review: saltwater intrusion in North Africa’s coastal areas-current state and future challenges [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28 (14): 17029-17043.

[3] VIJAY R, MOHAPATRA P K. Hydrodynamic assessment of coastal aquifer against saltwater intrusion for city water

supply of Puri, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75 (7): 588.

[4] 李文善,左常圣,王慧等. 中国主要入海河口咸潮入侵变化特征 [J]. 海洋通报, 2019, 38 (6): 650-655. (LI Wenshan, ZUO Changsheng, WANG Hui, et al. Salt tide intrusion characteristics in main estuaries of China [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38 (6): 650-655. (in Chinese))

[5] YUAN Rui, ZHU Jianrong. The effects of dredging on tidal range and saltwater intrusion in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31 (6): 1357-1362.

[6] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体系研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 32-41. (YANG Fang, CHEN Wenlong, LU Chen, et al. Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 32-41. (in Chinese))

[7] JI Yongxing, LU Yongjin, LIU Xiaomei. Emergency preparedness plan (EPP) study of the water source reservoir in the tidal estuary [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2012, 16 (Sup 2): 82-90.

[8] 毛兴华. 2014 年长江口咸潮入侵分析及对策 [J]. 水文, 2016, 36 (2): 73-77. (MAO Xinghua. Analysis of saltwater intrusion in Yangtze River Estuary in 2014 [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36 (2): 73-77. (in Chinese))

[9] ZHU Jianrong, CHENG Xinyue, LI Linjiang, et al. Dynamic mechanism of an extremely severe saltwater intrusion in the Changjiang estuary in February 2014 [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (10): 5043-5056.

[10] 邹旭恺,高荣,陈鲜艳,等. 2022 年长江流域夏伏旱监测评估 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32 (10): 12-16. (ZOU Xukai, GAO Rong, CHEN Xianyan, et al. Monitoring and assessment of summer drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32 (10): 12-16. (in Chinese))

[11] 刘小梅,王晓鹏,关许为,等. 青草沙避咸蓄淡水库库容与特征水位研究 [J]. 水利水电技术, 2009, 40 (7): 5-8. (LIU Xiaomei, WANG Xiaopeng, GUANG Xuwei, et al. Study on storage capacity and characteristic water lever for Qingcaosha Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40 (7): 5-8. (in Chinese))

[12] 陈祖军,李珺,谭显英. 上海城市水资源发展战略研究 [J]. 中国给水排水, 2018, 34 (2): 24-30. (CHEN Zujun, LI Jun, TAN Xianying. Study on development strategy of urban water resources in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (2): 24-30. (in Chinese))

