

后三峡工程时代长江口咸潮入侵发展新态势及 河口水源地应对策略研究

陈祖军¹, 孙晨刚²

(1. 上海勘测设计研究院有限公司; 2. 上海市供水调度监测中心)

摘要:系统分析了三峡工程运行前后长江入海径流、河口地形地貌、河口潮汐特征、海平面上升、河口台风生衍等影响长江口咸潮入侵的关键驱动因素变化,结合 2006 年、2011 年、2014 年和 2022 年 4 个典型咸潮入侵突出年份,重点分析了相关因素影响程度和效果,对比分析了 4 个典型年份上海市陈行、青草沙、东风西沙三大水库取水口咸潮影响差异与相关特征。结果表明:三大水库取水口咸潮影响呈现陈行水库从重灾核心到压力缓解、青草沙水库从投运适应到统筹应对、东风西沙水库从平稳起步到协同抗咸的演变特征;长江口咸潮入侵发展新态势呈现出驱动机制多元化、影响周期提前、应对能力系统化特征。针对长江口咸潮入侵发展新态势,提出了优化流域水库群联合调度、强化供水设施能力挖潜与技术支撑、加快河口战略新水源地研究与建设以及完善跨区域城乡供水协同或一体化建设的长江口水源地应对策略。

关键词:咸潮入侵;后三峡工程时代;长江口;河口水源地;上海市

中图分类号:P731.23

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2026)05-0175-11

Study on new development trends of saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary in post-Three Gorges Project era and response strategies for estuary water source area//Chen Zujun¹, Sun Chengang²(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd.; 2. Shanghai Municipal Monitoring Centre of Water Supply)

Abstract: A systematic analysis of the changes in key driving forces affecting saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary before and after the operation of the Three Gorges Project was conducted, including Yangtze River's runoff into the sea, estuarine topographic and geomorphic features, estuarine tidal characteristics, sea level rise, and the occurrence and propagation of typhoons in the estuary. Combined with four typical years of 2006, 2011, 2014, and 2022 with prominent saltwater intrusion, the study focused on analyzing the impact degree and effect of relevant factors. Then, a comparative analysis was performed on the differences in saltwater intrusion impacts and related characteristics at the water intakes of three major reservoirs (Chenhang, Qingcaosha, and Dongfeng Xisha) in Shanghai across the four typical years. The results show that the impacts of saltwater intrusion at the water intakes of the three major reservoirs exhibit the following evolutionary characteristics; Chenxing Reservoir has transitioned from being a severely affected core to a pressure-reducing state, Qingcaosha Reservoir has progressed from operational adaptation to coordinated regulation, and Dongfeng Xisha Reservoir has evolved from a stable initial operation to collaborative salinity resistance. The emerging trends in saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary are characterized by diversified driving mechanisms, earlier impact onset, and systematized response capabilities. In response to the new trends of saltwater intrusion development in the Yangtze River Estuary, countermeasures for urban water sources in the estuarine region were proposed, including optimizing the joint operation of basin reservoir groups, strengthening the potential tapping and technical support of water supply facilities, accelerating the research and construction of new strategic water sources in the estuary, and improving cross-regional urban-rural water supply coordination.

Key words: saltwater intrusion; post-Three Gorges Project era; the Yangtze River Estuary; estuary water source area; Shanghai City

长江口在我国长三角沿江地区承担着重要的水源地角色,尤其在上海,该河口水源地承担着市域大

部分地区近 1 500 万人口的供水保障任务^[1-2]。长江河口上承长江干流,下入东海,为典型的三级分

汉、四口入海河势^[3-4],长期受径潮流影响。咸潮入侵是枯水期最主要的水文灾害,其本质为河口区盐水与淡水动力平衡被打破后,高盐度水体上溯或倒灌导致河口水源地和水库取水口氯化物质量浓度超标(即超过 250 mg/L)^[5-7]。2003 年三峡工程蓄水运行后,长江干流径流时空分配格局发生显著变化,枯水期入海流量调控能力增强,加之全球气候变化形势下河口水文气象响应出现的新特征,形成了后三峡工程时代长江口咸潮入侵的新格局^[8-15]。

上海市长江口水源地三大水库(即陈行、青草沙、东风西沙水库)取水口均位于南支(含北港)近岸,枯水期易受北支咸潮倒灌及外海咸潮上溯或正面袭击南支(含南北港)的双重影响^[15-17]。长江口咸潮入侵是一个复杂的自然现象,受径流、潮汐、气象和海平面等多因素叠加驱动^[10-16]。已有研究多聚焦于河口北支咸潮倒灌和南支咸潮上溯^[16-17]、单一典型年或代表年咸潮特征^[9,18-21]、径潮流影响^[22-23]、局地气象风况及台风影响^[24-26]、气候变化或海平面上升影响^[22-23,27-28]、大型水利工程影响^[8,29]、单一水库咸潮入侵特征^[7,15,30]等,但对后三峡工程时代不同典型年咸潮驱动因素的对比分析不足,尤其缺乏对三大水库联动响应的系统研究。本文选取 2006 年(三峡首次蓄水后极端枯水年)、2011 年(中下游连旱年)、2014 年(三峡首次压咸调度年)、2022 年(百年一遇干旱与台风叠加年)4 个典型年份,采用多因素对比分析与态势演变归纳法,梳理 4 个典型年关键驱动因素差异,分析后三峡工程时代三大水库取水口咸潮响应特征,剖析长江口咸潮入侵发展的新态势,以期为其水源地安全保障战略发展提供技术支撑。

1 研究区概况

长江口位于华东地区沪苏交界水域,是中国最大的河口。长江河口为多级分汊,由崇明岛将其分为南支和北支,南支往下游又被长兴岛分为南港和北港,而南港于九段沙处再被分为南槽和北槽,最终形成“三级分汊、四口入海”的复杂格局^[3-4],且随着多年来长江口地区的河口治理与开发建设,河口还在不断演进变化中。上海市位于长江口地区,其作为中国经济中心,近年来常住人口已近 2 500 万人,

对淡水资源需求量巨大。长期以来,上海市受制于所处滨海地区特殊的濒江临海条件及陆域水系水质状况,其淡水资源情势为典型的水质型缺水^[7,9]。为满足城市持续发展和解决城市供水瓶颈的迫切需求,上海城市供水格局经历了从“黄浦江供水为主、长江供水为辅”向“长江和黄浦江上游并重”(即“两江并举、多源互补”)的重大转变,并在长江口形成陈行水库、青草沙水库、东风西沙水库“三足鼎立”的布局^[2,13](表 1),规划长江口水源地的原水供应将占上海全市原水供应总量的 70%以上。据上海市水务部门统计,至 2024 年,长江原水供水能力占比已达 73.7%,实际供水量则达 75.4%。

