

长江口北支地形变化对倒灌盐水的影响

邵雨辰¹, 刘 懿¹, 周先水², 王翔宇¹, 吕紫君¹, 吴德安³

(1.南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2.南京市江北新区环境保护与水务局, 江苏 南京 210000;

3.河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 北支盐水入侵是长江口径潮动力的重要特征, 受到径流、潮汐以及地形变化等多方面的影响。通过建立长江口潮流盐度模型, 讨论不同地形条件对长江口北支潮位及盐水倒灌量的影响, 研究倒灌盐水团的活动规律和盐度的变化。研究表明: 2000—2017 年期间年地形变化使得北支倒灌明显减弱, 中缩窄方案实施完成后将使得倒灌现象进一步减弱; 地形改变造成的倒灌盐水量变化对在南支活动的倒灌盐水团的盐度有显著的影响, 但对盐水团在南支的活动规律影响较小。

关键词: 盐水入侵; 北支; 潮流盐度模型; 地形变化

中图分类号: TV148^{+.4}

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)04-0131-05

0 引 言

北支倒灌是长江口盐水入侵的重要特征, 而 20 世纪下半叶长江口地形巨大的变化是北支倒灌形成的根本原因。20 世纪 60 年代在自然演变和人工围垦的影响下, 长江口北支演变成喇叭形河势, 促使北支涌潮逐渐增强, 北支倒灌越发明显。随着人工围垦对岸线的调整, 喇叭口河势逐渐得到改善, 特别是 2003 年以来, 长江口青龙港涌潮大为减弱^[1]。新世纪以来长江口的地形在自然和人工的作用下变化速度依然迅速, 特别是北支的地形变化对长江口北支倒灌的影响一直是人们关注的焦点^[2-4]。

根据 2000 年、2017 年长江口地形和岸线以及北支中缩窄方案实施完成情况, 分析近年来北支地形变化对长江口北支潮位及盐水倒灌量的影响, 研究在北支不同地形下倒灌盐水团的活动规律和盐度变化。

1 长江口北支的河势变

1.1 长江口北支的岸线变化

对比 2000 年与 2017 年岸线, 长江口北支岸线

在人为因素的作用下发生了较大的变化, 如图 1 所示。2000—2017 年期间, 长江口北支北侧岸线基本稳定, 未发生显著变迁。相比北侧岸线, 南岸向河槽有显著推进。2001 年永隆沙与兴隆沙夹槽的封堵, 以及随后兴隆沙东延工程和兴隆沙与崇明的封堵工程, 使永隆沙至前进闸的南岸大幅度北移。崇明洲头—牛棚港—新开港对岸的北支南岸一线, 由于人工的圈围, 向对岸推进了 500 m 左右, 缩窄率达到 30 % 左右, 导致新开港附近河槽最窄河槽宽度不足 1 km。

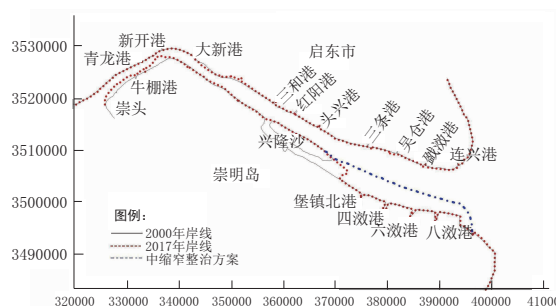


图 1 北支岸线变化示意图

长江口北支 2017 年以后, 崇明北沿促淤圈围工程正在按长江口综合整治开发规划 (2008 年 3 月经国务院批准) 确定的北支近期整治方案——中缩窄方案进行施工^[5]。在工程竣工以后, 原兴隆沙以下的北支南岸岸线平均向北侧推进 3.5 km, 北支的下段即三条港—连兴港段的河槽平均宽度缩窄至 5 km 左右, 缩窄率达到 40 % 左右。

1.2 长江口北支的冲淤变化

通过对比 2000 年的地形图和 2017 年的地形图

收稿日期: 2023-12-19

基金资助: 国家自然科学基金项目(41776024); 国家自然科学基金项目(42176166)

