

长江口平面盐度锋对径流量变化的响应特征

匡翠萍, 陈括, 武云龙, 王洁

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于 1950 年—2018 年大通站月均径流量数据, 应用 MIKE21 软件建立长江口平面二维水动力及盐度输运模型, 探究三峡工程建成后径流量变化对长江口 4 支平面盐度锋位置与强度的影响。结果表明: 在长江口口门处, 全年平均盐度整体增加, 南槽处增加最明显; 除北港外, 各支盐度锋都具有双锋面结构; 锋面位置与径流量成线性关系, 第一锋面位置变化较第二锋面明显; 各锋面强度与径流量成二次函数关系, 二次项系数在第一锋面处为正, 第二锋面处为负。

关键词: 长江口; 径流量; 盐度锋; 数值模拟

中图分类号: P753

文献标志码: A

Response Characteristics of Horizontal Salinity Front to Runoff in the Yangtze River Estuary

KUANG Cuiping, CHEN Kuo, WU Yunlong, WANG Jie
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.)

Abstract: Based on the monthly average discharge calculated from measured runoff from 1950 to 2018 at the Datong Station in the Yangtze River Estuary, the two-dimensional hydrodynamic and salinity transport model was established by MIKE21 to investigate the effect of runoff change on the position and intensity of horizontal salinity fronts in the four branches of the Yangtze River Estuary after the Three Gorges Project was completed. The numerical results show that: the annual average salinity increases in the mouth of the Yangtze River Estuary and the increase is the most obvious in the South Passage. Except the North Channel, all salinity fronts have a double frontal structure. There is a linear relationship between the position of the salinity front and the runoff, and the change of position at the first front is more obvious than that at the second front. The

relationship between the intensity of each front and the runoff is a quadratic function. The coefficient of the quadratic term is positive at the first front and negative at the second front.

Key words: the Yangtze River Estuary; runoff; salinity front; numerical simulation

长江口地形复杂多变, 属中等强度的潮汐河口, 外海高盐度盐水与上游冲淡水交汇于此, 产生了复杂的水动力环境, 盐水入侵季节性变化明显。河口上游淡水与外海盐水之间存在一个过渡带, 常被称为冲淡水羽流(或羽状锋), 长江羽流的范围很大, 可延伸近百公里, 在其核心部位往往出现一道锋面, 常称其为盐度锋。实测数据显示, 长江口水下沙洲的迁移与盐度锋位置的变化保持一致, 这说明盐度锋对于泥沙的输运及水下三角洲的发展有一定的影响^[1-2]。盐度锋附近聚集大量的微生物及污染物, 易使赤潮爆发, 严重影响水环境^[3-4]。实测数据表明, 高叶绿素 a 浓度的空间分布与盐度锋的位置有很强的相关性^[5]。盐度锋附近污染物、悬沙、赤潮的增加加剧了氧气的消耗并阻碍了氧气的交换, 被认为是长江口缺氧区形成的重要原因^[6-7]。

盐度锋作为产生于河口水域的重要物理现象, 对河口区潮流变化、物质输运及沉降过程有着重要影响。作为海水的辅聚区, 盐度锋的典型特征就是盐度梯度大, 并伴有明显跃迁现象, 因而受到国内外河口研究者的广泛关注。Molinas 等^[8]以亚马逊河口为例, 利用 Delft3D 模型对底层盐度锋的时空变化进行研究, 得到风、径流量等因素对底层变化的不同响应程度。毛汉礼等^[2]通过对长江口实测数据的分析, 将长江冲淡水以主体边界和整体边界划分为两

收稿日期: 2021-08-02

基金项目: 同济大学海洋交叉平台项目(2022-2-ZD-04); 上海市教委科研创新计划(2021-01-07-00-07)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程和河口海岸水环境。

E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通信作者: 王洁(1997—), 女, 博士生, 主要研究方向为河口海岸水环境。E-mail: 2011141@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

部分,以26 psu(psu指1 000 g水内溶解的无机盐克数)等盐线作为冲淡水主体边界,以32 psu等盐线作为冲淡水整体边界亦即最外侧边界。胡方西等^[9]依据盐度将长江口盐度锋划分为3级,即内侧锋(河口锋)、羽状锋、外侧锋(海洋锋),分别以7 psu、25 psu及31 psu作为各级锋面的特征盐度参数,结果表明羽状锋对于物质输运乃至水下三角洲的发育至关重要。陈伟等^[10]通过盐度实测资料发现,夏季象山港出现双锋面结构,冬季双锋面结构消失,并借助潮锋理论对盐度锋系统的形成机制进行了分析,进一步探究象山港盐度锋对径流量变化的响应特征。高钦钦等^[11]通过ECOM(estuarine coastal and ocean model)理想河口模型,探究了盐度锋对河口环流的影响,结果表明在锋面附近出现表层向海、底层向陆的密度流,并随锋面强度降低而环流流速减弱。