2 长江口咸潮入侵关键驱动因素发展态势

2.1 长江入海径流变化

2.1.1 长江下游至河口径流变化

在长江干流至河口段,徐六泾水文站是干流最下游的流量控制站;大通站通常作为研究河口入海径流量或入海流量的主要参考水文站^[7-16],如付桂^[31]利用大通站水文数据统计分析了 1950—2011 年径流量、来沙量等的变化,结果表明,长江流域多年来水量没有发生趋势性变化,仅 2003 年三峡水库发挥调蓄作用后,来水量年内分配呈现洪季径流量减少、枯季径流量增加的特征。此外,长江水利委员会水文局整编研究了后三峡工程时代 2005—2014 年徐六泾站与大通站径流量的变化特征及其相关关系^[32],结果表明:①徐六泾站历年年均涨潮量为 4 158 亿 m³,年均落潮量为 12 732 亿 m³,年落潮量是涨潮量的 3 倍,年净泄潮量(即年均径流量)为 8 574 亿 m³;②徐六泾站历年涨落潮潮量、净泄潮量、涨落潮流量、涨落潮历时年内分配不均,且汛枯季分配不均;③徐六泾站年径流量约占大通站的 97.2%,且两站变化趋势一致。唐建华等^[33]为掌握长江的实际入海流量,基于大通站和徐六泾站 2008 年全年流量资料,初步分析了两站流量间的关系,结果表明,两站日流量过程基本一致,但徐六泾站日流量过程较大通站滞后 4~6 d,且徐六泾站全年流量略大于大通站;大通站流量基本可代表长江的入海流量,这一结论与文献[32]的研究成果一致。朱博渊等^[34]针对河流入海水沙通量变化问题,

表 1 上海市长江口三大水源地(水库)基本信息

水库名称	所在区位	建成年份	总库容/万 m ³	服务范围
陈行水库	南支下段近宝钢水库	1992 年(初建)/2008 年(扩建)	830(1992 年)/950(2008 年)	宝山、嘉定等区域
青草沙水库	长兴岛西北侧	2010 年	52 700	上海主城核心区域
东风西沙水库	崇明岛西南角	2014 年	976	崇明岛区域(含江苏部分区域)

基于 1950—2017 年长江大通站水文资料分析发现:①各组分年径流量和降水量的多年变化均不大,导致大通站入海年径流量多年变化不大;②大通站入海流量年内分配过程逐渐坦化,其中,宜昌站的主要贡献体现了其上游梯级水库群对大通站入海流量过程的调平效应;③流域水库建设使大通站入海流量过程坦化和年径流量稳定的趋势得以维持。刘伟苹^[35]研究了大通站以下引调水工程对长江入海径流量的影响,基于 2000—2014 年三峡工程前后多年平均引水量(279.5 亿 m^3),分析了典型枯水年引调水量,研究发现枯季(11 月至翌年 4 月)引水量占总引水量的 27.3%,且引水量与自然条件和社会经济活动密切相关,主要受农业灌溉的影响。

综上,基于大通站以下至河口段复杂的河湖支流吞吐及引调水口门/工程等的综合引排效应与径流实际响应关系,本文采用业界通用方法,以大通站径流量或流量作为长江口入海径流量或流量的相对参考,分析其对河口咸潮入侵的影响。

2.1.2 大通站径流量变化特征

2.1.2.1 年径流量

后三峡工程时代长江大通站年均径流量呈现典型丰平枯水年特征^[12,36](图 1)。其中,2010 年、2012 年、2016 年和 2020 年径流量分别为 10 220 亿、10 020 亿、10 450 亿、11 180 亿 m^3 ,为典型丰水年;其余年份均在 1 万亿 m^3 以下,且多为 8 000 亿 m^3 以下,属于平水年和枯水年,2006 年、2011 年和 2023 年径流量分别为 6 686 亿、6 671 亿、6 720 亿 m^3 ,均低于历史最枯年份 1978 年(径流量为 7 670 亿 m^3)。值得注意的是,2022 年大通站径流量虽达到 7 712 亿 m^3 ,但该年发生了史上最严重的咸潮入侵长江口水源地事件,致使青草沙水库停止取水/供水达 98 d,陈行水库和东风西沙水库也出现了建库以来最严重的咸潮入侵事件。

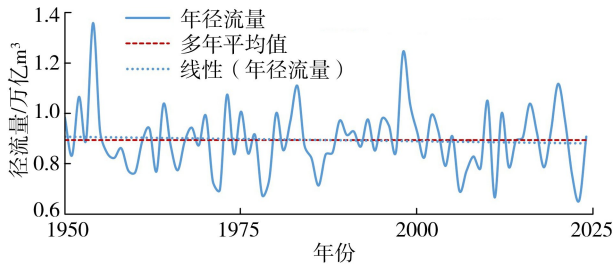


图 1 三峡工程运行前后大通站年均径流量变化趋势
Fig.1 Variation trend of annual average runoff at Datong Station before and after operation of Three Gorges Project

根据《长江泥沙公报》,自三峡工程运行以来,2003—2024 年大通站年均径流量为 8 685 亿 m^3 ,相比

运行前 1950—2002 年的年均径流量(9 039 亿 m^3)减少了 354 亿 m^3 (降幅约 4%)。由此可见,后三峡工程时代随着气候变化和长江流域工情水情变迁,长江干流入海径流量整体呈现下降态势。

2.1.2.2 月均下泄流量

后三峡工程时代(2003—2024 年)长江大通站月均流量的季节变动规律显著,呈现汛期(即丰水期,一般为 6—9 月)和非汛期(即枯水期,一般为 10 月至翌年 5 月)典型特征(图 2(a)),与文献[12]一致。其中,6—9 月(少数年份为 5—10 月)月均流量多超过 3 万 m^3/s ;12 月至翌年 2 月月均流量多低于 2.2 万 m^3/s 。三峡工程运行前后各月平均流量如图 2(b)所示,除 6 月(腾库泄水)外,5—11 月三峡工程运行前下泄流量均高于运行后的流量,即汛期基本为拦蓄调峰流量(5 月拦蓄流量最小,为 1 446 m^3/s ;10 月最大,为 7 508 m^3/s);而 12 月至翌年 4 月,情况则正好相反,与三峡工程运行后枯季补水调度相符(12 月月均下泄干流补水量最小,为 536 m^3/s ;3 月最大,为 3 948 m^3/s)。后三峡工程时代多年月均流量为 27 423 m^3/s ,其中,2010 年、2016 年、2020 年、2024 年为典型特丰水年,7 月流量均超过 6.2 万 m^3/s ;而 2006 年、2011 年、2023 年均典型特枯水年,枯水期月均流量低于 2.1 万 m^3/s ,除少数特枯年份月均流量低于 1 万 m^3/s 外,如 2004 年、2022 年、2023 年最枯月分别为 2 月、11 月和 1 月,对应流量分别为 9 205、9 280、9 939 m^3/s ,其余月份最低月均流量均超过 1 万 m^3/s 。此外,2013 年上半年、2016 年上半年和 2018 年下半年枯水期分别出现了超过 1.5 万 m^3/s 的月均流量,且出现突破 2 万 m^3/s 的月份,与文献

