

DOI:10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2019. 05. 010

长江口水源地咸潮入侵应对预案体系

陈祖军¹, 阮仁良², 韩昌来², 沈华中³, 陈国光⁴, 夏雪瑾⁵

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 上海市水务局, 上海 200050;
3. 长江防汛抗旱总指挥部, 湖北 武汉 430010; 4. 上海市供水调度监测中心, 上海 200003;
5. 上海市水务规划设计研究院, 上海 200233)

摘要:基于对长江口咸潮入侵及其发展态势、水源地咸潮入侵影响因素及其灾害应对措施等的分析,研究了长江口区水源地咸潮灾害应对预案的框架体系及相关要素或指标,提出了预案组织与职责、监测、预报、预警、应急响应、保障等体系的设计方案。

关键词:长江口水源地;咸潮入侵;预案体系;应急响应

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2019)05 - 0052 - 07

Pre-plan system for saltwater intrusion into water sources area of Yangtze Estuary // CHEN Zujun¹, RUAN Renliang², HAN Changlai², SHEN Huazhong³, CHEN Guoguang⁴, XIA Xuejin⁵ (1. *SIDRI Co., Ltd., Shanghai* 200335, China; 2. *Shanghai Municipal Water Affairs Bureau, Shanghai* 200050, China; 3. *Office of Headquater of Flood Control and Drought Alleviation of Yangtze River, Wuhan* 430010, China; 4. *Shanghai Water Supply Dispatching Monitoring Center, Shanghai* 200003, China; 5. *Shanghai Water Planning and Research Institute, Shanghai* 200233, China)

Abstract: Based on the analysis of saltwater intrusion in the Yangtze Estuary and its development trend, influencing factors of saltwater intrusion into water sources area and is disaster response measures, etc., the framework system and related factors or indicators of the saltwater disaster response plan in the water source area Yangtze Estuary of were studied. The design schemes of the plan organization and responsibility, monitoring, forecasting, early warning, emergency response and support system were put forward respectively.

Key words: water source area of Yangtze Estuary; saltwater intrusion; pre-plan system; emergency response

大江大河河口区水源地供水安全一直是区域城市(镇)政府及社会各界高度关注的重大民生保障问题^[1]。长江口区城市(镇)密集,人口众多,工业与服务业发达^[2],在全国经济社会发展中有着举足轻重的地位,区域水源地供水安全保障程度影响深远,意义重大。目前,长江口水源地已有 5 个,其中,上海有陈行、宝钢、青草沙和东风西沙 4 个水库,其原水总供水量占全市比例已超 70%;江苏省有太仓浏河水库,为太仓市主要水源地。每年枯水期长江口不同程度的咸潮入侵灾害时常影响甚至威胁到区域供水安全,一直是困扰地方政府的一大隐患和重大民生问题。如,陈行水库自 1994 年运行以来历年咸潮入侵均有发生,每次影响少则两三天,多则 10 余天,尤其 2014 年 2 月春节期间更是发生了史上最严重的咸潮入侵事件(连续 20 余天不能取水,造成

上海部分城区停水),引起国家有关部委和上海市委市府的高度重视,有关领导指示要求尽快组织好长江口咸潮应对工作,以有效协同机制与手段共保长江口水源地未来供水安全。本文在此背景下开展长江口水源地咸潮应对预案体系研究。

1 长江口咸潮入侵及其发展态势

1.1 咸潮入侵基本特征

我国东海大陆架高盐水团随潮汐周期性沿河口上溯,并与长江入海径流淡水不断掺混而形成河口区咸淡水分布,且其含盐量自陆向海、自口门内向口门外不断升高。该咸潮入侵程度与长江上游干流下泄径流量、潮汐、风应力、河口形态及水下地形等因素息息相关,诸因素相互耦合,导致历年长江口水情复杂多变,咸潮随之也呈各年各异特征^[3-9]。总体

基金项目:上海市财政专项(201542507342-40009)
作者简介:陈祖军(1969—),男,高级工程师,主要从事水资源与水环境规划与研究。E-mail:chen_zujun@126.com

上,长江口属中等强度的多级分汉潮汐河口,其复杂的分支、港、槽和沟滩分布使水势水流及咸水入侵形式与途径极其复杂(图1),有外海咸水入侵型、咸水倒灌型、浅滩通道(串沟)水体交换型和漫滩归槽型^[5-6]。其中,外海咸水入侵有南槽、北槽、北港和北支4条途径,且南槽和北槽入侵盐水上溯至南北槽分流口段汇入南港后,咸水入侵又出现南港、北港和北支3条线路,且尤以北支最为严重(进潮量约占长江口进潮量的25%),在枯季其盐度甚高,往往绕过崇头倒灌入南支,使得南支水域出现盐度超标现象,影响到南支苏沪两地水源地供水安全,严重时会导致咸潮灾害发生。自20世纪以来诸多单位及学者^[9-12]开展过长江口咸潮入侵规律或机理研究,取得了不少成果,为长江口水资源开发利用尤其是苏沪地区水源地建设与安全保障提供了技术支撑。