作者简介: 邵雨辰(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水运工程研究工作。

通信作者: 吴德安(1968—), 男, 博士, 教授, 从事水运工程研究工作。电子信箱: wudean@163.com

(如图2所示),可以发现北支河槽内含沙活动频繁,地形变化较为复杂。在青龙港和大新港沿线,由于北侧岸线向北推进,河槽北部也有一定淤高,导致沿线紧靠岸线一侧有一定冲刷。同样,由于兴隆沙的并岸和永隆新沙的淤高成陆,使得灵甸港附近潮波变形加剧,水域流速变大,导致灵甸港附近的河槽有所加深。三和港至兴头港河槽普遍淤积,三条港和连兴港沿线河槽的北侧有一定冲刷。堡镇北港和八激一线由于兴隆沙南水道的封堵以及人工的圈围,沿线河槽普遍淤高成滩。

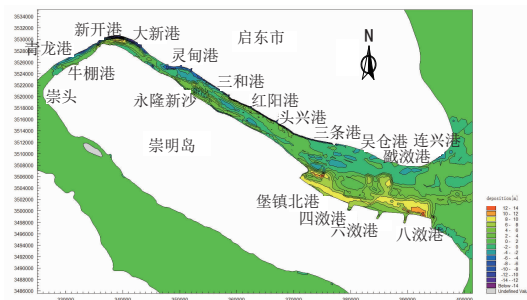


图2 2000—2017年北支冲淤变化图

从北支河床演变特点来看,由于北支沙源丰富,河道流路复杂多变,导致河槽内暗沙搬运频繁多变,加之人工的圈围活动增多,给北支的河势变化带来了许多不确定的因素。整体上看北支河槽逐步淤高的态势,而局部上,由于人为的控制和潮波的作用,也会出现冲刷加剧的现象。

2 模型的建立及参数设置

为了研究地形变化对北支盐水倒灌影响。建立两个数值模型,大模型上游边界至大通,下游边界至外海等深线 50 m 附近(见图3),小模型上游边界与大模型一致,下游边界北支至口门附近,南支至外海等深线 40 m 附近(见图4)。

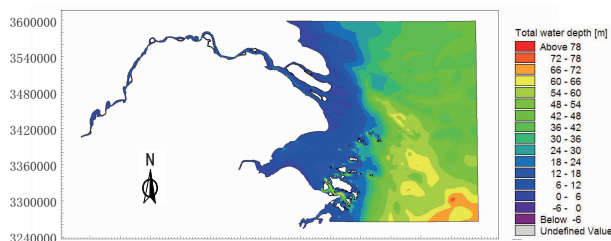


图3 大模型插值地形图

(1)水动力边界:大模型上游大通边界采用实测流量,外海的边界采用水位驱动,水位数据采用东中国海模型运算结果^[6]。小模型上游边界条件与大模型一致,下游外海边界从大模型中获取。

(2)盐度边界:大模型上游盐度为 0,外海盐度边

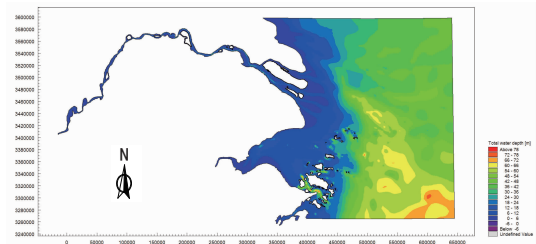


图4 小模型插值地形图

界为 15‰~35‰^[7-8]。小模型北支盐度边界条件从大模型中获取,为了单独研究北支倒灌盐水团在南支的活动规律,小模型南支的盐度边界条件设为 0。

两个模型能够成功模拟长江口的水动力及盐度变化,模拟时间为 2002 年 2 月 11 日—2002 年 3 月 13 日,经过与实测数据的比对,说明模型的模拟结果可信^[9]。

