

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.005

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

陈祖军

(上海市水务规划设计研究院, 上海 200233)

摘要:在简述长江口水源地主要影响要素与特性的基础上,对三峡水库运行以来长江大通水文站年径流量、月径流量的变化规律进行了简析,发现长江下游仍呈现典型丰、平、枯水年特征,其季节变化规律也十分显著。同时对后三峡工程时代的长江口水源地盐水入侵特征进行了研究,结果表明,枯水期水源地咸潮入侵与其发生首日的大通水文站前6日日径流量相关性相对较好;影响期一般在农历九月至来年四月间,尤以二月最为严重;各月呈现出以初八和廿二为“双驼峰”型的氯化物质量浓度峰值分布特性。提出了进一步减轻长江口水源地对上海水源地供水安全影响的建议,包括采取加强流域与区域信息资源共享、北支控制工程联建、长江口水源地(水库群)联动开发等措施。

关键词:后三峡工程时代;长江口水源地;盐水入侵;城市供水安全

中图分类号:P336 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)03-0019-06

Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures

CHEN Zujun

(Shanghai Water Planning and Design Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on the main impact factors and features of saltwater intrusion in the Yangtze Estuary, the variations of the annual and monthly average runoff at the Datong Hydrological Station on the Yangtze River since the beginning of operation of the Three Gorges Reservoir were analyzed. The characteristics of typical wet years, normal years, and dry years are shown in the lower reaches of the Yangtze River with significant seasonal variations. Meanwhile, the features of saltwater intrusion into the water source zone in the Yangtze Estuary in the era after the beginning of Three Gorges engineering were studied. The results show that, in dry seasons, the saltwater intrusion into the water source zone had a relatively close correlation with the daily runoff at the Datong Hydrological Station six days prior to the first day on which the intrusion occurred. The impact of saltwater intrusion can usually be seen from September to the following April, and especially in February, according to the Chinese lunar calendar. The chloride concentration peak showed a double hump-shaped distribution on the 8th and the 22nd of each lunar month. Some suggestions are given for reducing the impacts of saltwater intrusion in the Yangtze Estuary on the water supply safety in the water source zone of Shanghai City. These suggestions include promoting cooperation and sharing of information between river basin administrations and local departments, jointly building the controlling projects on the north branch of the Yangtze Estuary, and co-developing the water source zones (reservoirs) in the Yangtze Estuary.

Key words: post-Three Gorges engineering era; water source zone in Yangtze Estuary; saltwater intrusion; urban water supply safety

上海市濒江临海,位于长江及太湖两大流域下游的典型平原感潮河网地区,长江、黄浦江、吴淞江穿境而过,为上海市带来相对丰沛的水资源。但是,

由于上游江河沿岸地区水资源过度开发利用及水污染控制措施不力等诸多原因,上海市优质水资源长期不足,该状况一直困扰着上海市历届政府及其有

关管理部门。为保障地区城乡经济社会发展用水安全,上海市城市水源地几经变迁,至2010年长江口青草沙水库建成运营以来,上海市城市饮用水安全保障已由以黄浦江为主、长江为辅的两大水源地供水局面转变为以长江为主、黄浦江为辅的“两江并举”供水格局,长江口水源地将是未来上海市经济社会高速发展及社会和谐稳定的重要支撑和战略保障。目前长江口陈行水库、青草沙水库及正在建设中的东风西沙水库因均处于典型河口水域,水质(本文特指氯化物质量浓度)的好坏与盐水入侵状况息息相关,丰水期水库原水基本无碍,但枯水期经常遭受盐水入侵的威胁,严重时会造成区域断水,对部分地区的生产与生活造成较大影响。笔者以后三峡工程时代陈行水库(该库建成运行时间较长,相关资料全面)水源地盐水入侵为例,分析自2003年底三峡水库运行以来长江口水源地盐水入侵出现的一些新特征,并提出几点建议,旨在为相关部门加强长江口水源地的运营保障提供技术参考。

1 长江口水源地盐水入侵的主要影响因素

长江口独特的地理地形及其复杂的河口水系特征,导致长江口水源地盐水入侵的影响因素众多,变化规律也十分复杂。上海市长江口水源地分布见图1。诸多研究表明,长江口水源地盐水入侵的主要影响因素包括上游径流量、外海潮汐、河口地势及其演变、气候气象、海平面变化等^[1-7],综合反映在径流量和潮流量的此消彼长上,其叠加作用决定了长江口水域盐水入侵状况及对长江口水源地供水安全的影响程度。