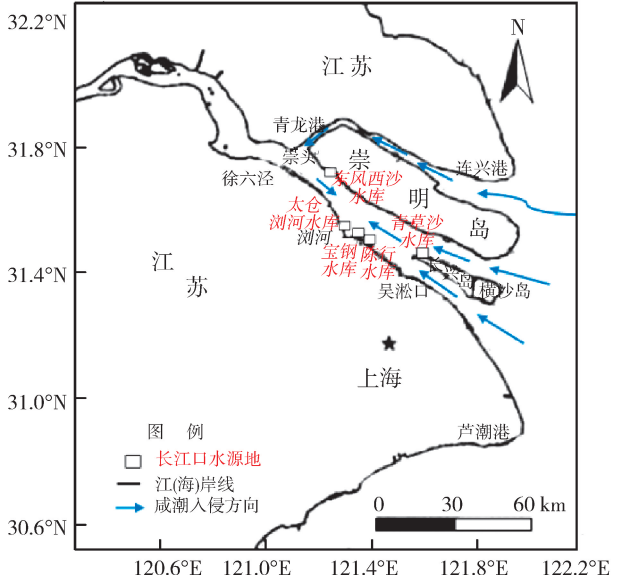


图1 长江口水源地分布及咸潮入侵途径示意图

1.2 咸潮入侵发展态势

a. 水源地咸潮入侵影响概况。咸潮入侵亦称为咸水(或盐水)入侵,是长江口淡水资源开发利用的最大制约因素^[6,9-10]。长江口咸潮一般发生在冬春枯水季节(11—4月),持续时间约6个月。每逢枯水期,长江口苏沪地区水源地在一定时段内都会受到咸水入侵的威胁和影响,其持续时间一般5~7 d,多则10 d。陈行水库自建成后1994—2014年共有125次咸潮入侵(该水库最早建库,咸潮资料齐全,其统计详见表1),其中,1998年长江流域大洪水后的1999—2008年间发生咸潮入侵最大次数为13次,每年入侵总天数最高达近80 d,年平均近54 d;2009—2014年咸潮入侵最大次数达12次,每年入侵总天数最高也在48 d左右,年平均达29 d^[11]。宝钢水库咸潮入侵情况与陈行水库接近;浏河、青草

统计时段	咸潮发生的次数/次			咸潮经历时间/d		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1994—1998年	4	0	2.2	31	0	11.8
1999—2008年	13	3	8	79	15	53.8
2009—2014年	12	0	5.5	48	0	29

沙、东风西沙水库建库及运行时间短,咸潮入侵情况稍好,但有待进一步观测。

b. 近年咸潮入侵新特点^[12-14]。主要表现为北支咸水倒灌及外海正面袭击双重显著增强的趋势,尤以2013—2014年冬春季的咸潮出现历时超常规入侵灾害,其主因包括上游径流量减小(月均值仅为11 500 m³/s,较前3年同期值均低)、潮动力增强(盐锋较一般年份上移超过30 km)、风应力作用强势(历经14 d 偏北大风影响)以及河口河势河床变化(河口深水航道建设等)等综合影响。

2 长江口水源地咸潮入侵影响因素

影响长江口水源地咸潮入侵程度的因子众多,但可归类为自然水情因素和工程工情因素,二者互相作用与影响,导致河口咸情异常复杂多变。

2.1 潮汐强弱

潮汐强弱是影响河口水域咸潮入侵强弱的关键因素之一^[8,14-15]。长江口受东海潮汐及喇叭形口门形态影响,潮汐呈现南北支及南北港等区域(段)时空分布不均的独特变化特征,尤其东海潮汐强弱直接影响长江口咸潮强弱。中等强度的非正规半日潮型潮汐及外宽内窄的长江河口导致其潮流量巨大。研究^[15]表明:一般情况下(即上游平均径流量及口外为平均潮差时)进潮量可达年平均径流量的9.2倍;若同时考虑风力助推影响,两个全潮进潮量可达60亿m³左右。长江口如此巨量潮流裹挟高盐度潮水入侵至口门内,与上游径流量的叠加作用必然会严重影响长江口区的盐度分布状况(上溯距离、盐度三维分布及持续时长等),但一般汛期上游径流量大于3万m³/s时,河口区基本为淡水区;而枯水期日均流量小于1.5万m³/s时,咸潮强劲则会大大增加咸潮入侵风险和入侵程度。

