

引用本文: 乔红杰, 刘大伟, 闻卫东, 等. 2022年长江口北支咸水倒灌传播特征分析[J]. 人民长江, 2023, 54(2)

2022年长江口北支咸水倒灌传播特征分析

乔红杰, 刘大伟, 闻卫东, 王 珏, 张东锋

(长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 基于长江口历年枯季、2022年9~11月初的实测盐度、潮汐资料以及同期大通站和徐六泾站径流量成果, 分析了2022年北支咸水倒灌的特点及其与历年的差异, 结合流域来水及极端天气情况, 探讨了北支咸水倒灌的影响因素, 影响范围及传播路径。分析显示: 2022年北支咸水倒灌开始时间较前几年显著提前, 强度明显提高; 咸水倒灌强度与上游来水成负相关; 对影响长江口的台风及寒潮偏北大风较为敏感; 出现了咸水倒灌与外海咸水通过南支上溯正面袭击相叠加的现象; 咸水倒灌存在与潮汐类似的周期性变化趋势, 其强度与潮汐动力成正相关; 咸水倒灌可影响到南支右岸白茆至陈行水库一带水域。

关键词: 咸水倒灌; 盐度; 径流量; 潮汐; 长江口北支

中图法分类号: P342

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.02.009

1 研究背景

2022年入夏以来长江流域发生历史罕见的流域性枯水, 长江干流及主要支流来水量较常年同期偏少5~7成。长江大通水文站9月份平均流量仅为11 600 m³/s, 较常年同期偏少近7成。受长江来水偏少和2022年第11号“轩岚诺”、12号“梅花”、14号“南玛都”等台风的连续叠加影响, 9月以来, 长江口地区水源地遭遇咸潮入侵, 徐六泾以下河段的浏河水库、陈行水库等6处水源地均遭受严重的咸潮影响, 供水安全受到严重威胁。

长江口北支为长江入海的四条通道之一, 北支咸水倒灌主要发生在11月至次年4月的冬春枯水季节, 而2022年9月时即发生较强的北支咸水倒灌, 较为罕见。北支高含盐水体倒灌南支是南支及南、北港上段咸潮入侵的主要来源之一^[1]。当大通站流量低于14 000 m³/s时, 北支进口大潮期存在较强的盐水倒灌现象, 而小潮期则相对较弱^[2]。北支海水倒灌是影响崇头盐度超标的唯一入侵源, 南支崇头高盐水下移, 可以影响陈行取

水口、青草沙^[3]。研究认为20世纪70年代至今长江河口盐水入侵逐渐趋弱, 随着长江流域上游水库群的建成和北支进一步萎缩, 长江口盐水入侵将继续减弱^[4], 当面对特殊水情叠加极端气象条件下, 长江口盐水入侵机理异常复杂, 有必要进一步深化研究。

针对2022年9月以来发生的长江口咸水入侵, 本文基于长江口历年枯季、2022年9月以来实测盐度、潮汐资料以及同期大通站、徐六泾站径流量成果, 分析了2022年北支咸水倒灌的特点及其与历年的差异, 结合流域来水及极端天气事件, 探讨了北支咸水倒灌的影响因素, 分析了北支咸水倒灌的强度、传播特征及其对水源地的影响程度, 大致掌握了北支咸水倒灌的传播路径。

2 资料及方法

本文主要采用了崇明洲头站2014~2021年的枯季实测数据, 崇明洲头站、白茆、杨林站共3处长期站9~11月初的实测数据, 以及荡茜、太仓石化、浏河水库取水口和陈行水库取水口共4站10~11月初的监

测数据;7站的仪器均采用固定安装方式,因长江口涨落潮潮差较大,采样位置大致为水体表层或中上层。3处长期站同时采集潮位、电导率数据,其余4站仅收集电导率数据。盐度监测站的位置见图1。

潮位采用浮子式水位计,电导率采用电导率仪,潮位及电导率均采用在线采集的方式。电导率与盐度之间的转换采用现场率定的公式推求,不同电导率仪进行率定时,建立某一温度下标准海水的盐度与电导率的关系,进而推求该站的逐时盐度。