1.1 径流量

径流量对长江口盐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。长江口水域氯化物质量浓度的年际与年内的分布及其变化与长江干流径流量关系甚为密切,径流量包括年径流量、月径流量和日径流量等。已往研究文献或资料^[4-5]表明,长江大通水文站枯水期流量偏小,流量在 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,长江口各代表水文站(点)的氯化物质量浓度都普遍升高,如1978—1979年、1984年、1987年、1993年;流量在 $13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,河口各代表水文站(点)的氯化物质量浓度都普遍下降,如1982年、1983年、1989年;流量在 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,吴淞口、高桥基本免遭咸潮侵扰,其余各站氯化物质量浓度也大幅度降低,如1990年、1991年、1995年。另外,也有研究发现,长江口水域氯化物质量浓度还与枯季月平均流量或咸潮前某日径流量有关。详细成果可参见文献^[2,8]。

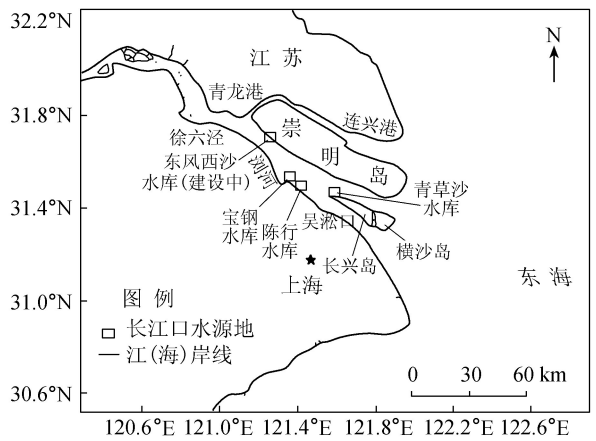


图1 长江口水源地分布

1.2 潮汐

潮汐对长江口盐水入侵的影响呈中小时间尺度的周期性影响特征。长江口水域潮汐受天文潮影响显著,既呈现半日非规则潮汐特征,也呈现朔望潮汐等长周期特征。研究表明^[2,4],长江口盐水入侵与潮汐规律相对应,也存在朔望变化规律,即呈现半月中出现大潮和小潮各一次,日平均氯化物质量浓度值也会出现一个高值区和一个低值区;同时,随着半日潮涨潮落的日潮周变化规律,长江口氯化物质量浓度也会出现与潮汐关系密切的涨憩落憩氯化物质量浓度峰谷值。

1.3 河势变化

由于河口在空间上的地形地势不断演变,导致河口区域水动力特征在径流与潮汐共同作用下不断变化,相应也引起盐水入侵规律的随之改变。河势变化对长江口盐水入侵的影响表现在空间尺度上。这些空间尺度因素主要包括:①沿江沿海滩涂围垦及水土资源开发利用改变了河口区岸线形态,河口潮流流态也随之改变,潮差位相等潮汐动力特征也发生显著变化,并伴随盐水运移规律与特征的改变;②由于长江口深水航道整治,河槽加深,涨落潮流随之增大,造成盐水入侵加剧^[9];③长江口北支整治工程使北支河槽不断萎缩,北支口的潮差加大,涌潮加剧,致北支高盐水倒灌南支现象进一步增强^[6]。

1.4 气象

气象也是影响河口盐水入侵程度的重要因素之一。有研究^[10]发现,对长江口盐水入侵影响最大的因素是风向和风力。在大潮期,当长江口风向为东风或偏东风时,风向与涨潮流向一致或基本一致,当风力达到一定级别时,极易导致风助潮涌,长江口外海的高盐水就会顺势向西上溯,其中一股分别经南槽、北槽汇至南港、北港,进入南支,构成盐水上溯入侵;另一股则经北支上溯至崇头倒灌入南支,构成倒灌入侵(以盐水团形式)。两股入侵盐水的共同作

用形成对南支水源地双重盐水入侵的影响,使长江口南支沿线氯化物质量浓度呈现“两头高、中间低”或“两头低、中间高”交替分布的特征。实际监测表明,若风向与涨潮流同向,且风力越大,北支青龙港初形成的涌潮就越厉害,盐水倒灌南支就会越严重,加剧盐水入侵的强度和持续时间;反之,则盐水入侵程度大为减弱。一般规律显示,长江口偏东风,且风力为5级以上时,气象对北支盐水倒灌南支形成明显加重的影响。