近年来,随着经济的快速发展和人口的迅猛增长,长江口地区受到越来越多人类活动的干预,航道整治、填海造陆和修建水库等大型工程改变了河口原有的动力条件,使得长江口径流条件发生了变化,对口门处的盐度锋产生一定的影响。锋面变化会对泥沙沉积、河口水质产生直接影响,进而对河口生态造成间接影响。目前,大多数对盐度锋的研究集中在锋面强度的变化及对物质输运的影响,而三峡工程改变了径流量的年内分配。本研究重点分析大通站实测径流量变化规律,并建立长江口平面二维水动力及盐度输运数学模型,研究长江口4支平面盐度锋对径流量变化的定量响应关系。

1 研究方法及模型设置

1.1 研究方法

研究区域如图1所示。沿长江口南槽、北槽、北港及北支深泓线分别确定一条纵剖面(见图2),各纵剖面起点均位于南北支分叉处(0 km里程碑位置),其中北港与南北槽纵剖面在南支重合(0~40 km),南槽与北槽纵剖面在南支及南港部分重合(0~70 km)。盐度锋强度 h_{Hgs} 以盐度梯度表示,根据公式 $h_{Hgs} = \Delta s / \Delta x$ (Δs 为 Δx 距离盐度变化)计算,以 h_{Hgs} 的最大值作为各支盐度锋所在的位置。若一个纵剖面上出现多个盐度梯度的峰值,则从南北支分叉处向下游依次为第一锋面、第二锋面,并以盐度梯度最大的锋面作为主锋面。

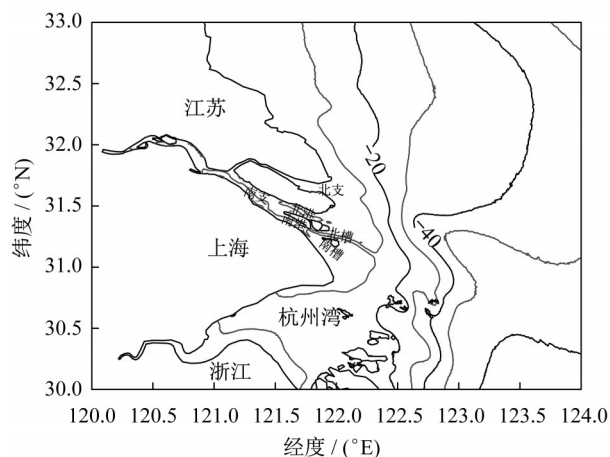


图1 研究区域(高程等值线,单位:m)

Fig.1 Study area (elevation contour, unit: m)

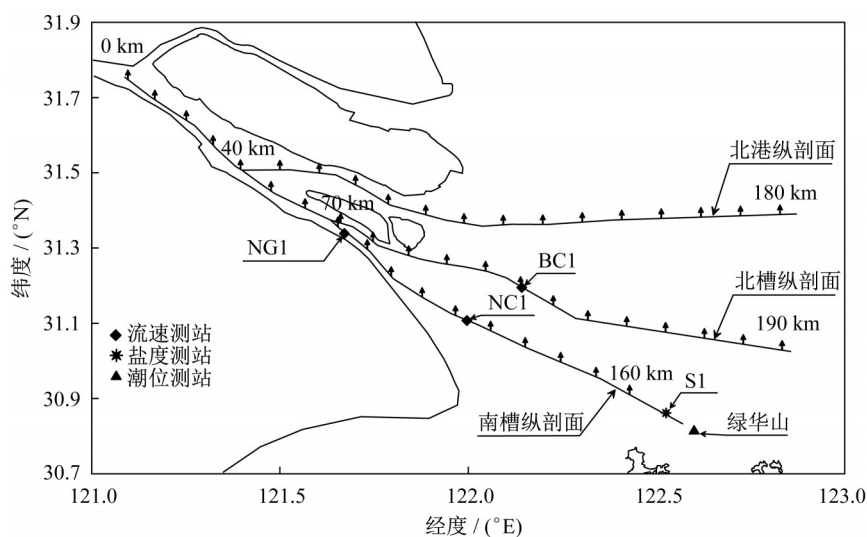


图2 纵剖面及观测站点分布

Fig.2 Longitudinal profile and distribution of observation stations

基于MIKE21软件建立了长江口平面二维水动力和盐度输运数学模型。MIKE21是由丹麦水动力研究中心(Danish Hydraulic Institute)开发的一款模拟内陆河流及海洋动力的数模软件。本研究中采用水动力(HD)模块对长江口平面二维潮流及盐度输运进行模拟,具体控制方程如下所示^[12]:

潮流控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} &= hS \\ \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} - \\ &\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \\ \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} &= -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - \\ &\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (1)$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标; h 为总水深, $h = \eta + d$,其中 η 为水面高程, d 为静水深; S 为源(汇)流率; \bar{u}, \bar{v} 分别为 x, y 方向的垂向平均流速分量; f 为柯氏力

参数, $f = 2\Omega \sin \phi$,其中 Ω 为地球自转角速度, ϕ 为地理纬度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的参考密度; P 为大气压力; u_s, v_s 为源(汇)流向外界的速度分量; τ_{sx} 和 τ_{sy} 为水体表面切应力分量; τ_{bx} 和 τ_{by} 为底床切应力分量; T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} 为侧向切应力分量。

盐度输运扩散方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{s}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{s}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{s}}{\partial y} &= \\ h \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} \right) \right) &+ hs_s S \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \bar{s} 为垂向平均盐度; D_h 为水平扩散项; s_s 为盐度源(汇)项。

1.2 计算范围及模型设置

模型计算范围为西起江阴(长江)及仓前(钱塘江)(东经120.0°),东至东经125.5°,距长江口门约500 km;南起温州以南(北纬27.0°),北至江苏盐城以北(北纬34.3°),涵盖整个长江口、杭州湾及舟山群岛。模型采用无结构三角形网格(见图3),网格节点数为46 066,单元数为89 710。为确保计算精度及计算效率,网格分辨率由远海边界向近岸逐渐加密,其中北槽区域工程复杂、结构物细长,故对该区域进行局部加密,最小网格为10 m,最大网格为33 000 m。

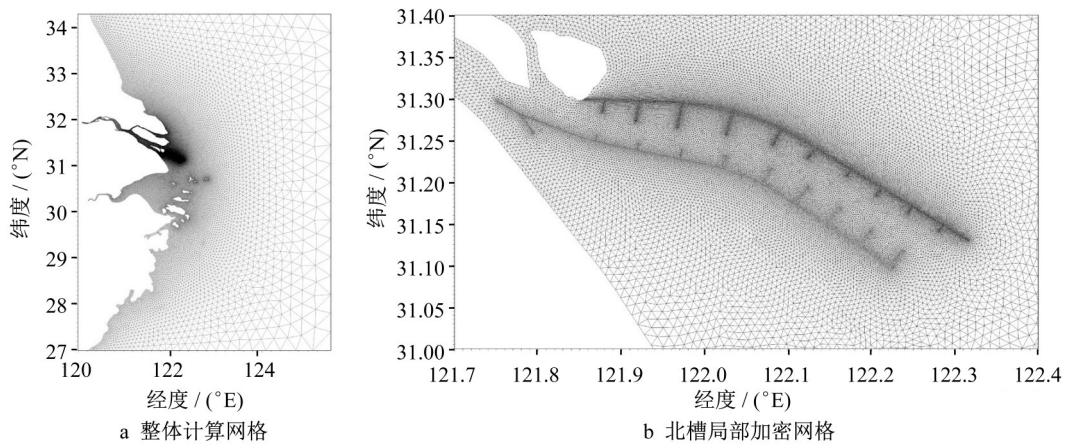


图3 计算网格

Fig.3 Computational grid

模型外海边界均采用由潮汐调和常数计算的潮位过程进行控制,2条河流开边界分别为江阴及仓前。大通站为长江潮区界控制站,江阴站为长江潮流界控制站,潮区界与潮流界之间不受潮流影响,大通站具有最长期的实测资料。江阴边界采用当年的大通站径流量进行设置,而钱塘江径流量较小,故仓前边界按照钱塘江多年平均径流量取整1 000 m³·s⁻¹进行设置。上游边界盐度设为零,外海开边界盐度根据国家海洋科学