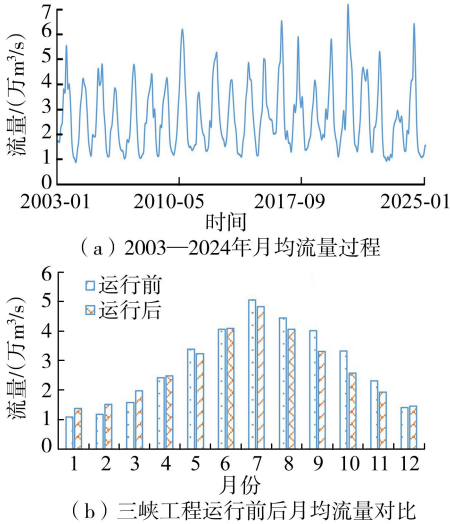


图 2 大通站月均流量变化态势
Fig.2 Variation trend of monthly average discharge at Datong Station

[12]有所不同。

2.2 河口地形地貌变化

长江口作为世界级大河河口,其地形演变始终处于自然动力与人类活动的双重作用之下,1990 年以来这一演变过程呈现出显著的阶段性特征^[3-4,37-39]:

a. 1990—2002 年为自然主导下的滩槽调整阶段^[3-4]。这一时期长江口仍保持较强的自然演变特征,整体呈现“滩淤槽冲”的基本格局。南支河段作为长江口的主汊道,经历了剧烈的河槽冲刷与沙体迁移,1978—1997 年主槽刷深最为显著,白茆沙不断淤涨扩大,扁担沙则经历沙体下移—合并一切滩的周期性变化;拦门沙地区在 1958—1978 年快速淤涨的基础上,1978—2010 年前缘潮滩仍维持淤涨状态,为河口提供了重要的缓冲屏障。

b. 2003—2024 年为工程主导下的全面转型阶段^[37-39]。一方面,受长江上游持续水土保持工程及三峡工程等大中型水库建设与运行等综合效应的影响,长江入海泥沙量从 1950—2002 年的年均 4.27 亿 t 骤降至 2003—2018 年的 1.34 亿 t,泥沙供给的急剧减少导致河口原有的水沙平衡被打破,这成为河口地形演变的主导因素之一^[37];另一方面,21 世纪以来,长江口 150km 范围内密集实施了一系列规模宏大、强度较高的河口开发与整治工程,包括徐六泾节点及白茆沙河段整治、南北支边滩整治及护岸、南北港分流口整治、深水航道工程(主航道浚深至 12.5 m,尤其北槽导堤丁坝建设)以及青草沙水库(圈围 70 km²)、东风西沙水库(圈围 3.8 km²)和横沙东滩(或称横沙新洲,圈围 106.1 km²)圈围工程。这些工程显著改变了河床边界条件,成为近年来河口地形演变的关键主导因素,直接重塑了南北支、南北港及拦门沙附近的岸线与槽滩形态,改变了水流路径和冲淤态势,进而使咸潮入侵路径更趋复杂,呈现新的变化趋势。

2003 年三峡工程正式蓄水后,长江口地形演变进入全新阶段,流域来沙锐减与高强度河口工程共同塑造了新的地貌格局:

a. 河口基本河槽经历全面强冲刷,河床形态呈宽深比减小的趋势,南北支各区段基本河槽上、中、下 3 层河床的冲刷分布表现出明显的差异:愈往上游,受径流作用影响愈大;而愈向下游口门,受潮汐动力影响愈显著^[37]。

b. 流域来沙减少是长江口滩涂演变的驱动因素,其影响范围广、周期长,且变化过程较为缓慢;人类活动则作为触发因素,表现出局部性、短周期和剧烈变化的特征。在双重作用下,河口区总体呈现高

滩面积增加、中低滩面积减小的趋势^[38]。

c. 长江口总体呈陆侧岸线外拓、河道缩窄、水域面积减少、河槽容积增加、平均水深增加等趋势。据统计^[39],1997—2023 年长江口河道宽度平均缩减 25%,减少约 2.4 km;水域面积减少 643.79 km²,占研究区总面积的 11.5%;河槽容积增加 1.36 亿 m³,平均水深提升 1.34 m,整体呈现“河道缩窄、滩淤槽冲、串沟发育、河槽加深”的演变特征。

d. 在保滩护岸、圈围工程及岸线整治工程的共同作用下,长江口总体河势仍将保持相对稳定;后三峡工程时代来沙大幅减小形势下,河口基本河槽将持续受到冲刷,河床形态将向窄深方向发展^[37]。

2.3 河口潮汐特征变化

为探究三峡工程蓄水对潮汐特征的影响,朱巧云等^[40]基于长江口系列水文资料,选取蓄水前(1990 年平水年、1998 年丰水年、2001 年枯水年)和蓄水后(2005 年平水年、2011 年枯水年、2016 年丰水年)各 3 个典型年,对徐六泾站、北支 2 站(崇头、连兴港)及南支 3 站(杨林、六淤、共青圩)共 6 个测站的潮汐变化进行对比研究。结果表明,三峡工程蓄水后,长江河口段主要分潮的调和常数及潮汐特征参数虽有所变化,但变化幅度较小。具体表现为:

a. 河口段主要受 M₂、S₂、K₁、O₁、M₄、MS₄ 6 个分潮控制,且 M₂ 分潮占主导地位,浅水分潮贡献显著。该河段潮汐类型表现为非正规的半日浅海潮,潮汐变形显著;从口门向口内方向,半日分潮振幅减小,浅水分潮振幅增大,各分潮迟角增大,日潮不等现象趋于显著。

b. 长江河口各区段潮汐特征变化趋势存在差异,其中,位于上游、受径流影响较大的徐六泾站和崇头站,其半日分潮振幅增大,潮汐特征参数减小,但二者变化幅度均较小;其余各站点潮汐特征参数基本不变。

此外,基于三峡工程蓄水前后(1997—2023 年)长江口河床演变(陆侧岸线变化及河床冲淤影响),经模拟研究潮汐反馈效应发现^[39],长江口各区域潮汐也呈现变化:河口南支、南槽、北支上段潮汐动力增强,北港、北槽、横沙通道潮汐动力减弱,且潮汐动力有异变,但总体变化不大。对高低潮位及潮差而言,其间南支、南槽、北支上段高潮位上升 0.05~0.2 m,北港、横沙通道高潮位降低 0.05~0.3 m;南支、南槽、北支上段低潮位降低 0.05~0.1 m,北港、北槽、横沙通道低潮位上升 0.05~0.3 m;而南港及北支中下段高、低潮位无明显变化。对于涨潮历时,其间南支、北支上段单潮次涨潮历时增加 0.3~0.5 h,北港上中段增加 0.2~0.3 h,横沙通道增加