1.5 海平面变化

海平面变化对长江口盐水入侵的影响为大时间尺度的影响,主要体现在通过外海平均潮位的变化导致外海的高盐水随涨落潮流进出河口区域强弱程度的变化,从而影响到该区冲淡水的分布^[11-12]。外海海平面上升,将增大涨落潮的潮汐水动力,从而增大高盐水入侵近海及河口区的程度;反之,则降低外海高盐水入侵的程度。近100年来,全球气候变暖导致海平面不断上升是不争的事实。近年来,《中国海平面公报》也显示中国沿海海平面的变化总体呈波动上升的趋势。据分析,1980—2011年,中国沿海海平面平均上升速率为2.7 mm/a,高于全球平均水平,预计到2050年,上海沿海海平面将比常年升高145~200 mm^[13]。因此,海平面上升将是长期影响长江口盐水入侵潜在而重要的因素。

2 后三峡工程时代长江下游干流径流量变化特征

2.1 年平均径流量

自2003年三峡水库正式蓄水运行以来,长江大通水文站的年平均径流量与三峡工程建成之前一样,仍呈现典型丰、平、枯水年特征(图2)。除2010年和2012年的年平均径流量分别为32407 m³/s和31640 m³/s,为典型丰水年外,其余年份的年平均径流量均在30000 m³/s以下,且多为25000 m³/s以下,属于平水年型和枯水年型,其中2006年和2011年的年均径流量分别仅为21925 m³/s和21154 m³/s,接近于历史最枯年份1978年(该年径流量为21400

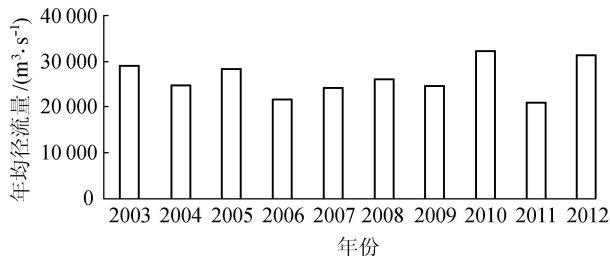


图2 后三峡工程时代长江大通水文站
年均径流量变化态势

m³/s)。1978年的下泄通量为7670亿m³,来水保证率约为近50年来枯水期流量的97%,而且长江口外海盐水严重入侵,围困崇明岛达3个月之久,严重影响了岛域居民的生产生活用水。

2.2 月平均径流量

长江三峡水库运营至今,长江大通水文站月平均径流量的季节变动规律显著,呈现丰水期和枯水期典型特征(图3),其中,丰水期月均径流量超过30000 m³/s的月份多集中在6—9月,如2007年、2008年,少数年份前后延长1个月,即5—10月间,如2003年、2005年、2009年;枯水年的丰水期相对平水年减少1个月,如2006年为5—7月,2011年为6—8月。枯水期月均径流量低于15000 m³/s的月份多集中在12—2月间,如2005—2006年枯季,2011—2012年枯季,部分年份也会或前展或后延长1个月,即11—2月或者12—3月,如2003—2004年枯季、2009—2010年枯季;2006—2007年枯季时间最长,为10~2月;最短的枯季年份有2008—2009年、2010—2011年,枯季发生时间为1—2月或2—3月。

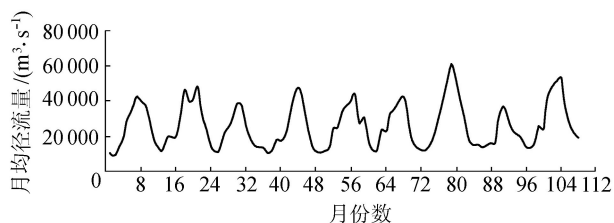


图3 后三峡工程时代长江大通水文站月均径流量
变化态势(2004年1月—2012年12月)