3 水文气象条件

影响长江口咸潮入侵的因素主要包括流域来水、天文潮汐、区域气象条件等方面。流域来水和潮汐是影响咸潮入侵的决定性因素。

3.1 流域来水

罗小峰等^[5]利用平面二维盐度数学模型,探讨了长江口盐度与径流潮流的关系,认为上游径流量越少,咸水上溯距离越远,在径流相同的情况下,随着潮差的增大,盐水入侵距离就越远。

3.1.1 上游径流量对比分析

大通水文站距离长江入海口约624 km,是长江河口的潮区界,是长江干流下游泥沙、流量的代表水文站,本次收集了该站1950年以来连续的实测系列水文资料。徐六泾水文站位于长江流域长江下游干流河口段,距上游大通水文站约500 km,是控制长江下游干流长江口河段径流、潮流水情的水文站;该站自2005年起开展逐时潮流量资料整编。

统计显示,2022年7月份开始,长江流域来水较往年正常偏少;大通水文站8月份月平均流量较多年平均偏少约51%,9月份月平均流量较多年平均偏少约69%。长江流域出现了“汛期反枯”现象,长江中下游来水偏枯,大通站日平均流量,自8月17日时回落至 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下(仅 $19\,700\text{ m}^3/\text{s}$),9月时月平均流量仅相当于往年1月时,长江流域提前3个月进入枯水期。

2022年5~9月,徐六泾站月平均流量比大通站低1.0%~7.5%。5~8月,两站的差值逐步扩大,8月份徐六泾站月平均流量比大通站低约 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ (见表1)。分析原因,5~8月,随着进入夏季,气温逐步升高,叠加流域性降水异常偏少,受大通至徐六泾河段沿江众多支流、引江口门和调水工程等的引、排影响,区间引水量较高,导致进入长江口的流域来水量进一步减小。较低的径流量,没有足够的淡水压减咸水,将加剧长江口咸潮入侵强度。

表1 2022年大通站、徐六泾站月平均流量对比统计
Tab.1 Comparison statistics of average monthly discharge of Datong Station and Xuliujing Station in 2022

| 时间段 | 大通水文站 | | 徐六泾水文站/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | 两站差值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|--------------------------------------|------------|---|---|
| | 流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | 与多年平均的比值/% | | |
| 一月 | 14500 | 22.9 | 14200 | -300 |
| 二月 | 23000 | 84.0 | 23700 | 700 |
| 三月 | 23400 | 36.8 | 25900 | 2500 |
| 四月 | 28600 | 18.2 | 31100 | 2500 |
| 五月 | 39100 | 17.1 | 38700 | -400 |
| 六月 | 54900 | 35.9 | 53600 | -1300 |
| 七月 | 43900 | -12.2 | 42700 | -1200 |
| 八月 | 21500 | -50.8 | 20000 | -1500 |
| 九月 | 12000 | -69.2 | 11400 | -600 |



图1 监测点位布置

Fig.1 Arrangement of surveillance point

3.1.2 三峡水库压咸补淡应急调度

为有效缓解长江口地区咸潮上溯影响,在水利部的统一指挥下,长江水利委员会启动以三峡为核心的水工程压咸补淡应急调度,10月2日起调度三峡水库增加下泄水量,日均下泄流量由 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 加大至 $12\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 左右并在 $12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上持续8 d,累计向下游补水40.6亿 m^3 ,协同大通以下主要引调水工程压减取水,有效增加了长江中下游干流沿线水量补充。三峡补水调度,10月6日开始影响大通站,最大增加大通站日均流量约 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,大通站流量最大涨至日均 $13\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ (10月15日), $12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上流量持续时间达9 d左右。三峡水库压咸补淡应急调度,显著降低了10月16~23日间长江口水体的盐度,为长江口水源地创造了取水窗口。

3.2 台风及寒潮大风情况

吴辉^[6]认为偏北风的作用使得北港盐水入侵加强,而南港及其以下河段的盐水入侵有所减弱,对北港盐水入侵的加剧程度从大到小依次为正北风、西北风、东北风。

2022年第11号台风“轩岚诺”为超强台风,9月3~5日间,影响长江口地区;第12号台风“梅花”为强台风,9月15日夜间登陆上海,9月12~15日间,影响长江口地区;第14号台风“南玛都”为超强台风,9月17~19日间,其外围影响长江口地区。10月4日,10月17日出现两次寒潮过程,以4日风力最强。