0.1 h,南港下段增加 0.1~0.2 h,南槽及北槽增加 0.2~0.3 h;南港上段减少 0.2 h,北港下段减少 0.1~0.2 h,北支中段减少 0.1 h;北支下段无明显变化。

2.4 海平面变化

根据《中国海平面公报》,1990—2024 年长江口及邻近鲁苏浙闽海域涵盖了全球海平面加速上升的关键时期。长江口地区海平面变化呈现明显的上升趋势,上升速率高于全球和全国平均水平,且该海域海平面变化过程呈现明显的阶段性特征和区域差异性,其中,1990—2002 年为稳定上升期,2003—2024 年为加速上升期。

1990—2002 年,长江口沿海海平面以年均 2.8 mm 的速率缓慢上升,略高于全球平均水平,但低于我国同期沿海平均速率;这一阶段海平面变化主要受全球气候变暖引起的海洋热膨胀效应影响,长江口代表性站点(如吴淞站)年平均海平面相对稳定,最大年际波动不超过±20 mm。2003 年为海平面上升的重要转折点,2003—2024 年长江口海平面上升速率显著加快至 4.5 mm/a,较前一阶段提升 60.7%,远高于 1993—2023 年全国沿海的平均水平(4.0 mm/a),其中,2010—2023 年上升速率进一步增至 5.2 mm/a,呈现出明显的加速趋势。海平面上升的持续性累积效应,通过沿海潮水位不断抬高及滨海区深海化,增加了潮汐向陆地的上溯距离,使潮区(流)界进一步内展化。在此背景下,高盐度咸潮的入侵强度加剧,发生频率增加。全球变暖导致的极端干旱事件频次增加,如 2022 年长江流域遭遇百年不遇的流域性枯水,与海平面上升形成双重叠加效应^[21,25]。

2.5 河口台风衍生变化

长江口及其邻近海域(30°N~32°N,121°E~123°E)是我国受台风影响较为频繁的区域之一。1990—2024 年,该区域台风活动呈现出显著的阶段性变化特征:

a. 1990—1999 年长江口台风呈现低频低能特征。根据中国气象局热带气旋最佳路径资料统计,这一时期平均每年出现影响长江口的台风约 1.2 次,较 1949—1989 年年均 1.6 次有所下降,其中达到强台风级别(中心最大风速达 41.5 m/s)的仅占 15%,未出现超强台风影响事件,台风路径以在浙闽登陆后西行减弱型为主。1997 年“9711”号强台风,因其登陆时恰逢天文大潮,导致长江口沿岸出现历史最高水位,但此类事件较为罕见。

b. 2000—2024 年长江口台风活动进入新的活跃期,呈现频数略减,但强度陡增、影响时段延长的

特征。2000—2018 年年均出现影响长江口的台风 1.1 次,但自 2009 年以来,台风影响强度呈持续增强态势,尤其 2018 年影响长江口的台风多达 6 次,创历史同期新高。这一时期强台风和超强台风的比例上升至 23%。值得注意的是,台风影响时段从传统的 7—9 月扩展至 5—11 月,2022 年 9 月接连出现“轩岚诺”“梅花”“南玛都”3 个台风影响长江口,这种秋季台风集中爆发的现象在 20 世纪 90 年代极为罕见^[25]。从路径特征看,2000 年后影响长江口的台风可分为两类:①在浙闽沿海登陆后穿越长江口的登陆型台风(占 79%);②从东海海面顺时针绕过上海北上的近海北上型台风(占 21%)。后者对长江口咸潮入侵的影响更为显著,如 2022 年的台风“梅花”^[25]和 2024 年的“贝碧嘉”“普拉桑”属于典型的近海北上型^[26],其引发的风暴增水与天文大潮叠加,显著加剧了咸潮入侵程度。

3 典型枯水年长江口咸潮入侵特征分析

3.1 长江口咸潮入侵关键驱动因素

3.1.1 长江流域气象与径流条件

长江干流入海径流量减少是河口咸潮入侵的根本驱动力,而流域降水直接决定枯水期径流丰枯程度。4 个典型年长江流域气象与径流特征差异显著^[18-21,40-44]:

a. 2006 年流域降水较常年偏少 10.5%(为 1947 年以来第二特枯年)。大通站平均流量为 21 925 m³/s,较常年偏少 23.8%,异常月份为 5—10 月,5 月和 10 月的平均流量较常年同期分别偏少 10.2%和 57.5%;全年月均流量低于 2 万 m³/s 的月数达 6 个月,为典型枯水年。

b. 2011 年流域中下游出现春夏连旱,降水较常年偏少 14.3%。大通站平均流量为 21 154 m³/s,较常年偏少 25.6%;异常月份为 4—6 月,4 月和 6 月的平均流量较常年同期分别偏少 33.4%和 50.3%;全年月均流量低于 2 万 m³/s 的月数达 7 个月,为典型枯水年。

c. 2014 年流域降水较常年偏多 1.3%。大通站平均流量为 28 282 m³/s,较常年偏少 0.5%;异常月份为 1—2 月,1 月和 2 月的平均流量较常年同期分别偏多 0.64%和偏少 0.63%;全年月均流量低于 2 万 m³/s 的月数达 4 个月,为典型平水年。而 2013 年大通站平均流量为 24 980 m³/s,较常年偏少 12.1%,为典型枯水年,其枯水期的延续对 2014 年春季咸潮事件产生了显著的影响。

d. 2022 年遭遇 1961 年以来最严重的夏秋连旱,流域降水较常年偏少 10.3%。大通站平均流量

为 23937 m³/s,较常年偏少 16.0%;异常月份为 7—10 月,7 月和 10 月的平均流量较常年同期分别偏少 10.5%和 63.8%;全年月均流量低于 2 万 m³/s 的月数达 5 个月,为典型特枯水年。