2.2 径流大小

河口上游径流大小是影响河口水域咸潮入侵强弱的另一关键因素,两者相关性特征已经被诸多研究^[8,16-18]所证实。长江干流径流量对长江口咸水入侵的影响呈现出中、大时间尺度的丰枯期(年或季)

变化特征,且其间小时间尺度的径流与潮流相互作用又会导致河口咸潮入侵的强度和入侵距离的多变性、复杂性。一般在长江汛期(每年6—8月)径流量大,其相对于长江口门外潮汐潮动力占优,咸潮弱,河口区则几乎为淡水所控制;而在非汛期(尤其在枯季冬春11—4月)情况则相反,径流量小而潮流量占优,河口区冲淡水不断减少,咸潮入侵时有发生。有研究^[8,15-16]发现,长江大通站流量在不大于1万m³/s或不小于1.5万m³/s时,长江口区咸潮存在严重入侵或基本免遭咸潮侵扰的典型或临界特征,盐度与枯季月平均流量或某日径流量持续时长有关。

2.3 气候气象变化

气候气象要素(风矢、降雨径流等)变化也是影响河口咸情大小的重要因素^[11,19-22]。小尺度气候气象主要是河口区域的季风变化导致的风应力或风矢量变化,中尺度气候气象可指长江流域范围内气候改变导致降雨条件及径流量变化(中尺度影响可归于径流大小影响因素类),而大尺度气候气象则是指全球气候变化影响等。

2.3.1 风矢量的影响

风情对咸潮入侵的影响可认为小时间尺度的影响,主要表现在不同风矢量(即风速与风向)作用于河口区潮汐涨、落潮流,从而影响原有潮汐规律的强弱乃至咸潮入侵程度。风矢量与涨落潮流相向为正影响(助推助长作用),逆向则为负影响(延缓滞迟作用)。不同风矢量可以产生不同的水平环流,由此对河口咸潮入侵产生一定的影响。有学者^[19-20]对枯季北风产生的向岸埃克曼(Ekman)输运、偏北风产生的北港咸潮入侵加强和南港及以下河段的咸潮入侵有所减弱等进行过一定探索,发现影响程度从大到小依次为正北风、西北风、东北风,入侵强度呈现随风速增加而产生非线性增大的效果。

2.3.2 海平面上升影响

海平面变化对长江口咸水入侵的影响为大尺度气候变化范畴,主要是通过外海(尤其黄海及东海区)平均潮位变化导致高盐水潮汐进出河口区的强弱不同,从而影响该区的冲淡水分布状况^[8]。近百年来全球气候变暖导致海平面一直不断上升,其中中国沿海1980—2017年海平面上升速率为3.3mm/a,高于同期全球平均水平;2017年中国沿海海平面为1980年以来的第4高位,高海平面发展趋势必将加剧中国沿海尤其长江口咸潮入侵等灾害^[21]。另有研究预测^[11,22],海平面上升使长江口上海地区的咸潮入侵影响程度呈加剧态势。

2.4 工程工情演变

工程工情演变对河口咸情程度的影响亦不可小

视。自20世纪80年代以来,长江干流及长江口成为人类活动或人为干涉极其频繁且严重的水域,沿江大中型跨江或河口桥梁、航道及港口、滩涂圈围、三峡水利枢纽工程和南水北调工程以及其他各级各类涉水工程的蓬勃发展,严重影响干流来水规律及河口地形地势,最终导致河口径流和潮汐潮流态势发生巨大变化,且以加剧河口水域咸潮入侵程度的负面影响为主。不少研究^[23-25]表明,三峡水利枢纽工程及南水北调工程直接改变了长江的入海径流量,其季节性水资源配置已经并将持续改变长江口咸潮入侵情势,尤其对枯水期的影响更为严重。另外,工程工情管控调控及流域相关单位水资源开发利用的组织管理成效也是影响河口咸潮入侵态势的不可或缺的重要因素,也是未来加强长江口咸潮应对需要考虑的重要方面。

3 长江口水源地咸潮灾害应对措施

基于长江口水源地咸潮入侵影响因素的分析,可从调控长江干流或长江口自然水情因素、工程工情因素等入手,通过工程技术与非工程管理举措,减轻长江口水源地咸潮灾害影响程度。其中,工程技术举措包括监测监控、预测预报、预案预警等手段;非工程管理举措包括责权利相关方(主客体)职责明晰、组织管理模式(体制机制)等。