数据中心的实况分析数据给定。表面风场采用欧洲中期天气预报中心分析产品ERA5提供的海面10 m处风速进行设定。模型计算时间步长在0.01~10 s内自动调节,克朗数小于1即可,故设置为默认值0.8。模型采用干湿动边界处理技术,干临界水深为0.005 m,湿临界水深为0.050 m。水平涡黏系数通过Samagorinsky亚网格尺度模型进行计算,Samagorinsky系数设为0.28,模型糙率采用曼宁数,数值范围设为60~98。

1.3 模型验证

模型潮位验证采用绿华山潮汐表潮位数据,从 2014 年 7 月 1 日 00:00 至 16 日 00:00。流速及流向验证采用 3 个观测点流速流向数据,从 2014 年 2 月

28 日 04:00 至 3 月 1 日 04:00。盐度验证采用 S1 观测点的大、小潮盐度数据,大潮从 2014 年 7 月 13 日 15:00 至 14 日 15:00,小潮从 2014 年 7 月 20 日 08:00 至 21 日 08:00,验证结果如图 4 所示。

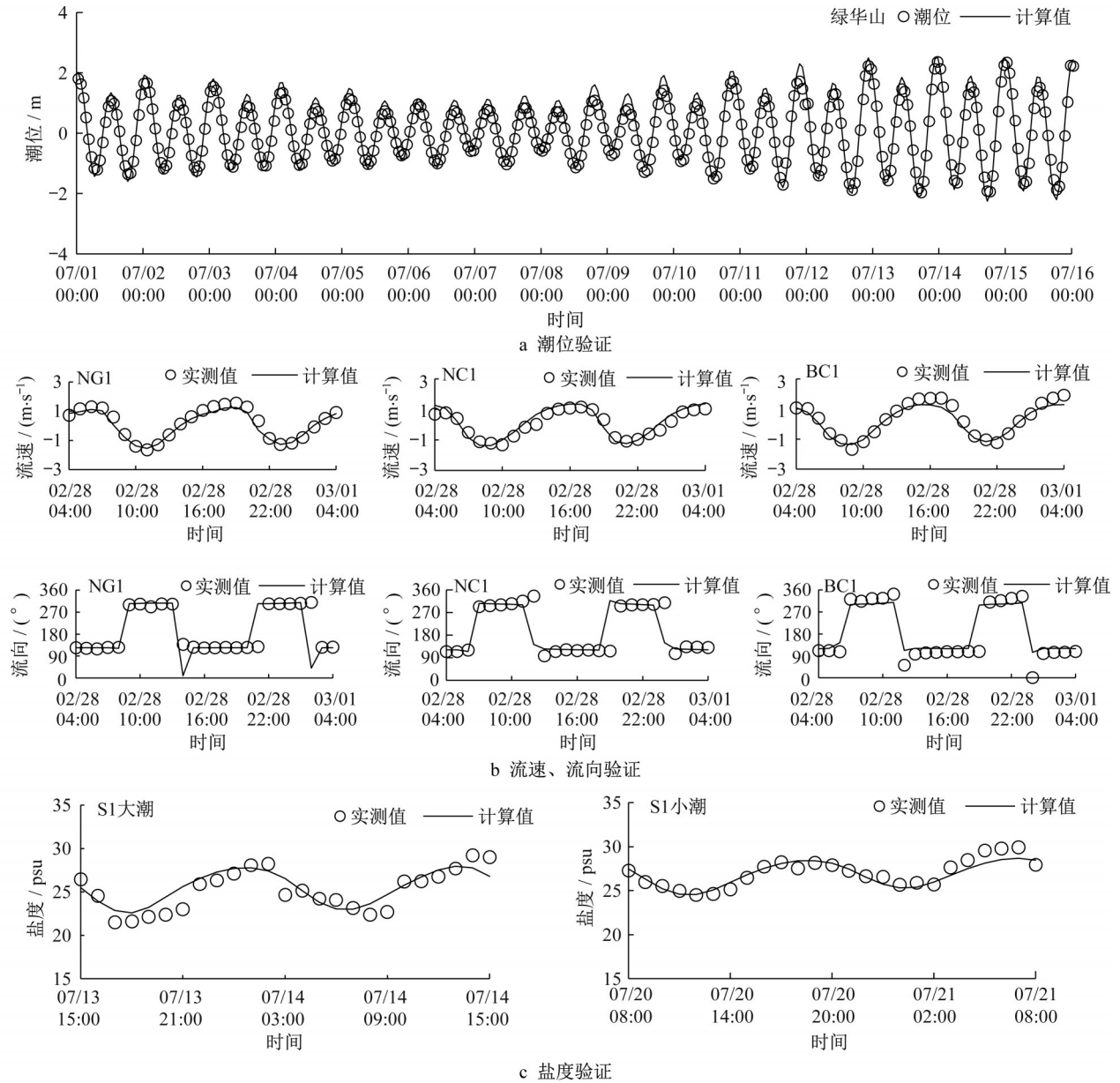


图 4 潮位、潮流及盐度验证

Fig.4 Verification of tidal level, tidal current and salinity

为定量评价模型模拟结果的优劣,选用 Willmott^[13]提出的 Skill 法对模型进行效率评价。Skill 法的具体方程为:

$$S_{Skill} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - D_i|^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{D}| + |D_i - \bar{D}|)^2} \quad (5)$$

式中: S_{Skill} 为 Skill 数; M 为模型计算值; D 为实测值;

\bar{D} 为实测平均值; N 为样本数量。当 S_{Skill} 为 1.00 时,表示模型计算值和实测值完全一致;当 S_{Skill} 大于 0.65 时,表示模型计算结果为“极好”;当 S_{Skill} 在 0.65 至 0.50 之间时,表示模型计算结果为“非常好”;当 S_{Skill} 在 0.50 至 0.20 之间时,表示模型计算结果为“好”;当 S_{Skill} 小于 0.20 时,表示模型计算结果为“差”。各观测站 S_{Skill} 值如表 1 所示,可见效率评价结果均为极好,表示模型能够良好地模拟实际情况。