3.1.2 长江口局地气象与台风条件

长江口局地风场与台风活动通过改变水体动力条件,加剧或缓解咸潮入侵:

a. 风场影响。2006 年、2013 年冬季至 2014 年春季、2022 年枯水期盛行偏北风(频率超过 60%),风速为 3~6m/s,推动外海盐水向河口输运,使盐度锋面向上游推进 5~8 km;2011 年春季偏东风频率增加,一定程度助长盐水上溯趋势;2013 年冬季至 2014 年春季风力较强(2013 年 12 月 10—29 日和 2014 年 1 月 7—20 日,出现了超长时间偏北大风,风速为 6~8 m/s),严重加剧了咸潮入侵,导致青草沙水库发生咸潮持续 23 d 的停水事件,并因此启动长江口咸潮应对预案工作^[13]。

b. 台风影响。2022 年枯水期受台风显著影响,9 月台风“轩岚诺”“梅花”“南玛都”相继过境,台风低压导致河口水位抬升 0.3~0.5 m,顶托盐水上溯,使咸潮入侵提前 3~4 月,且峰值盐度较无台风年份增加 20%~30%^[25]。其余 3 年枯水期均无台风影响长江口。

3.1.3 海平面变化

据对《中国海平面公报》的分析,海平面上升是咸潮入侵的长期驱动因素,4 个年份长江口海平面呈逐年上升的趋势;2006 年、2011 年、2014 年长江口海平面较常年分别偏高 50、60、70 mm,2022 年偏高达 94 mm,创历史新高。海平面每上升 10 mm,长江口咸潮入侵距离增加 1.2~1.5 km^[22],2022 年高海平面与极端枯水叠加,使咸潮影响范围较 2006 年扩大约 30%^[25]。

3.1.4 三峡工程调度作用

依据对《中国水旱灾害防御公报》的分析,三峡工程对长江口咸潮的影响经历了从蓄水加剧向补水缓解的转变,4 个年份调度策略差异显著:

a. 2006 年三峡水库首次蓄水至 156 m,枯水期累计截流 111 亿 m³,导致下游径流量进一步减少,咸潮入侵加剧。

b. 2011 年开始尝试枯水期补水,但补水量仅 5 亿 m³,入海流量增幅不足 10%,缓解效果有限。

c. 2014 年 2 月三峡水库首次实施长江口“压咸补水”专项调度。自 2 月 21 日起日均出库流量从 6000 m³/s 加大至 7000 m³/s,至 3 月 4 日恢复正常调度,共计调度 11 d,与正常出库量相比多下泄水量约 10 亿 m³,大通站月均入海流量超过 1.1 万 m³/s,

有效遏制了长江口盐度锋面上移。

d. 2022 年,为防御特枯干旱,三峡水库先后启动抗旱应急补水与压咸潮补水联合调度。8—10 月累计补水 55.7 亿 m³(其中,8—9 月抗旱补水 15.1 亿 m³,10 月压咸潮补水 40.6 亿 m³),后汛期 10 月大通站月均流量约 1.1 万 m³/s,有效遏制长江口咸潮蔓延。

3.2 三大水库取水口咸潮影响特征演变

3.2.1 陈行水库:从重灾核心到压力缓解

典型年陈行水库取水口咸潮入侵状况如表 2 所示。陈行水库位于河口上段,早期受咸潮影响较为严重,2006 年和 2011 年的上半年和下半年水库取水口均出现咸潮入侵^[9,18-19];2014 年和 2022 年咸潮影响有所缓解,分别仅在上半年和下半年出现咸潮入侵^[20-21]。尽管如此,据上海市水务部门运行管理统计,2014 年春季咸潮入侵依然是该库建库以来长江口咸潮入侵影响最严重的事件之一,其间连续 14 d 无法正常取水;同样,2022 年 9—10 月该库取水口氯化物质量浓度最高达 2166 mg/L,连续 26.5 d 无法正常取水,成为建库以来所遭受的最严重咸潮入侵。新建的青草沙水库发挥了取供水分担作用,在一定程度上缓解了陈行水库咸潮入侵的压力。

3.2.2 青草沙水库:从投运适应到统筹应对

青草沙水库作为上海主水源,其抗咸能力随调度经验积累逐步提升(表 2)。2014 年 2 月水库取水口氯化物质量浓度高达 5479 mg/L,连续 22.3 d 无法正常取水,为该水库投入运行以来首次遭受最为严重的咸潮入侵。与陈行水库、东风西沙水库传统咸潮入侵北支倒灌的特征显著不同,青草沙水库咸潮入侵为长江口典型咸潮正面袭击。为应对此次青草沙和陈行两大水库咸潮入侵灾害,从三峡水库调水约 10 亿 m³,实施河口补淡压咸,协助上海减轻咸潮灾害影响;同时启动长江口咸潮长效应对工作,包括建立相关咸潮预报预警及预案响应体系,制定《长江口咸潮应对工作预案》^[13],为后续流域协同调度、共同应对长江口咸潮威胁与风险奠定基础。2022 年咸潮期间,面对包括青草沙水库在内的上海长江口三大水库引水补库的困难及上海城市供水面临的严重威胁,实施了“抗咸潮保上海市供水”专项行动(据《中国水旱灾害防御公报 2022》):①10 月 2—11 日紧急启动三峡水库补水调度,将水库泄量由 9000 m³/s 加大至 1.25 万 m³/s,累计向下游补水 40.6 亿 m³;②阶段性从丹江口水库调水 500 m³/s,经汉江至长江,并协调苏皖两省,10 月 15—19 日压减沿江引水;③太湖流域管理局加大“引江济太”力

表 2 典型年长江口三大水库取水口咸潮入侵状况

Table 2 Saltwater intrusion status at three major reservoir intakes in the Yangtze River Estuary for typical years											
水库	年份	上半年入侵情况			下半年入侵情况			最严重入侵情况			
		时间	入侵 次数/次	入侵 时间/d	时间	入侵 次数/次	入侵 时间/d	开始时间	结束时间	入侵 时间/d	氯化物质量 浓度/(mg/L)
陈行水库	2006	2—4 月	3	18	9—12 月	6	41	10-09	10-17	9	1 281
	2011	2—5 月	6	40	10—11 月	1	6	04-19	04-29	10	1 058
	2014	1—4 月	5	35. 5				02-12	02-26	14	1 069
	2022				9—12 月	6	74. 5	09-21	10-18	26. 5	2 166
青草沙水库	2011				10—11 月	3	8	10-29	11-04	5	770
	2014	1—4 月	5	30				02-04	02-26	22. 3	5 479
	2022				9—12 月	2	100. 5	09-05	12-12	97. 5	2 980
东风西沙水库	2022				9—12 月	7	93	09-20	10-18	28	2 176

度,打通太湖—河网—水库供水通道,保证陈行水库供水。同时,上海市也临时采取扩大引水口门、加设移动泵站等措施,精准捕捉引水窗口期,及时抽水补库,10 月 19—30 日,长江口三大水库共取水 5 010 万 m³,有效缓解了上海史无前例的咸潮灾害。

3.2.3 东风西沙水库:从平稳起步到协同抗咸

东风西沙水库自 2014 年投入运行后,因地理位置优势(距外海更远),抗咸表现相对稳定(表 2)。2022 年受极端干旱影响,9 月下旬出现严重咸潮入侵,为该水库历史之最^[30]。