3.3 潮汐动力变化

潮差随下游天文潮汐强弱变化而规律变化,潮汐越强,潮差越大,反之,则潮差减小。自2022年9月初长江口出现咸潮入侵开始,统计了9~11月初崇明洲头站的涨潮潮差(见图2),9月15日(农历八月二十),受台风“梅花”过境影响,涨潮潮差最大,为4.44 m,高于9月11日(农历八月十六)。9月27日、10月10日及10月27日3个大潮期,潮汐动力基本相当。

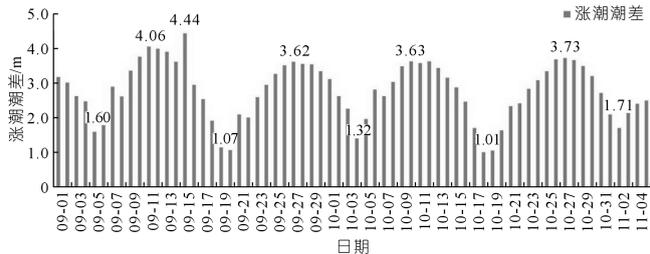


图2 崇明洲头站逐日涨潮潮差

Fig. 2 Daily rising tidal range of Chongming Zhoutou Station

农历八月十六前后的天文大潮为一年内潮汐动力最强的时间段。长江流域遭遇特枯水情,叠加三次台风的

影响,北支咸水倒灌与外海咸水正面袭击相叠加,导致了2022年罕见的持续久、强度高的咸潮入侵现象发生。

4 结果与探讨

4.1 咸水倒灌状况分析

长江口咸潮入侵是枯水季节经常发生的一种自然现象,当河口的实测盐度值高于 0.45‰ 时,即认为发生了咸潮入侵。在历史上的特枯水文年,长江河口经常发生严重的咸水入侵^[7]。长江口北支咸水是否倒灌南支,可通过崇明洲头站的实测盐度数据判断,根据白茆、杨林等站的实测数据,可判断咸水对南支右岸的影响程度。

根据崇明洲头站实测盐度资料,9月1日~11月3日间,共发生7次北支咸水倒灌现象。

9月2日,为第一次咸水倒灌,持续时间短,强度弱,伴随北支涨潮流,咸水进入南支,影响时长约3 h,崇明洲头站最大盐度为 0.925‰ 。

9月5~6日,为第二次咸水倒灌,持续时长约21 h,崇明洲头站最大盐度为 1.703‰ ,日平均盐度为 0.56‰ 。与第一次相同,白茆站、杨林站盐度未超标。

9月9日~9月17日,为第三次咸水倒灌,受台风“轩岚诺”影响,南支右岸的杨林站遭受显著的咸潮入侵。此次咸水倒灌持续时长达9 d,崇明洲头站最大盐度为 2.637‰ ,期间平均盐度为 1.176‰ ;杨林站最大盐度为 2.149‰ ,期间平均盐度为 0.844‰ ;而白茆站盐度未超标。

9月19日17时~9月20日1时,为第四次咸水倒灌,受寒潮偏北大风影响,咸水倒灌持续时长约9 h,崇明洲头站最大盐度为 2.604‰ ,期间平均盐度为 2.270‰ ;白茆站、杨林站盐度未超标。

9月20日~10月16日,为第五次咸水倒灌,此次持续时间长,强度大,范围广;持续时长约27 d,最上游影响至白茆站所在水域;崇明洲头站最大盐度为 10.328‰ ,期间平均盐度为 2.227‰ ;杨林站最大盐度为 3.632‰ ,期间平均盐度为 1.592‰ ;白茆站在高平潮附近短时超标,最大盐度为 2.785‰ ,期间平均盐度为 0.257‰ 。若按天文潮划分,此次咸水倒灌可划分成两个时间段,分别为9月20日~10月4日和10月5日~10月16日两个时间段。

10月17日14时~10月17日22时,为第六次咸水倒灌,受寒潮偏北大风影响,咸水倒灌持续时长约9 h,崇明洲头站最大盐度为 1.984‰ ,期间平均盐度为 1.792‰ ;白茆站盐度未超标,杨林站平均盐度为 0.466‰ 。

10月24日~11月3日,为第七次咸水倒灌,为三峡水库压咸补淡调度实施后,发生的首次北支咸水倒灌;持续时长约11 d,最上游影响影响至白茆站水域;