3.1 工程技术举措

3.1.1 监测监控

应对长江口咸潮,必须全面开展和加强对长江干支流水文水情与水资源调控工情,长江口区及口门外潮汐及咸潮咸情、区域气候气象风情等关键要素的实时监测监控,为后期预报预测各要素变化趋势提供模型模拟的基础校验支撑数据,尽早研判或预判其发展态势和咸潮入侵程度等。监测监控工作须完善相关监测监控设备设施,优化布局,实现各要素情势的有效监控与信息平台实时化、智能化、智慧化。

3.1.2 预报预测

基于长江口咸潮影响要素的当前或近期的动态变化数据,采用经校验的各影响要素预测模型,开展对应要素发展态势的预测与预报,为长江口咸潮应对预警的形势判别及应急响应预案行动等级提供决策依据。须加强对长江干支流及河口水域的水文水情与水资源调控工情、长江口及其邻近水(海)域的气象风情、长江口及其邻近水(海)域的咸潮咸情等要素的预测与预报。

3.1.3 预警预案

a. 预警要素设定。预警要素包括预警等级设定及预警指标选取。首先,基于历史咸潮灾害影响

案例及影响程度,设定一定预警等级(一般取4级)以及对应的应对响应行动预案。其次,根据代表性或典型性指标来分析决策与确定预警等级,保证该预警指标及其等级判别依据尽可能简洁、方便、高效。如长江口咸潮灾害预警指标可选择长江干流来水量、长江口某些代表性或典型性站点咸潮指标、长江口水源地取水口咸潮持续时间等。

b. 应急响应行动预案。根据人为可控或可减(延)缓咸潮灾害程度的对策措施,应急响应行动分外部应对和内部应对两方面。外部应对:加强长江干流流量调控、增加枯水期上游来水量,是应对长江口水源地咸潮灾害最直接、最有效、最便捷、最可靠的方式。长江干流及其支流上的引排水闸、泵站及水电站等水利工程设施是调控长江口径流量(来水量)的重要控制工程,通过一定的组织协调程序,按照一定的技术调控手段与步骤,即可达到长江口上游来水量有效调控的目的。内部应对:主要是加强长江口咸潮灾害所影响地区(即苏沪两地城市(镇))的水资源配置或保障设施的进一步优化增能、智能化调控、节水型社会建设、省(市)际联动调水等举措,来减轻或延缓灾害的危害面和危害程度,以保障与满足区域生产、生活、生态用水需要。

3.2 非工程管理举措

3.2.1 责权利相关方(主客体)职责

明确长江流域水资源开发、利用、保护与管理等的责权利相关方,长江口水源地咸潮灾害应对的组织管理体系包含组织实施方、流域或区域组织协调方(如长江、太湖流域有关水患灾害防御组织协调部门)、流域或区域水资源监控调控技术支持方(如长江、太湖流域及沿线地方水文水利部门)、水利水电建管运营方(如三峡集团、国家电网公司等)、区域水资源开发利用方(如苏沪等省市水利水务部门)等主客体对象,并明确长江口咸潮应对各责权利相关方对应的职责。

3.2.2 组织管理模式

当枯水期长江干流来水量减少、长江口咸潮入侵形势紧迫时,组织协调好长江上中下游各水利水

电建管运营及水资源开发利用单位的关系,形成统一指令,实施全流域水情调度与调控,增加长江干流下泄流量,达到“冲咸保淡”的目的和效果,这就需要强有力的组织管理体制和机制,必须明确各相关单位服从长江口咸潮应对期的组织体系的管理,建立一套应对咸潮灾害的应急响应行动预案或方案,制定各级预警和应急响应期的应对措施与行动方案,各主客体遵守各自对应的统一调度与调控指令,保障预案顺利实施。

4 长江口水源地咸潮应对预案体系框架

长江口咸潮影响因素复杂面广,涉及的领域包括行政、技术、工程、行业或社会组织等。长江口水源地咸潮应对体系包含组织(审批监督与组织实施)体系、监测体系、预报体系、预警体系、应急响应体系、保障体系等。