3 后三峡工程时代长江口水源地盐水入侵特性分析

对三峡工程建成后的2003—2011年长江口陈行水库取水口盐水入侵情形进行分析研究,发现其盐水入侵次数达到49次,总入侵天数达到378 d。

3.1 径流量对盐水入侵程度的影响

3.1.1 日径流量与盐水入侵的关系

考虑到潮汐往复流对径流量数据可靠性的影响,在开展长江口盐水入侵研究中,通常不直接利用距离河口最近的徐六泾水文站的相关数据,而是利用长江干流上位于潮区界之外不受潮汐影响的大通水文站径流量数据。据有关研究^[14],徐六泾水文站和大通水文站之间对应的日径均流量和月均径流量(或净泄流量)存在良好相关性(相关系数 $R^2=0.92$),其中,两站的日均径流量过程总体上基本一致,徐六泾水文站的流量过程略滞后一些,且徐六泾水文站流量峰值出现的时间较大通水文站滞后约5 d。

笔者分析研究长江三峡水库运行至今的枯水

期,长江口水源地咸潮发生首日的大通水文站前5 d、6 d、7 d 和此3 d 的平均径流量分别与长江口水源地取水口盐水入侵的关系,结果表明:①大通水文站前6 d 的日径流量与长江口盐水入侵影响程度的相关性好于前5 d 和前7 d 情形;②日径流量对长江口盐水入侵影响严重(按照上海市城市供水水质指标及国家地表水水质标准,以水源地原水氯化物质量浓度大于250 mg/L 为不合格水源或盐水入侵水源,下文同)的情形主要集中在20 000 m³/s 以下流量的区间,个别甚至在27 500 m³/s 流量时也有影响;③前6 d 的邻近3 d 平均径流量与长江口盐水入侵的相关特性与前6 d 的径流量下的盐水入侵关系趋近(图4)。

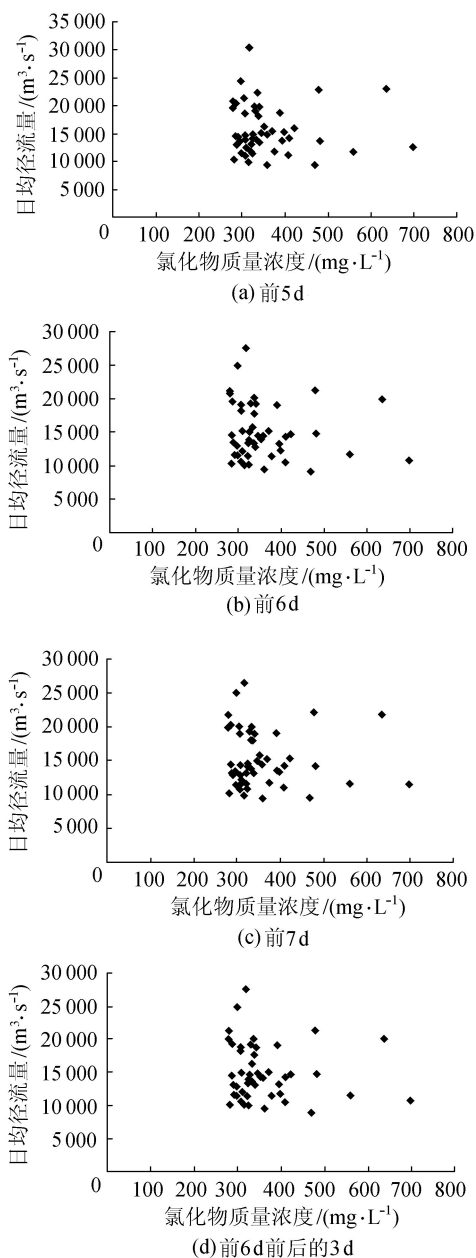


图4 枯水期长江口咸潮发生前大通水文站多日的日均径流量对水源地取水口盐水入侵的影响

3.1.2 月径流量与盐水入侵的关系

长江三峡工程运行至今的枯水期长江口咸潮期当月的大通水文站月均径流量与水源地取水口盐水入侵的影响关系表明,大通水文站月均径流量对长江口盐水入侵影响严重的情形主要集中在25 000 m³/s 以下流量区间,个别甚至影响到30 000 m³/s 左右流量的区间(图5)。统计盐水入侵期氯化物质量浓度最高达1 648 mg/L,而当月径流量为11 739 m³/s。