崇明洲头站最大盐度为 4.671‰,期间平均盐度为 1.961‰;杨林站最大盐度为 1.859‰,期间平均盐度为 1.021‰;白茆站在高平潮附近短时超标,最大盐度为 0.990‰,期间平均盐度为 0.214‰。

依据 2022 年 9~11 月初的盐度观测数据,初步分析了长江口发生的咸潮入侵状况,9 月 20~29 日,为北支咸水倒灌叠加外海咸水上溯正面袭击,其余时间段均表现为以北支咸水倒灌为主导,但 9 月中旬外海咸水上溯的高浓度咸水受上游径流的冲淡需要一定过程,10 月份南支中下段持续受到外海上溯咸水的影响,随着时间推移,其强度逐步减弱。潮位、盐度变化过程线见图 3。

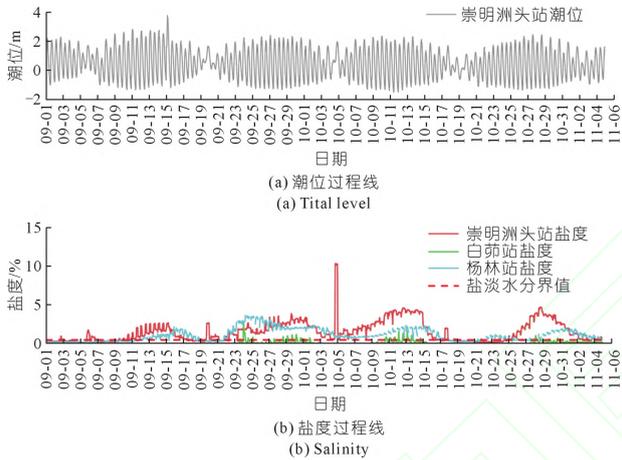


图 3 潮位、盐度变化过程线

Fig.3 Process line of tidal level and salinity

表 2 2022 年 9~11 月初北支咸水倒灌情况统计

Tab.2 Situation of saltwater intrusion in north branch from September to early November in 2022

| 时间段 | 持续时长 | 测站 | 最大值/ ‰ | 最小值/ ‰ | 平均值/ ‰ | 峰值区间/ ‰ | 大通站流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) |
|--------------|------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------------------------|
| 9月2日 | 3 h | 崇明洲头站 | 0.925 | 0.203 | 0.31 | - | 16600 |
| | | 白茆 | 0.173 | 0.161 | 0.165 | - | |
| | | 杨林 | 0.173 | 0.155 | 0.167 | - | |
| 9月5~6日 | 21 h | 崇明洲头站 | 1.703 | 0.162 | 0.560 | - | 14900 |
| | | 白茆 | 0.171 | 0.161 | 0.166 | - | |
| | | 杨林 | 0.196 | 0.147 | 0.171 | - | |
| 9月9~17日 | 9 d | 崇明洲头站 | 2.637 | 0.269 | 1.176 | 1.159~2.637 | 12600 |
| | | 白茆 | 0.336 | 0.045 | 0.180 | - | |
| | | 杨林 | 2.149 | 0.165 | 0.844 | 0.694~2.149 | |
| 9月20日至10月4日 | 15 d | 崇明洲头站 | 10.328 | 0.264 | 1.921 | 1.162~3.828 | 10600 |
| | | 白茆 | 2.785 | 0.012 | 0.258 | 0.529~2.785 | |
| | | 杨林 | 3.632 | 0.199 | 1.860 | 1.530~3.632 | |
| 10月5~16日 | 12 d | 崇明洲头站 | 10.257 | 0.328 | 2.481 | 1.335~4.582 | 10300 |
| | | 白茆 | 1.576 | 0.023 | 0.257 | 0.493~1.576 | |
| | | 杨林 | 2.326 | 0.396 | 1.234 | 0.996~2.326 | |
| 10月24日至11月3日 | 10 d | 崇明洲头站 | 4.671 | 0.222 | 1.588 | 1.167~4.671 | 10800 |
| | | 白茆 | 0.990 | 0.153 | 0.214 | 0.563~0.99 | |
| | | 杨林 | 1.859 | 0.208 | 1.021 | 0.458~1.859 | |