为研究北支地形变化对倒灌的影响,两个模型修改北支的地形条件分别采用 2000 年地形及岸线、2017 年的地形及岸线,并在 2017 年地形及岸线基础上叠加规划的中缩窄方案。大模型运算以后给小模型提供所需要的水动力边界和盐度边界。提取模拟期间后 15 d 的结果进行分析研究,结果包括了一个大潮~小潮周期(见图5),崇明洲头盐度测点模拟值与实测值拟合较好(见图6),小模型可以模拟出一个大潮~小潮周期盐水团倒灌入南支及随着径流向下移动的过程(见图7至图9)。

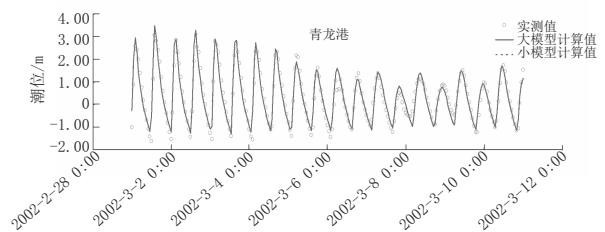


图5 青龙港潮位输出结果

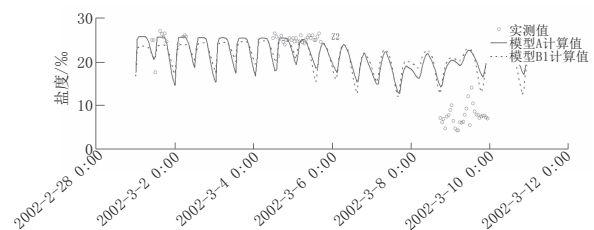


图6 崇明洲头 Z2 测点盐度验证

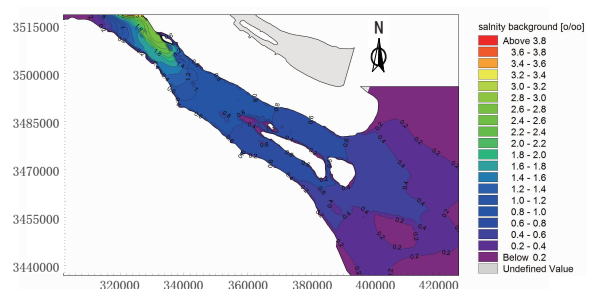


图7 小模型第3 d 北支倒灌盐水团平均盐度场

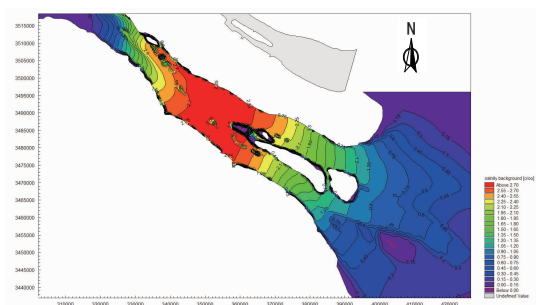


图8 小模型第8 d北支倒灌盐水团平均盐度场

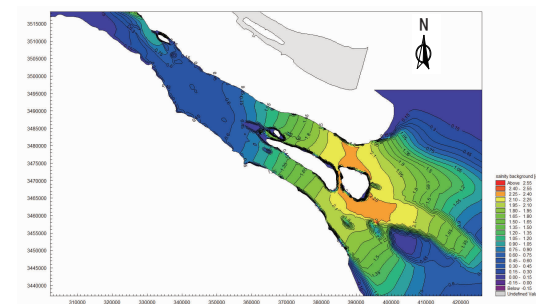


图9 小模型第13 d北支倒灌盐水团平均盐度场

3 不同地形条件下北支水动力环境变化

提取小模型的潮位数据,分析在不同地形条件下长江口北支的潮位变化。潮位提取点位置见表1。

表1 潮位提取点

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
站点	连兴港	戴汲港	吴仓港	三条港	头兴港	红阳港	三和港	灵甸港	大新港	青龙港