3.2.4 三大水库影响对比综合评估

通过超标天数、峰值浓度、取水影响程度(停止取水)三维指标,对 4 个年份三大水库咸潮影响程度排序(表 3),可见后三峡工程时代水库群抗咸协同效应显著增强。

4 后三峡工程时代长江口水源地咸潮入侵应对策略

4.1 咸潮入侵发展态势

a. 驱动机制多元化。从径流与咸潮(北支倒灌)为主导转向径流、气象(风矢量,含台风)、高海平面、流域调度多因素协同,2022 年显现极端干旱(径流因素)、台风(气象因素)、高海平面、北支咸潮

倒灌与南支北港咸潮正面袭击五重因素叠加风险。

b. 影响周期提前。传统咸潮主要发生在 11 月至翌年 3 月,但 2022 年因受台风影响,7 月即出现咸潮雏形,入侵时段从冬季扩展至夏秋季节。

c. 应对能力系统化。长江口咸潮防控从单一水库被动应对转变为流域水库群协同调度、沿江引调水管控、河口水库群主动抗咸等多措并举,其中,流域水库群协同调度已成为长江口咸潮防控的主要且直接手段之一。

4.2 核心挑战

a. 气候不确定性与变化风险加剧。模型预测显示,若温室气体排放未有效控制,2050 年长江口盐度超标天数可能增加 30%~50%。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告^[45]指出,未来长江流域极端干旱发生概率将增加 2~3 倍,海平面上升速率可能达 3~5 mm/a,咸潮入侵频率与强度将进一步提升。

b. 时空叠加风险提升。三峡水库蓄水期(9—10 月)与引江济淮工程抗旱调水、南水北调东线抽水高峰期重叠,导致大通站以下流量在关键时段(如 2022 年 9 月)骤降;引江济淮二期工程(2035 年取水 33 亿 m³)和南水北调东线扩能将进一步分流下游流量,导致工程持续影响加剧;若叠加全球变暖

表 3 典型年长江口三大水库取水口咸潮入侵影响程度、影响因素与抗咸应对效果

Table 3 Influence degree and influencing factors of saltwater intrusion at water intakes and anti-salinity performance of three major reservoirs in the Yangtze River Estuary for typical years				
年份	影响程度排序(从高到低)	核心影响因素	抗咸措施	应对效果
2006	陈行水库	极端枯水、咸潮(北支倒灌)、三峡水库蓄水	无有效调度	
2011	青草沙水库、陈行水库	中下游连旱、咸潮(北支倒灌)、三峡水库蓄水、流域调度不足	单一水库应对	效果有限
2014	陈行水库、青草沙水库、东风西沙水库	中等枯水(前 1 年枯水延滞效应)、气象(风矢量)、咸潮(北支倒灌与南支北港正面袭击)、高海平面、首次三峡水库压咸	流域调度主导,市域供水调控	影响可控
2022	青草沙水库、陈行水库、东风西沙水库	百年干旱、台风、咸潮(北支倒灌与南支北港正面袭击)、高海平面、流域调度压咸(首次协同)	河口水库群、流域调度协同(长江、太湖)、市域“两江”(黄浦江、长江)水源互补	影响可控、立体减损

导致的海平面上升(预计 2100 年上升 0.5~1 m)和长江三角洲地面沉降(年均 2~3 mm),则长江口咸潮入侵风险将持续升级。

c. 调度协同性不足。当前三峡工程调度主要关注长江干流防洪、发电,尚未完全建立与长江口咸潮防控的协同机制,枯水期补水时机与强度的精准性有待提升;三峡工程及上游水库群调度有待进一步优化,需建立三峡水库、上游水库群、引调水工程联合调度机制,如在枯水年 9 月提前蓄水至 155 m,以减少 10 月截留量,并动态调整生态调度,以平衡防洪、供水与生态需求。

d. 长江口水库应急能力有限。长江口三大水库总应急库容仅 8.26 亿 m³,若遭遇连续两年枯水,则可能出现“蓄淡不足”风险。

4.3 应对策略

4.3.1 优化流域水库群联合调度

建立健全葛洲坝、三峡水库和金沙江下游四大水库(向家坝、白鹤滩、溪洛渡、乌东德)的长江上游水库群联合压咸调度机制,将长江口咸潮预警纳入水库年度调度目标函数,优化提前补水实施条件、时间及其他相关调度方案(预案)^[13,46]。进一步细化分级补水标准,当大通站流量低于 1.6 万 m³/s 时,启动常规补水;当大通站流量低于 1.2 万 m³/s 时,启动应急补水,确保河口淡水屏障。

4.3.2 强化供水设施能力挖潜与技术支持

a. 加快现有三大水库挖潜增能,包括清淤及引水泵站扩容等,提升水库蓄淡能力,如将青草沙水库清淤库容增加至 6 亿 m³,对陈行水库和东风西沙水库取水泵站扩容等。

b. 推进河口三大水库及宝钢水库与城市供水管网或系统(含黄浦江上游金泽水库水源地供水系统)的“库库联通”或“库管联通”工程^[47],增强咸潮期原水的错时错峰取水和优化取水能力,提升城市供水安全保障水平。

c. 依据《上海市节水型社会(城市)建设“十四五”规划》,进一步加强城市用水“双控”(总量控制和单位水耗控制)和节水型社会(城市)建设,从源头促进节约用水,降低单位产品用水量、万元产值用水量及人均用水量,提升用水效率,有效遏制水资源浪费,降低水资源需求。

d. 构建径流、盐度、风场、海平面多要素实时监测网络,开发基于 AI 的咸潮入侵预警模型,预警时效从当前的 72 h 提升至 7 d。

4.3.3 加快河口战略新水源地研究与建设

进一步加强下扁担沙水源地和白茆沙水源地可行性研究^[48-50],适时推进相关水源地工程及配套取

供水管网与泵站系统建设,以完善城市河口水源地战略布局,强化取水管网的互联互通,有力支撑《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》中的 2035 发展愿景及建国百年发展目标。

4.3.4 完善跨区域城乡供水协同或一体化建设

建立健全流域机构(水利部长江水利委员会、水利部太湖流域管理局)与江浙沪三省(市)之间的跨区域咸潮防控协调机制,统一制订区域协同联动供水应急预案^[50]。同时,加快长三角地区水源地联动保障战略研究,并适时推进东太湖水源地、浙东水源地、皖南水源地等区域城乡供水一体化保障的可行性研究及工程建设。

5 结 语

为揭示后三峡工程时代长江口咸潮入侵的演变新特征,本文系统分析了 1950—2024 年三峡工程运行前后多项关键驱动因素的变化,包括长江入海径流、河口地形地貌、潮汐特征、海平面上升、台风生衍等。以 2006 年、2011 年、2014 年、2022 年 4 个典型咸潮入侵突出年份为例,分析了各因素的影响程度与特点,并对比分析长江口陈行、青草沙、东风西沙三大水库取水口的咸潮入侵特征和异同。在此基础上,针对未来上海市河口水源地应对咸潮入侵新特征,提出了相应的策略与建议。