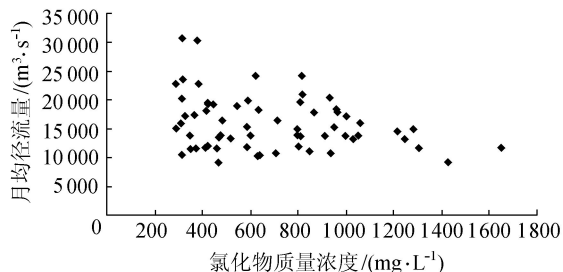


图5 大通水文站枯水期咸潮发生当月的径流量对长江口盐水入侵的影响关系

3.2 潮汐对盐水入侵程度的影响

长江口枯水期盐水入侵的重要因素是口门外潮汐。长江河口进潮量十分巨大,据资料统计,若上游径流量接近年平均流量,口外为平均潮差,则河口进潮量可达到266 000 m³/s,为年平均径流量的9倍^[2]。口门外高盐度潮水伴随着如此强度的潮汐,会上溯入侵到长江口门内,与上游径流量共同影响长江口水域的盐度分布状况。若上游径流量大,则潮汐导致长江口盐水入侵程度会小,一般在长江干流丰水期(日均径流量通常在30 000 m³/s 以上)会呈现该特征,长江口水域基本属于淡水区域;若上游径流量小,则潮汐导致长江口盐水入侵程度加大,尤其在长江干流枯水期(日均径流量通常在15 000 m³/s 以下),长江口水域盐水入侵几乎每年均有发生,少则数次,多则十几次,且每次持续时间也会因上游来水量低而延长。

经对三峡工程运行以来长江口盐水入侵程度及其发生时间(以农历日计)的统计分析,呈现如下规律(图6):①农历九月至来年四月是长江口水源地盐水入侵高发期;②以农历二月盐水入侵发生频率最高,农历一月和三月发生频率次之,九月和来年四月发生几率最小;③盐水入侵影响程度最大期间主要发生在农历一月下旬至二月,其氯化物质量浓度超过1 000 mg/L 几率明显增大,而三月偶有超过该值;④农历九月至十一月上旬、来年农历四月的氯化物质量浓度通常不会超过700 mg/L,但在盐水入侵高发期的农历一月上旬,该特征也有呈现,较为反常;⑤在一个农历月周期内,即上半月农历初八前后和下半月农历廿二前后,盐水入侵的几率最大,入侵