注:大通站流量为提前 4~6 d 的平均值^[8]。

表 3 偏北大风期间崇明洲头站盐度统计

Tab.3 Salinity of Chongming Zhoutou Station during the northerly winds

| 开始时间 | 结束时间 | 持续时长/h | 最大值/‰ | 最小值/‰ | 平均值/‰ |
|------------------|------------------|--------|--------|-------|-------|
| 2022-09-19 17:00 | 2022-09-20 01:00 | 9 | 2.604 | 1.075 | 2.270 |
| 2022-10-04 17:00 | 2022-10-05 01:00 | 9 | 10.259 | 1.935 | 8.439 |
| 2022-10-17 14:00 | 2022-10-17 22:00 | 9 | 1.984 | 0.739 | 1.792 |

注:表中 10 月 4 日出现的盐度高值,已分析其合理性,反映了盐水倒灌的强度。

4.2 咸水倒灌特点分析

根据 9~11 月初的实测数据,长江口出现的咸潮入侵以北支咸水倒灌最为频繁,受流域来水变化、台风及寒潮偏北大风等因素共同影响,不同时间段存在明显的差异,2022 年 9 月以来的长江口咸潮入侵大致存在以下特点:

(1) 北支咸水倒灌出现时间较往年显著提前。根据 2014~2018 年监测数据,汛期后至当年 12 月份,崇明洲头站均未出现盐度超过 0.45‰;2019 年 11 月下旬时,仅在涨潮期出现短暂的北支咸水倒灌,盐度最大值为 1.40‰;2020 年 11 月~2021 年 4 月,未出现北支咸水倒灌。而 2022 年在 9 月初即出现北支咸水倒灌,较往年早近 3 个月,极为罕见。

(2) 随着上游来水减弱,北支咸水倒灌强度呈逐步增强趋势(见表 2)。前五次盐度峰值,由 9 月 2 日时的 0.925‰,提高至 10 月 4 日的 10.328‰。从天文潮汐的半月周期看,9 月 1 日~10 月 16 日间,共经历三次大潮期,在不考虑气象因素影响时,大潮期的北支咸水倒灌的盐度峰值分别为 2.637‰(9 月 15 日)、3.828‰(9 月 29 日)、4.582‰(10 月 12 日)。分析原因,大通日平均流量由 8 月 31 日时的 15 100 m^3/s ,回落至 10 月 5 日时的 9 000 m^3/s ,9 月时仅相当于往年 1 月时水平,在潮动力基本相当的情况下,上游来水的减少,北支咸水倒灌强度增大。

(3) 在台风的影响下,外海高盐度海水沿南支上溯正面袭击长江口,并影响南支上段白茆沙水域象。受 9 月中上旬三次台风的影响,9 月 20~26 日间,杨林站的盐度显著高于崇明洲头站,白茆站短时盐度也高于崇明洲头站。期间,杨林站最大盐度为 3.632‰(09 月 24 日),白茆站最大盐度为 2.785‰(09 月 24 日),显示出该时段高浓度咸水来自于南支下游,而非来自北支咸水倒灌。

(4) 在寒潮偏北大风影响下,北支咸水倒灌强度显著增大(见表 3)。当发生寒潮时,在偏北大风的影响下,北支会出现显著的咸水倒灌,根据 9 月以来的观测数据,共出现 3 次寒潮过程。在偏北大风的助力下,北支涨潮流携带大量高浓度咸水倒灌入南支,以 10 月

4 日影响最为强烈,崇明洲头站最大盐度为 10.328‰,期间平均盐度为 8.439‰,持续约 9 h。

(5) 北支咸水倒灌存在与潮汐类似的周期性变化趋势,其强度与天文潮汐动力成正相关。北支咸水倒灌一般开始于中潮向大潮过渡期,随着潮差增大,倒灌强度震荡增大,大潮时倒灌咸水的盐度到达峰值,大潮后潮差变小,倒灌强度开始震荡减弱;在倒灌咸水的浓度持续升高过程中,当水体盐度达到 2‰左右时,开始并逐步影响南支右岸的白茆至陈行水库一带水域(见图 3~5 及表 2)。

(6) 长江口咸潮入侵机理十分复杂,存在北支咸水倒灌,也存在外海咸水通过南支上溯正面袭击,并叠加共同影响长江口地区,制约因素有流域来水、天文潮汐、台风暴潮及风力等。