研究表明,后三峡工程时代长江口咸潮入侵驱动机制已发生显著转变,由径流变化与咸潮(北支倒灌)主导演变为径流主导、调度调控、海平面上升、台风触发等多因素协同作用的新格局。三大水库抗咸特征呈现陈行水库压力逐步缓解、青草沙水库趋于统筹应对、东风西沙水库投运挖潜持续优化的演变特征。目前,长江口水源地仍面临咸潮入侵加剧的风险。未来,咸潮防控需从被动应对转向主动防控与谋划,重点应对气候变化下极端干旱、高海平面与台风的叠加风险,应构建以流域水库群联合调度、河口工程扩容、智能预警系统及跨区协同为核心的“四维防控体系”,打造韧性水源地,全面提升长江口水源地长期应对能力,为上海城市高质量发展提供坚实的水安全保障。

参考文献:

[1] 上海市水务局,上海市规划和国土资源管理局. 上海市供水规划(2019—2035 年)[R]. 上海:上海市水务局,上海市规划和国土资源管理局,2019.

[2] 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))
- [3] 李九发, 蒋陈娟, 刘启贞, 等. 长江河口泥沙输移与河床演变[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 顾玉亮, 吴守培, 乐勤. 北支盐水入侵对长江口水源地影响研究[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 1-3. (Gu Yuliang, Wu Shoupei, Le Qin. Impact of intruded saline water via north branch of the Yangtze River on water source areas in the estuary area [J]. Yangtze River, 2003, 34(4): 1-3. (in Chinese))
- [8] 曹勇, 陈吉余, 张二凤, 等. 三峡水库初期蓄水对长江口淡水资源的影响[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 554-558. (Cao Yong, Chen Jiyu, Zhang Erfeng, et al. Influence of Three Gorge reservoir filled with water on freshwater resource in the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 554-558. (in Chinese))
- [9] 陈吉余, 何青. 2006 年长江特枯水情对上海水资源安全的影响研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [10] 罗锋, 李瑞杰, 廖光洪, 等. 水文气象条件变化对长江口盐水入侵影响研究[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 8-17. (Luo Feng, Li Ruijie, Liao Guanghong, et al. Influence of hydrometeorological variation on saltwater intrusion in Changjiang River Estuary [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(3): 8-17. (in Chinese))
- [11] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口盐水入侵研究综述 [C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 南宁: 中国海洋工程学会, 2015: 411-415.
- [12] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地盐水入侵规律及其应对措施[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 19-24. (Chen Zujun. Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 19-24. (in Chinese))
- [13] 陈祖军, 阮仁良, 韩昌来, 等. 长江口水源地咸潮入侵应对预案体系[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 52-58. (Chen Zujun, Ruan Renliang, Han Changlai, et al. Pre-plan system for saltwater intrusion into water sources area of Yangtze Estuary [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 52-58. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 贺松林, 丁平兴, 孔亚珍. 长江口南支河段枯季盐度变异与北支咸水倒灌[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 584-589. (He Songlin, Ding Pingxing, Kong Yazhen. Changes of salinity in south branch of the Yangtze estuary in dry seasons and the saltwater intrusion from north branch [J]. Advances in Natural Science, 2006, 16(5): 584-589. (in Chinese))
- [17] 严鑫, 孙昭华, 谢翠松, 等. 基于经验模型的长江口南支上段压咸临界流量[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 935-947. (Yan Xin, Sun Zhaohua, Xie Cuisong, et al. Estimation of critical discharge for saltwater intrusion in the upper south branch of the Yangtze River Estuary using empirical models [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 935-947. (in Chinese))
- [18] 何金林. 2006 年长江口咸潮入侵的认识与思考 [C]//中国水利学会 2007 学术年会人类活动与河口分会场论文集. 苏州: 中国水利学会河口治理与保护专业委员会, 2007: 58-62.
- [19] 顾圣华. 2011 年春夏初枯水期间长江河口盐水入侵 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(4): 154-162. (Gu Shenghua. Saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary during the drought in late the spring and early summer of 2011 [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2014(4): 154-162. (in Chinese))
- [20] 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))