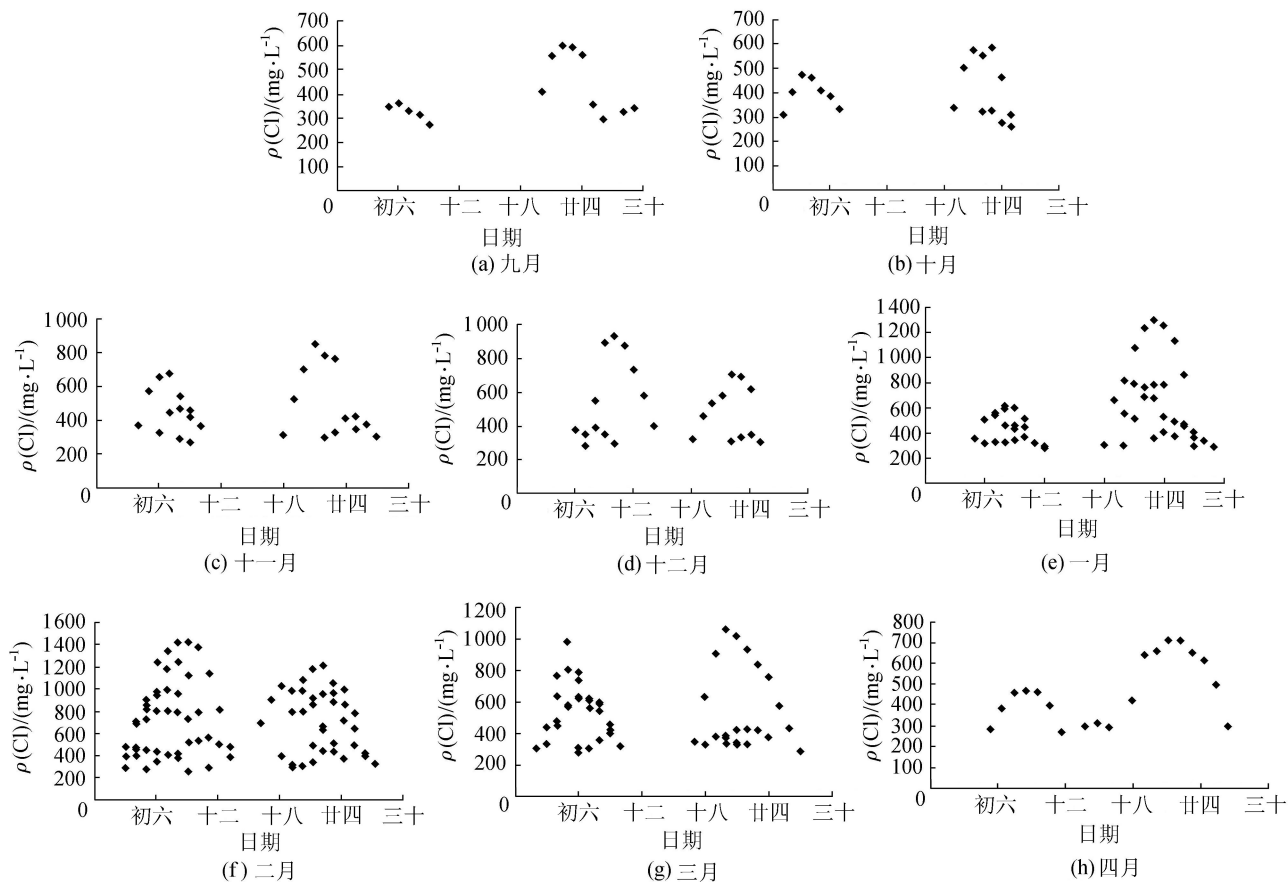


图6 三峡工程运行以来枯水期农历各月长江口陈行水库取水口盐水入侵状况分布

程度最严重,大致呈现出分别以农历初八和廿二为氯化物质量浓度峰值的“双驼峰”型。

4 结论与建议

4.1 结论

影响长江口水源地盐水入侵的因素较多,主要包括长江径流量、外海潮汐、区域地形地势演变、气象条件、海平面变化等,这些因素的影响综合反映在径流量和潮流量的此消彼长上。径流量和潮流量的双重作用决定了长江口水域盐水入侵状况及其对长江口水源地安全供水的影响程度。对后三峡工程时代长江径流量和潮汐对长江口水源地盐水入侵影响进行分析研究,主要结论有:①长江大通水文站年平均径流量变化呈现典型丰、平、枯水年特征,其月均径流量的季节变动规律也十分显著,其中,丰水期多集中在6—9月间(月均径流量超过30 000 m³/s),枯水期多集中在12—2月间(月均径流量低于15 000 m³/s);②枯水期长江口水源地咸潮入侵与其发生首日的大通水文站前6 d日径流量相关性相对较好,影响严重期为日径流量在20 000 m³/s以下、月均径流量则在25 000 m³/s以下的时段;③长江口盐水入侵程度与枯水期农历月和农历日相关性密切,且一般发生期在农历九月至来年四月间,尤以农历

二月盐水入侵发生频率最高,农历一月和三月发生频率次之,九月和来年四月发生几率最小;④盐水入侵影响程度最大的月份在农历一月下旬至二月,氯化物质量浓度超过1 000 mg/L的几率明显增大;⑤在一个农历月周期内,以上半月农历初八前后和下半月农历廿二前后为盐水入侵几率最大和入侵程度最严重的时期,即大致在农历初八和廿二呈现氯化物质量浓度峰值的“双驼峰”型。

4.2 建议

长江口盐水入侵对上海水源地供水安全产生影响将是长期存在的问题。掌握长江口盐水入侵规律及盐水入侵对城市水源地的影响,顺势而为,通过有效防控,可将盐水入侵对上海市城市供水安全的影响降低到最小程度。建议可从如下几点加以防控。

a. 加强与流域、区域(指苏沪两省市)相关部门或单位协作,全面收集并综合分析长江口南北支相关监测站点氯化物质量浓度随潮流径流变化的资料与相关文献,发挥技术力量和资源信息共享与整合优势,进一步全面、系统性了解该水域盐水入侵(含盐水倒灌)的规律;

b. 流域机构联合区域(指苏沪两省市)地方政府加快建设长江口咸潮控制工程措施,有效解决北支咸水入侵(倒灌)南支而影响水源地水质问题^[15];

c. 加强与流域机构对水资源综合规划的沟通、协调与落实,保障长江口枯季“冲淡压咸”生态用水需要,在大通水文站日均径流量低于 $20000\text{ m}^3/\text{s}$ 或月均径流量低于 $25000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,流域要加强水资源综合调度,控制盐水入侵,以有效保障上海市城乡生产、生活供水的安全;

d. 关注长江口盐水入侵的周期性特征,加强长江口水源地(水库群)的资源整合和联动开发,以尽可能最大限度地规避盐水入侵对供水安全产生的风险。

致谢:上海市供水调度监测中心陈国光教授级高工、孙晨刚工程师对本课题研究给予了大力支持与帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 上海市水务局. 上海市水资源公报[M]. 上海:上海市水务局,2010.