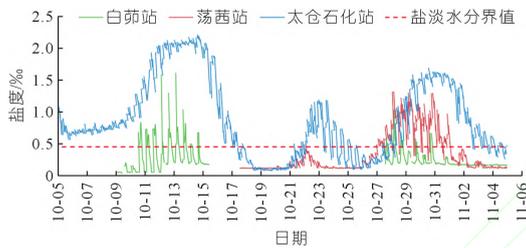


图 4 白茆至太仓石化 3 站盐度变化过程

Fig. 4 Process line of salinity of three stations from Baimaoto Taicang Petrochemical station

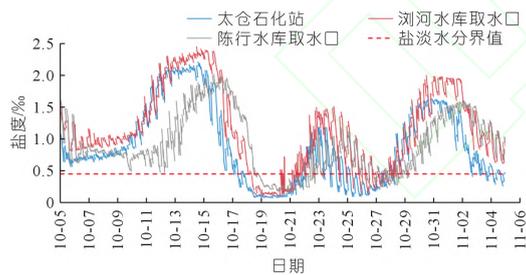


图 5 太仓石化至陈行水库取水口 3 站盐度变化过程

Fig. 5 Process line of salinity of three stations from Taicang Petrochemical station to water intake of Chenhang Reservoir

4.3 对水源地的影响

朱建荣等^[9]根据对实测数据的分析,北支倒灌的盐水团从南北支分汉口附近的崇头到达陈行水库需要 2~3 d 时间。赵捷等^[10]认为南支盐度的大小较北支小一个量级,其变化较北支复杂,尤其是在落潮时段盐度短时间内明显增加。

2022 年 9 月后的长江口咸潮入侵,长江口地区的各大水源地均遭受了不同程度的影响。当水源地取水口处的盐度高于 0.45‰时^[11],水库不宜取水,根据实测盐度数据,统计了北支口、南支右岸共 3 处水源地最

大不宜取水天数。受影响最大的为圩角河水源地,其次为浏河水库和陈行水库,两个月内,不宜取水天数最大为 49.5 d(见表 4)。

表 4 水源地不宜取水天数统计

Tab. 4 Statistics of days of inadequacy for water intake in water source area

| 统计时间段 | 圩角河水源地 | 浏河水库 | 陈行水库 |
|--------------------|--------|------|------|
| 9 月 2 日 | 0.5 | - | - |
| 9 月 5~6 日 | 1 | - | - |
| 9 月 9~17 日 | 9 | 9 | 4 |
| 9 月 20 日~10 月 16 日 | 27 | 27 | 25 |
| 10 月 24 日~11 月 3 日 | 12 | 11 | 10 |
| 累计 | 49.5 | 47 | 39 |

在以北支咸水倒灌为主导的情况下,3 处水源地在小潮期存在短期的取水窗口。

9 月上旬,为北支咸水倒灌为主;9 月中下旬,徐六泾以下的各处水源地均遭受严重的影响,北支口的圩角河水源地是受北支咸水倒灌的影响,浏河水库及陈行水库取水口同时受北支咸水倒灌及外海咸水上溯的影响,青草沙水库取水口中则受外海咸水沿北港上溯影响。10 月份,前期外海咸水正面上溯的高浓度咸水仍未完全消退,青草沙水库取水口持续受到外海咸水的影响,而其他几处水源地则主要受北支咸水倒灌影响。

以北支咸水倒灌为主的情况下,长江口南支右岸最远可影响至陈行水库附近水域,南支左岸可影响崇头-南门-堡镇一带水域。在枯季长江口发生咸水入侵时,李国平等^[12]研究显示青草沙水库取水口遭遇盐水入侵时,以北港下游正面盐水入侵为主,发生于小潮或小潮后中潮,在小潮期间遇到强北风作用会导致较严重的正面盐水入侵;陈泾等^[13]研究认为,除了小潮后中潮期间青草沙水库取水口底层盐水入侵来源主要来自下游外海,表层和底层盐水入侵来源主要来自北支盐水倒灌,尤其是大潮后中潮和小潮期间几乎全部来自北支盐水倒灌。