4.1 组织体系

根据预案相关架构和实施管理要求,长江口水源地咸潮应对预案的组织体系拟由批准及监督机构、组织实施机构、配合实施部门和单位组成(图2)。批准及监督机构为预案的管理与监督部门。基于我国水患防灾减灾的管理体制,本预案的管理与监督部门为国家防汛抗旱总指挥部(以下简称“国家防总”),由其负责预案的审批、管理和监督。组织实施机构为预案的具体组织落实与实施的部门。经责权利相关分析,该部门为长江防汛抗旱总指挥部(以下简称“长江防总”)和苏沪两省(直辖市)防汛抗旱指挥部(以下简称“苏沪防指”),由两单位按照各自的流域或行政区职能分别组织预案的实施。配合实施部门和单位主要为预案落实与实施关系比较密切或影响较大的其他部门或单位。经对流域涉水事水权相关单位属性与特性分析,其他部门或单位包括:①区域流域管理机构,即太湖流域管理局,其根据黄浦江上游水源切换需要,及时调控太浦河泵闸的供水流量,按照调度要求调控引江济太工程的引水流量;②长江干流四川以下至安徽共7省(直辖市)防汛抗旱指挥部门(以下简称“防

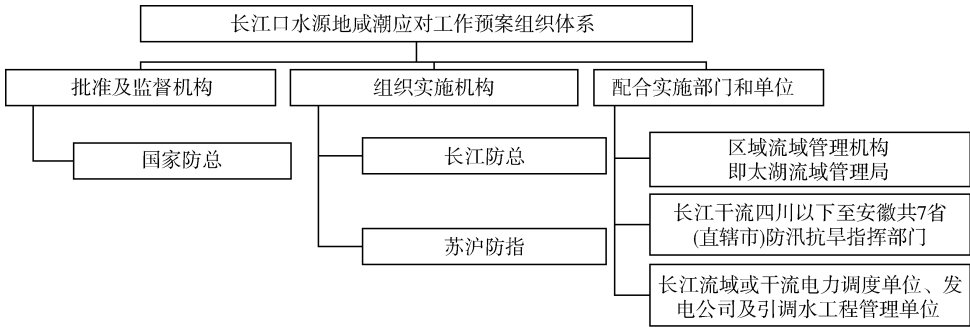


图2 长江口水源地咸潮应对工作预案组织体系

指”) ,其中长江下游的江苏、安徽等省防指按照调度指令负责调控本辖区沿江引调工程的引水流量及辖区内应急调度的监督检查与突发事件的应对工作,其他长江中上游省(直辖市)防指则主要是按照调度指令做好水库调度等工作;③电力调度单位、发电公司及引调水工程管理部门,主要有长江上中游(含三峡)大中型国家与地方电网或水电开发公司、长江下游南水北调东线及引江济巢(太)等引调水工程管理部门,其中,前者按照调度指令控制水库下泄流量并合理安排电力生产和电网调度,后者按照调度指令调控沿江相关引调水工程的引水流量。

4.2 监测体系

a. 水文监测。基于对长江中下游干支流来水水情控制的需 要,水文监测系统主要布设于三峡至长江口的干流主要节点以及洞庭湖、鄱阳湖水系和清江、汉江、滁河、青弋江、水阳江等一级支流主要控制站 25 座。

b. 引调水监测。经综合研究,可主要对长江大通以下沿江设计引调水流量大于或等于 50 m³/s 的引调水工程进行监测。主要调水工程包括南水北调东线、引江济巢、泰州引江河、引江济太 4 座调水工程。主要沿江引水工程包括安徽省的裕溪闸、乌江抽水站 2 座和江苏省的南通节制闸、秦淮新河水利枢纽、谏壁抽水站等 8 座引水泵闸工程。

c. 咸潮监测。基于长江口现有咸潮 26 个监控点相关性比较,现阶段可纳入预案中实施长江口咸潮监测的站点确定为崇头、陈行水库取水口、青草沙水库取水口 3 个站点。

4.3 预报体系

a. 长江干流来水量预报。大通站和徐六泾站是长江下游来水流量管控的两个重要节点。两站来水流量预报应根据有关水文情报预报规范要求^[25]编制两站短(1~5 d)、中(6~20 d)、长(21~30 d)期水文预报方案。