- Chinese))
- [21] 王玉琦,李铖,刘安琪,等. 2022 年长江口夏季咸潮入侵及影响机制研究[J]. 人民长江,2023,54(4):7-14. (Wang Yuqi, Li Cheng, Liu Anqi, et al. Dynamic mechanism of saltwater intrusion at Yangtze River Estuary in summer,2022[J]. Yangtze River,2023,54(4):7-14. (in Chinese))
- [22] 裘诚,朱建荣. 低径流量条件下海平面上升对长江口淡水资源的影响[J]. 气候变化研究进展,2015,11(4):245-255. (Qiu Cheng, Zhu Jianrong. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary in the low river discharge cases[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis,2015,11(4):245-255. (in Chinese))
- [23] 徐志,戴会超,高希超,等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):15-21. (Xu Zhi, Dai Huichao, Gao Xichao, et al. Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):15-21. (in Chinese))
- [24] 王绍祥,朱建荣. 不同潮型和风况下青草沙水库取水口盐水入侵来源[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2015(4):65-76. (Wang Shaoxiang, Zhu Jianrong. Saltwater intrusion sources at the water intake of Qingcaosha Reservoir in different tidal pattern and wind case[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science),2015(4):65-76. (in Chinese))
- [25] 马瑞. 低径流量和台风联合作用对长江口盐水入侵和淡水资源影响[D]. 上海:华东师范大学,2024.
- [26] 裘诚. 杭州湾北岸登陆台风对长江口咸潮入侵的影响:以 2024 年 9 月台风“贝碧嘉”“普拉桑”为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2025(6):141-151. (Qiu Cheng. Effects of typhoons landfalling on the north bank of Hangzhou Bay, Shanghai, on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary: a case study of typhoons “Bebinca” and “Pulasan” in September 2024[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science),2025(6):141-151. (in Chinese))
- [27] 程和琴,陈吉余. 海平面上升对长江河口的影响研究[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [28] 程和琴,陈祖军,阮仁良,等. 海平面变化与城市安全:以上海市为例[J]. 第四纪研究,2015,35(2):363-373. (Cheng Heqin, Chen Zujun, Ruan Renliang, et al. Sea level change and city safety: the Shanghai as an example[J]. Quaternary Sciences,2015,35(2):363-373. (in Chinese))
- [29] 孙波,刘曙光,顾杰,等. 三峡与南水北调工程对长江口水源地的影响[J]. 人民长江,2008,39(16):4-7. (Sun Bo, Liu Shuguang, Gu Jie, et al. Numerical study on impact of water regulation of TGP and South-to-North Water Diversion Project on water source area of the Yangtze estuary[J]. Yangtze River,2008,39(16):4-7. (in Chinese))
- [30] 宋剑. 东风西沙水源地取水口咸潮入侵变化及对策[J]. 陕西水利,2025(3):25-27. (Song Jian. Changes in saline tide intrusion at the Dongfeng Xisha water source intake and countermeasures[J]. Shaanxi Water Resources,2025(3):25-27. (in Chinese))
- [31] 付桂. 长江口近 come 来水来沙量及输沙粒径的变化[J]. 水运工程,2018(2):105-110. (Fu Gui. Recent changes of runoff, sediment discharge and suspended sediment particle size in the Yangtze estuary[J]. Port & Waterway Engineering,2018(2):105-110. (in Chinese))
- [32] 杜亚南,朱巧云,吕志钢,等. 长江口历年入海水量月年变化特征分析[J]. 水利水电快报,2019,40(10):8-12. (Du Ya’nan, Zhu Qiaoyun, Lyu Zhigang, et al. Monthly and annual variation of Yangtze Estuary’s annual runoff into the sea (over the years)[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2019,40(10):8-12. (in Chinese))
- [33] 唐建华,刘玮玮,赵升伟. 长江口徐六泾流量与大通流量间关系的探讨[J]. 水电能源科学,2011,29(7):4-7. (Tang Jianhua, Liu Weiyi, Zhao Shengwei. Discharge relationships between Xuliujing of Yangtze River Estuary and Datong[J]. Water Resources and Power,2011,29(7):4-7. (in Chinese))
- [34] 朱博渊,李义天,余文钧,等. 长江入海水沙通量变化过程分析及变化趋势[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):2980-2991. (Zhu Boyuan, Li Yitian, Yu Wenjun, et al. An analysis of the processes and trends of changes in Yangtze River water and sediment fluxes into the ocean[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12):2980-2991. (in Chinese))
- [35] 刘伟苹. 长江大通至河口段沿江引水变化特征及其对河口的影响分析[D]. 上海:华东师范大学,2016.
- [36] 徐宇程,朱首贤,张文静,等. 长江大通站径流量的丰平枯水年划分探讨[J]. 长江科学院院报,2018,35(6):19-23. (Xu Yucheng, Zhu Shouxian, Zhang Wenjing, et al. Classification of high/medium/low flow year of the Yangtze River according to runoff at Datong Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(6):19-23. (in Chinese))
- [37] 余文畴,张志林. 2002—2018 年长江口基本河槽冲刷及形态调整演化趋势[J]. 长江科学院院报,2021,38(8):1-8. (Yu Wenchou, Zhang Zhilin. Evolution trend of basic channel scour and morphological adjustment in Yangtze River Estuary from 2002 to 2018[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2021,38(8):1-8. (in Chinese))
- [38] 张东来,宋磊. 长江口 2002—2019 年滩涂演变分析[J]. 水运工程,2023(6):137-143. (Zhang Donglai, Song Lei. Tidal flat evolution in Yangtze River Estuary from

2002 to 2019 [J]. Port & Waterway Engineering, 2023 (6):137-143. (in Chinese))

[39] 唐建华,李帆. 1997—2023 年长江口河床演变及潮汐反馈模拟[J]. 水科学进展, 2025, 36(2):255-263. (Tang Jianhua, Li Fan. Evolution of the Yangtze River Estuary from 1997 to 2023 and tidal strength feedback simulation [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2):255-263. (in Chinese))

[40] 朱巧云,张志林,乔红杰. 三峡工程蓄水前后长江河口段潮汐特征变化分析[J]. 水文, 2019, 39(3):75-79. (Zhu Qiaoyun, Zhang Zhilin, Qiao Hongjie. Tidal characteristics of Yangtze River Estuary before and after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(3):75-79. (in Chinese))

[41] 周亮广,王崇,戴仕宝,等. 长江 2006 年汛期特枯径流分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3):448-456. (Zhou Lianguang, Wang Dong, Dai Shibao, et al. A study on the exceptionally low flow of Yangtze River in the flood season of 2006 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3):448-456. (in Chinese))

[42] 徐俊杰,何青,刘红,等. 2006 年长江特枯径流特征及其原因初探[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5):716-722. (Xu Junjie, He Qing, Liu Hong, et al. Preliminary analysis of characteristics of the exceptional low discharge and its cause over the Yangtze River, 2006 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5):716-722. (in Chinese))

[43] 官学文,曾明. 2022 年长江流域枯水特征分析与启示[J]. 人民长江, 2022, 53(12):1-5. (Guan Xuewen, Zeng Ming. Characteristics and enlightenment of low water in Changjiang River Basin in 2022 [J]. Yangtze River, 2022, 53(12):1-5. (in Chinese))

[44] 黄艳,邵骏,邱辉. 2022 年长江流域夏秋旱情特征及应对策略[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(3):18-23. (Huang Yan, Shao Jun, Qiu Hui. Characteristics and countermeasures of summer and autumn drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(3):18-23. (in Chinese))

[45] Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva:IPCC, 2023.

[46] 鲁军,陈炯宏,陈肃利,等. 应对长江口咸潮的长江上游水库群调度可行性分析[J]. 人民长江, 2015, 46(24):6-9. (Lu Jun, Chen Jionghong, Chen Suli, et al. Feasibility analysis on control of saline tide of Yangtze River estuary by co-regulation of reservoir group in upper Yangtze River [J]. Yangtze River, 2015, 46(24):6-9. (in Chinese))

[47] 王如琦. “链+环”或“链+网”:上海市未来供水水源地和原水系统战略规划布局的设想[J]. 净水技术, 2017, 36(5):1-5. (Wang Ruqi. “chain + ring” or “chain + network”: strategic planning for future water supply sources and raw water system in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(5):1-5. (in Chinese))

[48] 朱建荣,吕行行. 长江河口下扁担沙水域最长连续不宜取水时间[J]. 海洋学报, 2019, 41(6):12-22. (Zhu Jianrong, Lyu Hanghang. The longest continuous days unsuitable for water intake of the lower Biandan Shoal in the Changjiang River Estuary [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(6):12-22. (in Chinese))

[49] 季永兴,李路,高晨晨. 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[J]. 水资源保护, 2024, 40(1):25-32. (Ji Yongxing, Li Lu, Gao Chenchen. Optimization of water source distribution and feasibility analysis of Baimaoshan Reservoir construction under influences of saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1):25-32. (in Chinese))

[50] 上海市水务局. 上海市长江水源地优化研究[R]. 上海:上海市水务局, 2023.

(收稿日期:2025-10-10 编辑:施业)