4.4 咸水倒灌的传播路径分析

长江口的咸潮入侵通道有 4 条,分别为北支、北港、北槽和南槽,北支盐度居 4 条入海通道之首,南支咸潮入侵程度较北支轻。南支河段主要受 3 个咸潮入侵源的影响,即外海咸水经南、北港直接入侵和北支向南支倒灌。已有研究认为,在大、中潮期间,北支以咸水团的形式向南支倒灌输送大量盐分^[14],倒灌的咸水团进入南支河段后,在涨潮流作用下向长江上游输移扩散,盐度快速降低;落潮期,在径流和潮流的双重作用下,咸水团向下游移动扩散,可能影响该河段各水源地。沈焕庭等^[15]研究认为,倒灌咸水团主体经白茆沙北水道进入南支,在新建水闸附近分成三路,分别进入

新桥水道,七丫口河段以及漫过白茆沙进入南水道。综合前文分析,在以北支咸水倒灌为主导的情况下,北支倒灌咸水对南支右岸白茆至陈行水库一带产生明显影响。

发生北支咸水倒灌初期,咸水浓度较低,南支右岸不受影响,当北支口盐度持续升高至约2‰时,白茆站附近开始受到影响,滞后崇明洲头站约3 d。白茆站的盐度峰值与崇明洲头站基本一致,表明白茆站的咸水来自北支;杨林站的盐度峰值滞后于崇明洲头站,滞后2~3 d;表明北支倒灌的咸水团随着潮流的涨落震荡下移。

浏河水库取水口盐度峰值滞后于杨林站,陈行水库取水口的盐度峰值滞后于崇头站3~4 d;表明北支倒灌的咸水团是自上游而下,陆续影响白茆站以下水域(见图4,5)。

从各监测站盐度变化过程对比分析,北支倒灌咸水的传播路径大致为:北支口盐度较高时,一部分咸水越过白茆沙头部,影响至白茆站附近,随涨落潮流沿白茆沙南水道震荡下行,影响荡茜口附近;一部分咸水随涨落潮流沿白茆沙北水道震荡下行,并与南水道的咸水在杨林-太仓石化附近汇流后,继续下行,逐渐对浏河水库、陈行水库取水口附近水域产生影响(见图6)。

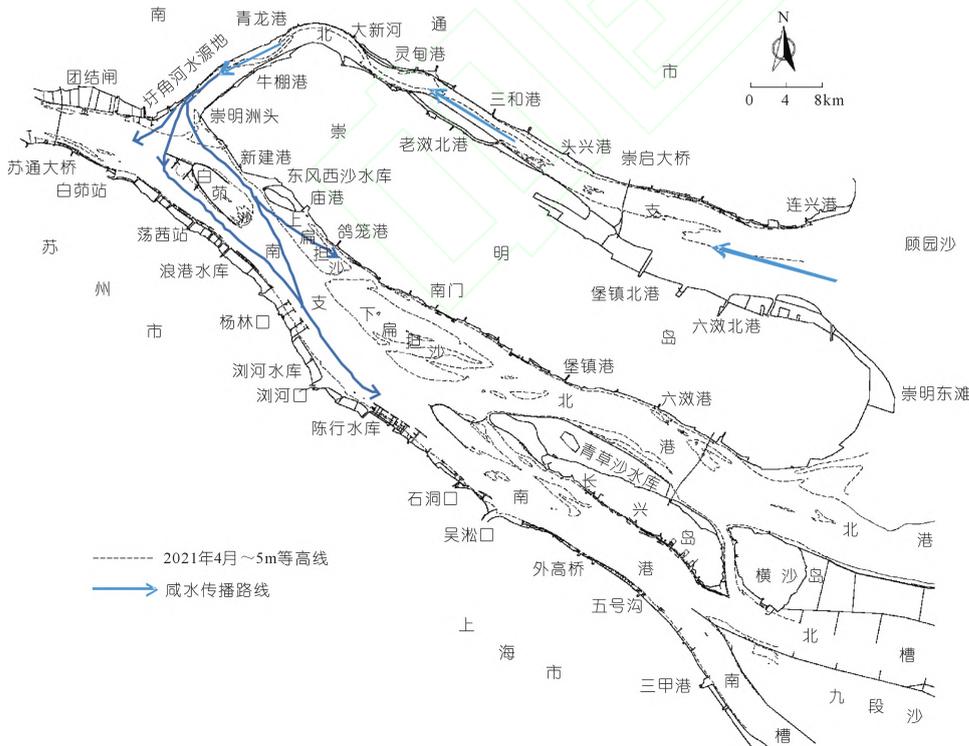


图6 北支咸水倒灌传播路径示意图

Fig. 6 Diffusion path of saltwater intrusion in the north branch

5 结论

基于长江口历年枯季、2022年9~11月初的实测

盐度和潮汐资料及同期大通、徐六泾站径流量成果,结合流域来水及极端天气情况,主要结论如下:

(1) 2022年9月初即发生北支咸水倒灌,开始时间较前几年显著提前,强度明显提高;

(2) 2022年9月流域来水仅相当于往年1月份的水平,长江流域提前三个月进入枯水期;随着上游来水的减少,北支咸水倒灌强度不断增强,北支咸水倒灌与上游来水成负相关。

(3) 北支咸水倒灌对影响长江口的台风及寒潮偏北大风较为敏感;在台风和寒潮偏北大风影响下,咸水倒灌强度显著增大,最上游可到达白茆河口上游,影响白茆沙水域,但未影响苏通大桥以上水域。

(4) 在长江极枯水情条件下,天文大潮叠加台风的影响,北支咸水倒灌与外海咸水正面袭击相叠加,导致了2022年罕见的、持续久、强度高的咸水入侵现象发生。

(5) 北支咸水倒灌存在与潮汐类似的周期性变化趋势,其强度与潮差成正相关,咸水倒灌开始于中潮向大潮过渡期,大潮时盐度到达峰值,小潮时降至最低。

(6) 白茆站的盐度峰值与崇明洲头站基本一致,

杨林站的盐度峰值滞后于崇明洲头站,滞后2~3 d;浏河水库取水口盐度峰值滞后于杨林站;陈行水库取水口的盐度峰值滞后于崇头站3~4 d;表明北支倒灌的咸水团是自上游而下,陆续影响白茆站以下水域。

(7) 在北支倒灌咸水的浓度持续升高至2‰左右时,开始并逐步影响南支右岸的白茆至陈行水库一带水域,对水源地的取水带来显著不利影响。高浓度的咸水倒灌,一部分咸水越过白茆沙头部,影响至白茆站附近,随涨落潮流沿白茆沙南水道震荡下行,影响荡茜口附近;一部分咸水随涨落潮流沿白茆沙北水道震荡下行,并与南水道的咸水在杨林-太仓石化附近汇流后,继续下行,逐渐对浏河水库、陈行水库取水口附近水域产生影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 乔红杰,卜东平,张志林,毕军芳.长江口北支河段盐水倒灌现状分析研究[J].人民长江,2018,49(增2):17-20.
- [3] 曹利利,陶建峰,张长宽,等.长江河口枯季北支盐水倒灌特征分析[J].人民长江,2012,43(增1):90-92.
- [4] 顾靖华,朱建荣,袁诚,等.长江河口盐水入侵长期演变分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021(6):174-186.
- [5] 罗小峰,陈志昌.径流和潮汐对长江口盐水入侵影响数值模拟研究[J].海岸工程,2005(3):1-6.
- [6] 吴辉.长江河口盐水入侵研究[D].上海:华东师范大学,2006.
- [7] 茅志昌,沈焕庭,姚运达.长江口南支南岸水域咸水入侵来源分析[J].海洋通报,1993,12(3):17-25.
- [8] 唐建华,刘玮祎,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.
- [9] 朱建荣,吴辉,李路,等.极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵[J].华东师范大学学报(自然科学版),2010(4):1-6, 25.
- [10] 赵捷,何青,王宪业,等.长江口南北支水沙特性观测研究[J].长江流域资源与环境,2015(1):21-29.
- [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.生活饮用水卫生标准:GB5749-2022[S].北京:国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2022.
- [12] 李国平,朱建荣.2015~2017年枯季长江河口青草沙水库盐水入侵分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2018(2):160-169.
- [13] 陈涇,朱建荣.长江河口青草沙水库盐水入侵来源[J].海洋学报,2014,36(11):131-141.
- [14] 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.
- [15] 沈焕庭,茅志昌,朱建荣.长江河口盐水入侵[M].北京:海洋出版社,2003.

(编辑:黄文晋)