[2] 茅志昌,沈焕庭,徐彭令. 长江河口盐水入侵规律及淡水水资源利用[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))

[3] 徐建益,袁建忠. 长江口南支河段盐水入侵规律的研究[J]. 水文,1994,83(5):1-5. (XU Jianyi, YUAN Jianzhong. Study on the mechanism of saltwater intrusion in the south branch in the Changjiang Estuary[J]. Journal of China Hydrology, 1994,83(5):1-5. (in Chinese))

[4] 阮仁良. 上海市水环境研究[M]. 北京:科学出版社,2000.

[5] 汪松年,阮仁良. 上海市水资源普查报告[M]. 上海:上海科学技术出版社,2001.

[6] 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. Inversed intrusion of salt water in the north branch and abnormal behaviors of the salinity in the south branch during the dry season[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5): 584-589. (in Chinese))

[7] 张二凤,陈西庆. 长江大通—河口段枯季的径流量变化[J]. 地理学报,2003,58(2):231-238. (ZHANG Erfeng, CHEN Xiqing. Changes of water discharge between Datong and the Changjiang Estuary during the dry season [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 231-238. (in Chinese))

[8] 唐承佳,茅志昌. 南水北调(东线)工程和皖苏沿江抽水对长江口盐水入侵的影响[J]. 枣庄师范专科学校学报,2004,21(2):37-41. (TANG Chengjia, MAO

Zhichang. The extent of salt water intrusion in Yangtze River Estuary brought by the east route project of transporting water from Yangtze River to North China and the pumping works along the Yangtze River from Anhui to Jiangsu Province [J]. Journal of Zaozhuang Teachers' College, 2004,21(2):37-41. (in Chinese))

[9] WU H, ZHU J R, CHIO B H. Links between saltwater intrusion and subtidal circulation in the Changjiang Estuary: a model guided study [J]. Continental Shelf Research, 2010,30:1891-1905.

[10] 顾玉亮,乐勤. 长江口陈行水源地盐水入侵分析及预报[J]. 城市公用事业,2004,18(2):19-20. (GU Yuliang, LE Qin. The analyzing and predicting about the saltwater intrusion of Chenhang Reservoir in the Changjiang Estuary [J]. Public Utilites, 2004,18(2): 19-20. (in Chinese))

[11] 杨桂山,朱季文. 全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究[J]. 中国科学(B辑),1993,23(1):69-76. (YANG Guishan, ZHU Jiwen. Impacts of the rising sea water level in the globe on the saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Science in China (B), 1993, 23(1): 69-76. (in Chinese))

[12] 陈祖军. 上海及邻近海区海平面上升研究的进展与思考[J]. 上海水务,2012,28(4):1-5. (CHEN Zujun. Advance and thought for the study of the rising sea water level in Shanghai and its vicinity sea zone [J]. Shanghai Water, 2012, 28(4): 1-5. (in Chinese))

[13] 国家海洋局. 2011年中国海平面公报[EB/OL]. [2012-07-06] <http://www.coi.gov.cn/gongbao/nrhaipingmian/nr2011/>

[14] 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 Weiwei, ZHAO Shengwei. Study on water discharge relationship between Xuliujing Station at the Yangtze Estuary and Datong Station of the Yangtze River [J]. Science of Water Electricity & Energy, 2011, 29(7):4-7. (in Chinese))

[15] 陈美发. 控制长江口北支咸潮倒灌支持南水北调[J]. 水利水电科技进展,2003,23(3):17-33. (CHEN Meifa. Prevention of salt-tide down-draught from north branch of Yangtze River Estuary to support South to North Water Transfer [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(3):17-33. (in Chinese))

(收稿日期:2013-09-01 编辑:彭桃英)