2000—2017年大潮最高潮位和小潮最高潮位普遍抬高(见图10、图11),特别是北支的中上段,灵甸港、大新港大潮最高潮位抬高达到了38 cm、43 cm、19 cm,这和2004年前后灵甸港上游及灯杆港附近实施了圈围以及2006年新跃沙北部圈围,使得北支上端岸线进一步缩窄,潮波能量辐聚有关;小潮最高潮从三条港开始就有显著的抬升,这主要因为兴隆港北水道的封堵和三和港附近的围垦,使得北支喇叭口的顶点移到了三条港附近,波能量在此处开始辐聚。

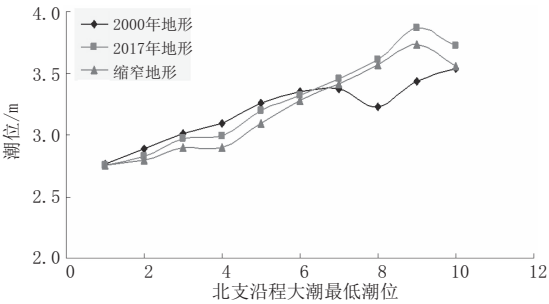


图10 北支沿程大潮最高潮位

2000—2017年大潮最低潮位和小潮最低潮位在三和港以上北支河槽有明显的降低(见图12、图

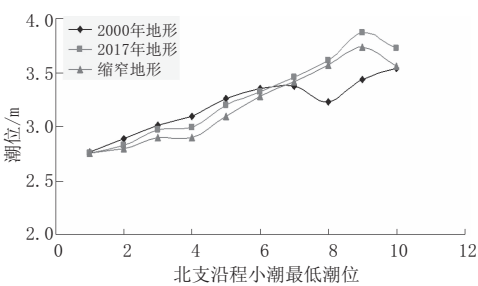


图11 北支沿程小潮最高潮位

13)。这依然与北支上端的围垦导致北支潮流能量在上端辐射,潮差变大,高潮位抬高,低潮位降低有着直接的关系。

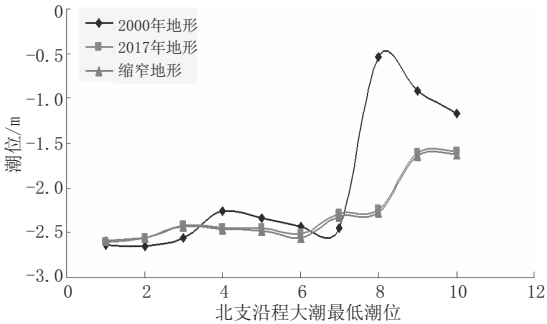


图12 北支沿程大潮最低潮位

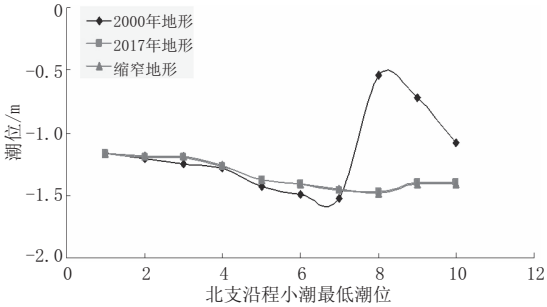


图13 北支沿程小潮最低潮位

缩窄方案后,较2017年岸线条件下,大潮最高潮位沿北支全段有所下降,其中三条港、大新港、青龙港分别下降10、12、16 cm,这主要由于北支缩窄工程调整了北支下端的岸线,三条港不再是喇叭口顶点,北支岸线进一步平顺,潮波能量辐聚现象得到抑制,其他特征潮位变化并不显著。

4 不同地形条件对盐水倒灌及盐水团活动的影响

4.1 不同地形对北支倒灌盐水量影响

为了研究不同地形下对北支的倒灌影响,本文提取了大潮4个潮周期和小潮4个潮周期的潮位、净盐通量、水体通量等计算结果(见表2、表3)。分析不同地形条件所引起的影响盐度倒灌因素的变化情况。