b. 长江口咸潮预报。根据崇头盐度变化情况

并结合长江口潮汐规律,预测预报北支咸潮入侵对长江口 5 大水库取水口(浏河、宝钢、陈行、青草沙、东风西沙水库)的起始影响时间、结束时间、持续时间、影响强度等。

4.4 预警体系

参考上海市及国家有关水源地水质灾害事故应急预案,结合目前长江口水库冬季运行模式,长江口咸潮灾害预警等级由低至高可划分Ⅳ级(蓝色)、Ⅲ级(黄色)、Ⅱ级(橙色)、Ⅰ级(红色)4 级。经分析多年枯水期长江口咸潮监测数据与长江干流大通流量之间响应关系,确定大通流量、崇头盐度和水源地水库咸潮入侵影响时间共 3 个关键指标。①大通流量。经对 1979—2013 年大通实测日径流量进行 P-Ⅲ适线分析,并综合多年来上海市科学技术委员会及水务部门对大通流量与长江口水源地咸潮灾害的响应关系研究成果^[10-12]、陈行水库有效库容(或调蓄能力)和上海市供水调度管理相关实施方案,确定以 6 d、8 d、10 d、12 d 调蓄时间为等级,划分长江大通流量响应咸潮灾害预警的对应Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级指标,由此形成长江口咸潮应对大通流量预警指标体系方案,见表 2。表 2 中,方案 1 的大通流量分月预警指标,其中,考虑到长江干流枯水期径流的传播时间,核定预警条件时可取大通流量满足各等级对应流量下持续 6 d 为同步条件。另为了预案实施与管理工作的方便,经综合研究分析可简化表 2 中的分月大通流量预警指标而形成枯水期(12—3 月)平均流量预警指标为推荐方案 2,即对应于Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级大通流量预警指标分别为 1.5 万 m³/s、1.3 万 m³/s、1.2 万 m³/s、1.0 万 m³/s,持续时间同为 6 d。②长江口崇头盐度。上海市城投部门对崇头氯化物监测点多年积累数据分析及运行管理实践发现,当崇头 $\rho(\text{Cl}^-) \geq 500 \text{ mg/L}$ 并持续一段时间后(一般 24 h 中累计超过 8 h),在陈行水库取水口往往会有咸潮发生,若致较为严重的咸潮发生(如陈行水库连续 6 d 以上不可取水), $\rho(\text{Cl}^-) \geq 500 \text{ mg/L}$

表 2 长江口水源地咸潮应对预警指标组合一览

预警指标	大通流量/(m³·s ⁻¹)		崇头盐度持续时间/h		水库咸潮入侵影响时间/d	
	方案 1	方案 2	$\rho(\text{Cl}^-) \geq 500 \text{ mg/L}$	$\rho(\text{Cl}^-) \geq 1000 \text{ mg/L}$	陈行水库	青草沙水库
Ⅳ级预警	≤12 000(1 月)					
	≤14 000(12、2 月)	≤15 000	≥50(3 d 内)	≥10(3 d 内)	[6,8)	[12,16)
	≤16 000(3 月)					
Ⅲ级预警	≤11 000(1 月)					
	≤12 000(12、2 月)	≤13 000	≥80(5 d 内)	≥40(5 d 内)	[8,10)	[16,30)
	≤14 000(3 月)					
Ⅱ级预警	≤10 500(1 月)					
	≤11 000(12、2 月)	≤1 2000	≥140(7 d 内)	≥80(7 d 内)	[10,12)	[30,68)
	≤12 000(3 月)					
Ⅰ级预警	≤10 000(1 月)					
	≤10 000(12、2 月)	≤10 000	≥180(9 d 内)	≥100(9 d 内)	≥12	≥68
	≤11 000(3 月)					

的持续时间 3 d 内须达到 50 h 以上。经深入研究 2006 年以来历次(统计样本共 58 次)陈行水库咸潮影响时期在崇头监测点的不同咸潮持续影响时间的统计结果,且为与下文水源地取水口咸潮入侵安全时间(最长不可取水天数)预警指标相对应,经综合频率分析后推荐设定崇头 Cl^- 指标 4 级预警取值见表 2。

考虑到陈行水库和青草沙水库应对咸潮灾害、保障安全供水的实际能力与实践,经综合比较分析,笔者提出两大水库各自预警咸潮入侵影响时间:陈行水库大于或等于 6 d 或青草沙水库大于或等于 12 d,作为Ⅳ级预警以上条件;另外其他预警等级为,陈行水库取 8 d、10 d 和 12 d,或者青草沙水库取 16 d、30 d 和 68 d,即分别对应于Ⅲ级、Ⅱ级和Ⅰ级预警条件。长江口咸潮影响因素众多,经检验,单一预警指标很难判定咸潮灾害发生是否符合实际情况。结合上海市水务局及长江口水源地供水运行和管理部门多年来的实际运行管理经验,经综合比较分析前述三大指标在研判长江口咸潮入侵影响的权重关系,设定长江口咸潮应对预警条件为上述指标三者之二各自符合对应单一条件预警等级时,即可发布对应等级的长江口咸潮灾害预警^[12]。经比较方案 1 和方案 2 两种指标咸潮灾害发生组合频率分析结果,发现结论接近。经流域防总协调指导,也为了今后长江口咸潮应对工作简便,推荐方案 2 的枯季月平均大通流量指标为近期预案预警指标,远期结合预案实施情况可调整为方案 1 的分月大通流量预警指标方案。