[13] 张芹藻,王如琦,陈奕. 超大型城市饮用水多水源连通

- 方案研究[J]. 给水排水, 2021, 47(2): 4-9. (ZHANG Qinzao, WANG Ruqi, CHEN Yi. Study on connection strategy for drinking water sources in mega city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(2): 4-9. (in Chinese))
- [14] 刘登国, 卢士强, 林卫青. 陈行水库水质模型与自净规律研究[J]. 水资源保护, 2005, 21(2): 40-45. (LIU Dengguo, LU Shiqiang, LIN Weiqing. Study on water quality model and self-purification of Chenhang Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(2): 40-45. (in Chinese))
- [15] 钱真, 孔令婷, 谭箐. 陈行水库取水口水质对浏河排水的响应[J]. 人民长江, 2020, 51(增刊1): 41-46. (QIAN Zhen, KONG Lingting, TAN Qing. Water quality response of Chenhang Reservoir intake to Liuhe River drainage[J]. Yangtze River, 2020, 51(Sup 1): 41-46. (in Chinese))
- [16] 常进, 管桐. 东风西沙水库突发性溢油事故风险等级判定[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 172-175. (CHANG Jin, GUAN Tong. Risk level discrimination of sudden oil spill in Dongfengxisha Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 172-175. (in Chinese))
- [17] GONG Wenping, LIN Zhongyuan, ZHANG Heng, et al. The response of salt intrusion to changes in river discharge, tidal range, and winds, based on wavelet analysis in the Modaomen Estuary, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 219: 106060.
- [18] RACHID G, ALAMEDDINE I, EL-FADEL M. Management of saltwater intrusion in data-scarce coastal aquifers: impacts of seasonality, water deficit, and land use[J]. Water Resources Management, 2021, 35(15): 5139-5153.
- [19] MEHDIZADEH S S, KARAMALIPOUR S E, ASODEH R. Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers (simulation using dispersive and sharp-interface approaches)[J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 138: 11-18.
- [20] 李文善, 王慧, 左常圣, 等. 长江口咸潮入侵变化特征及成因分析[J]. 海洋学报, 2020, 42(7): 32-40. (LI Wenshan, WANG Hui, ZUO Changsheng, et al. The variation characteristics and causes analysis of salt tide intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(7): 32-40. (in Chinese))
- [21] 朱宜平. 长江口青草沙水域外海正面盐水入侵特点分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021(2): 21-29. (ZHU Yiping. Analysis of the characteristics of the Qingcaosha Reservoir direct saltwater intrusion from the open sea in the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2021(2): 21-29.
- [22] XU Kun, ZHU Jianrong, GU Yuliang. Impact of the eastern water diversion from the south to the north project on the saltwater intrusion in the Changjiang Estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(3): 47-58.
- [23] QIU Cheng, ZHU Jianrong. Influence of seasonal runoff regulation by the Three Gorges Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2013, 71: 16-26.
- [24] CHEN Wei, CHEN Kuo, KUANG Cuiping, et al. Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary, China[J]. Applied Ocean Research, 2016, 54: 12-25.
- [25] 朱建荣, 鲍道阳. 近 60 年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响: I. 河势变化[J]. 海洋学报, 2016, 38(12): 11-22. (ZHU Jianrong, BAO Daoyang. The effects of river regime changes in the Changjiang Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years: I. river regime changes[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(12): 11-22. (in Chinese))
- [26] 鲍道阳, 朱建荣. 近 60 年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响: II. 水动力[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 1-15. (BAO Daoyang, ZHU Jianrong. The effects of river regime changes in the Changjiang Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years: II. hydrodynamics[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 1-15. (in Chinese))
- [27] 鲍道阳, 朱建荣. 近 60 年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响: III. 盐水入侵[J]. 海洋学报, 2017, 39(4): 1-15. (BAO Daoyang, ZHU Jianrong. The effects of river regime changes in the Changjiang Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years: III. saltwater intrusion[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(4): 1-15. (in Chinese))
- [28] DING Zhangliang, ZHU Jianrong, LYU Hanghang. Impacts of the Qingcaosha Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. Anthropocene Coasts, 2021, 4(1): 17-35.
- [29] 罗宪林, 季荣耀, 杨利兵. 珠江三角洲咸潮灾害主因分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 146-148. (LUO Xianlin, JI Rongyao, YANG Libing. Main cause analysis of saline water intrusion into Pearl River Delta[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 146-148. (in Chinese))
- [30] ZHENG S W, XU Y J, CHENG H Q, et al. Riverbed erosion of the final 565 kilometers of the Yangtze River (Changjiang) following construction of the Three Gorges Dam[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 11917.
- [31] YANG Yunping, ZHENG Jinhai, ZHANG Wei, et al. Quantitative relationship between channels and bars in a tidal reach of the lower Yangtze River: implications for river management[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(12): 1837-1851.

(下转第 43 页)

Corvallis,Oregon[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2018,61(3):430-450.

[85] 董楠楠,吴静,石鸿,等. 基于全生命周期成本-效益模型的屋顶绿化综合效益评估:以 Joy Garden 为例[J]. 中国园林,2019,35(12):52-57. (DONG Nannan, WU Jing, SHI Hong, et al. Comprehensive benefits evaluation of green roofs based on cost-benefit model of whole life cycle;a case study of Joy Garden[J]. Chinese Landscape Architecture,2019,35(12):52-57. (in Chinese))

[86] 杨丰潞,杨高升. 海绵城市背景下 LID 措施综合效益量化研究[J]. 资源与产业,2020,22(6):75-81. (YANG Fenglu, YANG Gangsheng. Quantitative study on comprehensive benefits of low influence development (LID) approaches in sponge cities [J]. Resources & Industries,2020,22(6):75-81. (in Chinese))

[87] 陆芸. 绿色屋顶的生态效益研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.