2000—2017年青龙港的大小潮平均潮差显著增加,中缩窄方案以后的大小潮平均潮差有所降低。

表 2 不同地形条件下大潮期间北支潮差、纳潮量、盐水倒灌量

地形条件	青龙港大潮平均潮差 /m	大潮平均日纳潮量 / ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	大潮平均日倒灌水量 / ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	大潮平均倒灌净盐量 / ($\times 10^6 \text{ t}$)
2000	4.39	15.71	16.52	3.94
2017	4.89	11.08	8.91	2.14
中缩窄	4.74	10.16	8.38	2.00

表 3 不同地形条件下小潮期间北支潮差、纳潮量、盐水倒灌量

地形条件	青龙港小潮平均潮差 /m	小潮平均日纳潮量 / ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	小潮平均日倒灌水量 / ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	小潮平均倒灌净盐量 / ($\times 10^6 \text{ t}$)
2000	2.17	5.85	2.18	0.50
2017	2.62	4.65	1.85	0.42
中缩窄	2.56	4.37	1.71	0.38

2000—2017 年中缩窄方案,北支大小潮的纳潮量显著减小,北支倒灌盐水量也显著小。

一般而言,青龙港的潮差大小与北支倒灌强度为正相关^[9],但由于地形的不断变化,特别是 2000—2017 年,青龙港大小潮潮差增大,北支倒灌却出现明显的降低趋势,而盐水倒灌量与北支口门附近的纳潮量有显著的正相关性。这一方面说明地形对北支倒灌有显著影响,另一方面说明北支倒灌影响因素的复杂性,很难用单个指标来衡量北支倒灌盐水的强弱。

4.2 盐水团移动和浓度变化规律

本文提取不同地形条件下小模型中各路径盐度数据。路径 a1 位于北支倒灌盐水进入北支的上段白茆沙水道(见图 14),路径 a1 盐水团核心位置和盐度变化较快(见图 17 及图 22),盐水团核心最高值位置随着潮水涨落往复移动,周期也与潮周期一致。路径 b1、b2、b3、b4 位于白茆沙水道以下(见图 15、图 16),盐水团核心 24 h 平均的位置和盐度呈现半月周期的变化,反映出盐水团随径流向下移动的位置及盐度变化(见图 18 至图 21 及图 23 至图 26)。