4.5 应急响应行动体系

Ⅳ级应急响应行动以苏沪两地内部响应应对,保障青草沙水库和陈行水库原水系统不减量供应。Ⅲ级应急响应行动仍以苏沪两地内部响应应对,还包括节水措施,陈行水库原水系统部分减量供应等。Ⅱ级应急响应行动主要措施为长江防总开展沿江引调水工程的流量控制,做好主要水库的水量应急调度;太湖流域管理局视水源切换、黄浦江上游水源地水质及太湖水位、水质等情况,加大太浦河泵闸下泄流量;苏沪两地进一步加大长江口水域水库链(青草沙水库、陈行水库、宝钢水库和浏河水库)的联动及加强节水措施等工作,陈行水库原水系统部分减量供应。Ⅰ级应急响应行动主要措施为长江防总在控制沿江引调水工程流量的基础上,进一步做好三峡水库等主要水库的水量应急调度;太湖流域管理局继续加大太浦河泵闸下泄流量,进一步增加黄浦江上游水源地供水量;上海市实施青草沙水库原水与黄浦江上游原水部分应急切换,陈行水库原水系

统进一步减量供应,继续强化节水措施及启用部分战备或应急深井等。

4.6 保障体系

完善的保障体系将有助于顺利、高效地实施咸潮应对预案。长江口咸潮应对预案保障体系包括完善与加强技术保障、监督检查、资金保障、宣传培训保障、人才或人力资源保障、制度保障等。

5 结 语

基于对长江口咸潮入侵及其发展态势、水源地咸潮入侵影响因素及其灾害应对措施等的深入分析,研究并构建了长江口水源地咸潮应对预案的框架体系及相关要素或指标,进而对预案组织与职责、监测、预报、预警、应急响应、保障等体系进行了细化设计。但受当前预测预报的技术手段、水平以及实测与检验数据的限制,对长江流域水情与长江口咸情的中长期预报的精度和可靠性还存在不少难点或瓶颈问题,有待不断深入探索与实践校验。虽然长江入海口徐六泾站入海水量与长江口咸潮相关性最为密切,但鉴于当前河口流量分析技术与条件限制尚不能及时掌握与获取,有待未来潮流量分析手段更加先进与可靠后予以应用到咸潮灾害预警指标中。长江口河势及咸潮入侵态势复杂易变,尤其海平面上升对河口形态及潮汐潮型会形成持续影响,因此长江口咸潮入侵规律与机理研究仍需不断跟进。

参考文献:

[1] 卢纯.“共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “ Making Efforts to Protect the Yangtze River Together ” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (4): 283-295. (in Chinese))

[2] 王文鹏,陈元芳,刘波.长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):14-21. (WANG Wenpeng, CHEN Yuanfang, LIU Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (1): 14-21. (in Chinese))

[3] 肖成猷,沈焕庭.长江河口咸水入侵影响因子分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),1998(3):74-80. (XIAO Chengyou, SHEN Huanting. The analysis of factors affecting the saltwater intrusion in Changjiang estuary [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1998 (3): 74-80. (in Chinese))