[88] 赵倩. 生物滞留系统对路面雨水氮素去除及 N₂O 与 CO₂排放特征研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[89] 殷楠. 人工湿地装置净化景观水体的水力特性及生态效应研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.

[90] TEEMUSK A, KULL A, KANAL A, et al. Environmental factors affecting greenhouse gas fluxes of green roofs in temperate zone [J]. Science of the Total Environment, 2019,694:133699.

[91] SHRESTHA P, HURLEY S E, ADAIR E C. Soil media CO₂ and N₂O fluxes dynamics from sand-based roadside bioretention systems[J]. Water,2018,10(2):185.

[92] WANG Huoqing, SUN Yuepeng, ZHANG Lixun, et al. Enhanced nitrogen removal and mitigation of nitrous oxide emission potential in a lab-scale rain garden with internal water storage[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021,42:102147.

[93] AUDET J, CARSTENSEN M V, HOFFMANN C C, et al. Greenhouse gas emissions from urban ponds in Denmark [J]. Inland Waters,2020,10(3):373-385.

[94] 郝晓地,孟祥挺,胡沅胜. 人工湿地温室气体释放、影响及其控制[J]. 中国给水排水,2016,32(22):39-47. (HAO Xiaodi, MENG Xiangting, HU Yuansheng. Emissions, influence and control of greenhouse gases in constructed wetlands [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(22):39-47. (in Chinese))

[95] KAVEHEI E, IRAM N, RASHTI M R, et al. Greenhouse gas emissions from stormwater bioretention basins [J]. Ecological Engineering,2021,159:106120.

[96] 贾一非. 海绵城市末端调蓄的雨水湿地设计研究:以西宁湟水河湿地公园为例[D]. 北京:北京林业大学,2020.

[97] 张璐. 表流人工湿地温室气体释放过程解析及调控策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.

[98] ENGSTRÖM R, HOWELLS M, MÖRTBERG U, et al. Multi-functionality of nature-based and other urban sustainability solutions: New York City study [J]. Land Degradation & Development,2018,29(10):3653-3662.

[99] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(4):1-9. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-27 编辑:施业)

(上接第 32 页)

[32] 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.

[33] HU Zhibing, YONG Pang, XU Ruichen, et al. Study on the proportion and flow path of Yangtze River water diversion into Taihu Lake[J]. Water Science & Technology: Water Supply,2022,22(2):1820-1834.

[34] 王磊之,胡庆芳,戴晶晶,等. 面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):61-68. (WANG Leizhi, HU Qingfang, DAI Jingjing, et al. Research on multi-objective joint operation of Taipu River oriented to water supply safety of Jinze Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 61-68. (in Chinese))

[35] 杜德军,王晓俊,成泽霖,等. 长江口白茆沙河段南强北弱格局变化特征研究[J]. 人民长江,2023,54(2):85-90. (DU Dejun, WANG Xiaojun, CHENG Zelin, et al. Study on pattern evolution of strong south and weak north in Baimao shoal reach of Yangtze River [J]. Yangtze River,2023,54(2):85-90. (in Chinese))

[36] 张朝阳,刘桂平,张志林. 典型洪水作用下长江口白茆沙水道演变特性[J]. 水运工程,2018(3):106-111. (ZHANG Chaoyang, LIU Guiping, ZHANG Zhilin. Evolution characteristics of Baimaoshan waterway at the Yangtze Estuary under actions of typical floods[J]. Port & Waterway Engineering,2018(3):106-111(in Chinese))

[37] 栾华龙,渠庚,柴朝晖,等. 长江口典型滩槽系统近期演变及河势控制对策探讨[J]. 人民长江,2022,53(1):7-12. (LUAN Hualong, QU Geng, CHAI Zhaohui, et al. Discussion on recent evolution of a typical channel-shoal system in Changjiang Estuary and measures for river regime control[J]. Yangtze River,2022,53(1):7-12. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-18 编辑:施业)