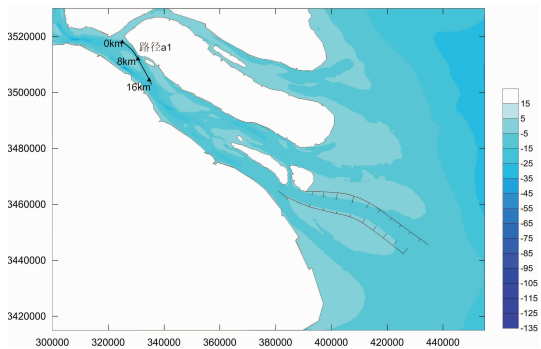


图 14 路径 a1 布置

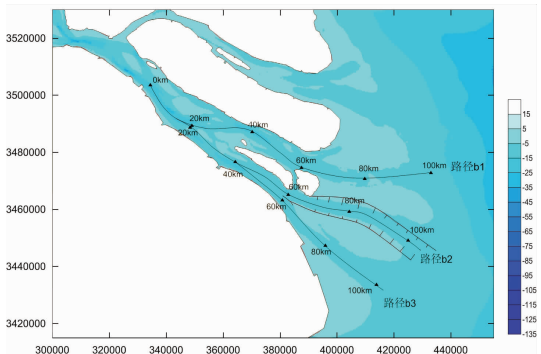


图 15 路径 b1、b2、b3 布置

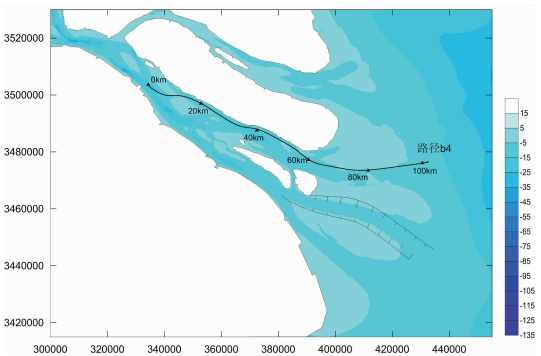


图 16 路径 b4 布置

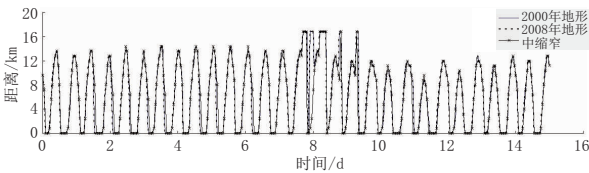


图 17 路径 a1 盐水团核心的逐时位置

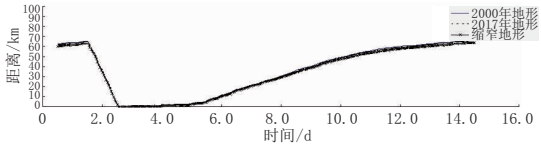


图 18 路径 b1 盐水团核心的 24 h 平均位置

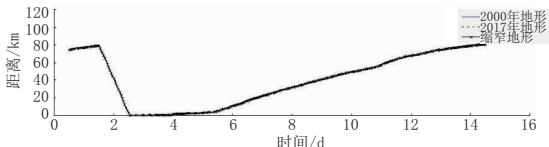


图 19 路径 b2 盐水团核心的 24 h 平均位置

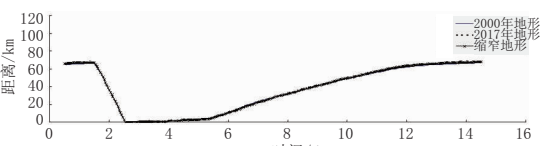


图 20 路径 b3 盐水团核心的 24 h 平均位置

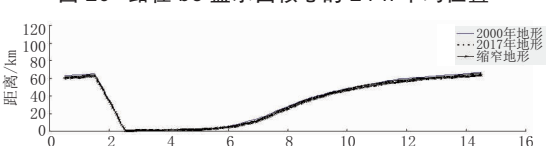


图 21 路径 b4 盐水团核心的 24 h 平均位置

从各路径上盐水团核心的位置看出,b1、b2、b3、b4 不同地形下各路径上的盐水团核心在南支的下移

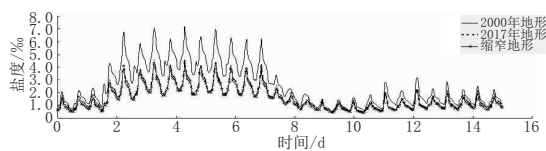


图 22 路径 a1 盐水团核心的逐时盐度

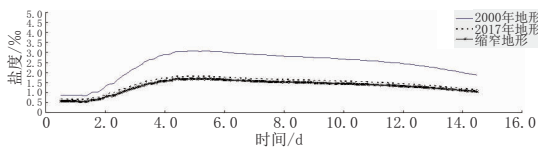


图 23 路径 b1 盐水团核心的 24 h 平均盐度

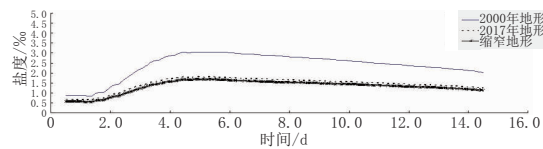


图 24 路径 b2 盐水团核心的 24 h 平均盐度

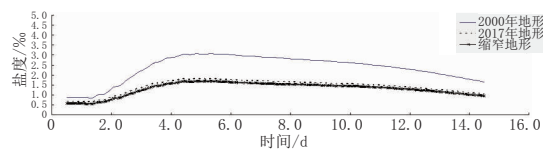


图 25 路径 b3 盐水团核心的 24 h 平均盐度

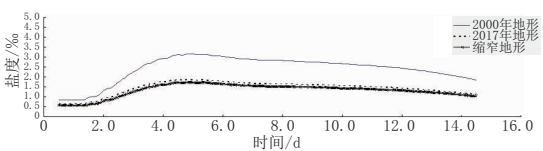


图 26 路径 b4 盐水团核心的 24 h 平均盐度

规律较为吻合:即北支倒灌高浓度水体形成于大潮期间(即第 2 d~第 5 d)。随着潮差的减小,倒灌的减弱,高浓度盐水团开始下移,下移初期速度较慢,中期速度有所增加,盐水团进入门口外以后下移速度逐渐趋近于 0。说明北支的地形变化,虽然会导致北支倒灌盐水量的增减,但对北支盐水团的活动没有显著影响。

与不同地形下北支倒灌盐水量的增减相吻合,各路径上盐水团核心的盐度发生了相应的增减。2000—2017 年,路径 a1 上大潮时期盐水团核心盐度减小了 $1.9‰$,小潮盐水团核心核心平均也减小 $0.15‰$ 。2017—中缩窄方案,路径 a1 上盐水团核心有所减小,其中大潮期间盐度平均减小 $0.17‰$,小潮期间平均减小 $0.09‰$ 。