[4] 徐建益,袁建忠.长江口南支河段咸水入侵规律的研究[J].水文,1994,83(5):1-5. (XU Jianyi, YUAN

- Jianzhong. The research on saltwater intrusion into the south branch of the Yangtze Estuary[J]. Journal of China Hydrology, 1994, 83(5):1-5. (in Chinese))
- [5] 茅志昌,沈焕庭. 潮汐河口咸水入侵类型探讨:以长江口为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1995(2):77-84. (MAO Zhichang, SHEN Huanting. Study on style of saltwater intrusion in tidal estuary: a example of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1995 (2): 77-84. (in Chinese))
- [6] 茅志昌,沈焕庭,徐彭令. 长江河口咸潮入侵规律及淡水资源利用[J]. 地理学报, 2000, 55(2):243-250. (MAO Zhichang, SHEN Huanting, XU Pengling. The pattern of saltwater intruding into the Changjiang Estuary and the utilization of freshwater resources [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (2): 243-250. (in Chinese))
- [7] 吴辉,朱建荣. 长江河口北支倒灌盐水输送机制分析[J]. 海洋学报, 2007, 29(1):17-25. (WU Hui, ZHU Jianrong. Analysis of the transport mechanism of the saltwater spilling over from the north branch in the Changjiang Estuary in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(1):17-25. (in Chinese))
- [8] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地咸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 counter-measures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3):19-24. (in Chinese))
- [9] 上海市水务局. 长江口北支咸潮倒灌控制工程及南支水源地建设专题研究总报告[R]. 上海:上海市水务局, 2004.
- [10] 上海市水务局. 长江口水源地咸潮控制和保障体系研究[R]. 上海:上海市水务局, 2010.
- [11] 上海市水务局. 海平面上升对城市防汛和供水安全影响的关键技术研究[R]. 上海:上海市水务局, 2013.
- [12] 长江防汛抗旱总指挥部,上海市水务局. 长江口咸潮应对工作预案研究[R]. 上海:上海市水务局, 2015.
- [13] 毛兴华,金云. 2014年初长江口咸潮入侵分析[J]. 上海水务, 2014, 30(2):40-43. (MAO Xinghua, JIN Yun. Analysis of saltwater intrusion in Yangtze River Estuary in 2014 [J]. Shanghai Water, 2014, 30 (2): 40-43. (in Chinese))
- [14] 陈泾,朱建荣. 长江河口青草沙水库咸水入侵来源[J]. 海洋学报, 2014, 36(11):131-141. (CHEN Jing, ZHU Jianrong. Sources for saltwater intrusion at the water intake of Qingcaosha Reservoir in the Changjiang Estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36 (11): 131-141. (in Chinese))
- [15] 丁磊,窦希萍,高祥宇,等. 长江口咸水入侵研究综述[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京:海洋出版社, 2013:1042-1046.
- [16] 陶建峰,齐华萍,曹利利,等. 长江入海径流变化对河口盐水入侵影响分析[J]. 中国科技论文, 2014, 9(11):1233-1236. (TAO Jianfeng, QI Huaping, CAO Lili, et al. Analysis on the impact of runoff variation on saltwater intrusion in Yangtze River Estuary [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(11):1233-1236. (in Chinese))
- [17] 王青,吕紫君,孙杰,等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策[J]. 水资源保护, 2018, 34(5):50-56. (WANG Qing, LYU Zijun, SUN Jie, et al. Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):50-56. (in Chinese))
- [18] 王青,叶荣辉,汪玉平,等. 珠江口盐度预测统计模型[J]. 水资源保护, 2018, 34(6):82-87. (WANG Qing, YE Ronghui, WANG Yuping, et al. Statistical model for salinity prediction in Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):82-87. (in Chinese))
- [19] 曹永强,袁立婷,王飞龙. 基于文献计量学的洪涝灾害研究现状及发展趋势分析[J]. 水利经济, 2018, 36(4):33-39. (CAO Yongqiang, YUAN Liting, WANG Feilong. Current research situation and development trend of flood and waterlogging disasters based on bibliometrics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 (4):33-39. (in Chinese))
- [20] 朱建荣,傅利辉,吴辉. 风应力和科氏力对长江河口没冒沙淡水带的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008(6):1-8. (ZHU Jianrong, FU Lihui, WU Hui. Impacts on wind stress and Coriolis force responses to fresh water of Zone of Momaosha in the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2008(6):1-8. (in Chinese))
- [21] 中国国家海洋局. 2017年中国海平面公报[M]. 北京:中国国家海洋局, 2017.
- [22] 杨桂山,朱孝文. 全球海平面上升对长江口咸水入侵的影响研究[J]. 中国科学:B辑, 1993, 23(1):69-76. (YANG Guishan, ZHU Xiaowen. Impacts of the rising seawater level in the globe on the saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Science in China: B, 1993, 23(1):69-76. (in Chinese))
- [23] 谭培论,汪红英. 三峡、南水北调工程对长江口咸潮入侵影响及对策初步研究[C]//首届长江论坛论文集. 武汉:水利部长江水利委员会, 2005:261-267.
- [24] 朱慧峰,阮仁良,陈国光,等. 三峡水库运行调度对长江口水源地安全的影响分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(8):34-36. (ZHU Huifeng, RUAN Renliang, CHEN Guoguang, et al. Influence of Three Gorge Reservoir operation on water source safety in Yangtze River Estuary [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(8):34-36. (in Chinese))
- [25] 张幼成,李琼,徐汪洋,等. 基于导向标准断面法的受冲淤影响洪峰水位预报模型[J]. 水资源保护, 2019, 35(3):53-56. (ZHANG Youcheng, LI Qiong, XU Wangyang, et al. Forecasting model of flood peak water level affected by scour and silt based on guide standard section method [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3):53-56. (in Chinese))

(收稿日期:2018-11-15 编辑:彭桃英)