相比 2000—2017 年,b1、b2、b3、b4 路径上盐水团在下移起始时刻(第 6 天 0 时刻),盐水团核心潮周期平均盐度减小了 $1.25‰$,在下移末期,分别减小

了 $0.71‰$ 、 $0.78‰$ 、 $0.6‰$ 、 $0.72‰$ 。相比 2017—中缩窄方案,b1、b2、b3、b4 路径上盐水团在下移起始时刻(第 6 天 0 时刻),盐水团核心潮周期平均盐度减少 $0.13‰$,在下移末期,各路径盐水团核心潮周期平均盐度减小了 $0.03‰$ 左右。

5 结 论

(1)2000—2017 年期间,长江口北支北侧岸线相对稳定,南侧岸线在人工圈围的影响下,显著向北岸推进。中缩窄方案的实施将显著改变北支喇叭形河口的河势。这期间整体上看,北支河槽逐步淤高的态势,而局部上,由于人为的控制和潮波的作用,出现冲刷加剧的现象。

(2)2000—2017 年期间地形变化使得北支潮汐、潮流特性发生一定改变。较 2000 年地形条件下,2017 年北支潮波的高潮位普遍抬高,低潮位在北支中上段有一定的下降。缩窄方案实施后,北支中上端潮位有所下降,其他特征潮位变化不大。

(3)2000—2017 年期间年地形改变使得北支倒灌明显减弱,中缩窄方案实施完成后将使得倒灌现象进一步减弱。地形改变造成的倒灌盐水量的增减会使得在南支活动的倒灌盐水团的盐度有显著的增减,但对盐水团在南支的活动规律影响较小。

参考文献:

- [1] 张静怡,胡震云,黄志良.近年长江口北支涌潮变化及其成因分析[J].水科学进展,2007(5):724-729.
- [2] 陶晓东.长江口北支综合整治问题分析和研究方向探讨[J].江苏水利,2016(5):1-5.
- [3] 朱建荣,鲁佩仪,唐川敏,等.长江河口北支建闸对减轻盐水入侵的数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2020,3(5):13-22.
- [4] 顾靖华,朱建荣,裘城,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] 李伯昌,余文畴,陈鹏,等.长江口北支近期水流泥沙输移及含盐度的变化特性[J].水资源保护,2011,27(4):31-34.
- [6] 章卫胜.中国近海潮波运动数值模拟[D].南京:河海大学,2005.
- [7] 杨同军,王义刚,黄惠明,等.长江河口盐水入侵数值模拟研究[J].水道港口,2013,34(6):475-481.
- [8] 童朝锋,刘丰阳,邵宇阳,等.长江口北支崇启大桥处潮位和盐度过程研究[J].水道港口,2012,33(4):291-298.
- [9] 周谷城,邵雨辰,冯佳佳,等.长江口北支倒灌盐水团对取水口的影响及流量相应规律[J].水电能源科学,2019,37(7):22-24.