2 长江口盐度对三峡工程调度运行的响应特征

三峡水库的具体调度方案为:每年6月中旬至9月底,水库按防洪水位 145 m 运行;每年10月截流蓄水,将水位由 145 m 提高至 175 m;每年11月一般维持正常蓄水位 175 m 运行,若来水量达不到发电标准,则水位逐步下降;每年5月底保证水库水位不低于 155 m;6月上旬水位降至 145 m^[14]。本研究以2003年作为三峡大坝工程对径流量影响的分界点,统计了1950年—2018年大通站的月平均径流量,具

体如图5和表2所示。

表1 模型评价结果

评价项目	地点	S_{Skill}	效率评价
潮位	绿华山	0.98	极好
	NG1	0.98	极好
	BC1	0.97	极好
流速	NC1	0.97	极好
	NG1	0.85	极好
	BC1	0.92	极好
流向	NC1	0.91	极好
	S1大潮	0.91	极好
盐度	S1小潮	0.94	极好

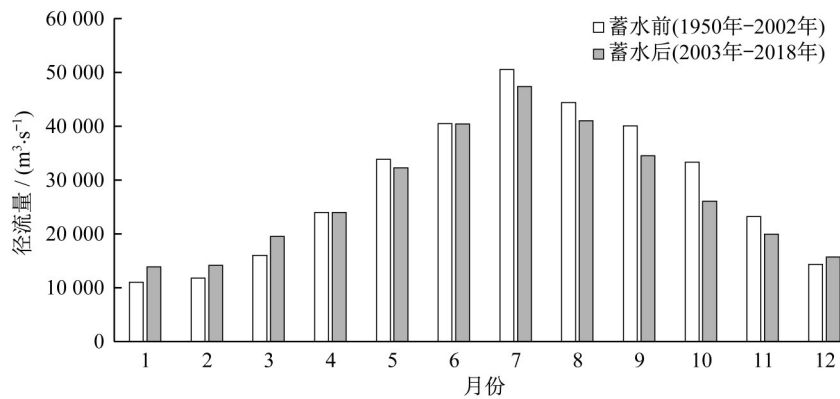


图5 三峡工程建成前后大通站月平均径流量变化

Fig.5 Monthly average runoff change at the Datong Station before and after the Three Gorges Project was completed

表2 三峡工程建成前后大通站月平均径流变化

Tab.2 Monthly average runoff change at the Datong Station before and after the Three Gorges Project was completed 单位: m³·s⁻¹

月份	三峡工程建成前	三峡工程建成后	变化量
1	10 995	13 854	2 859
2	11 764	14 187	2 423
3	16 002	19 537	3 535
4	23 995	23 981	-14
5	33 857	32 260	-1 597
6	40 453	40 441	-12
7	50 528	47 381	-3 147
8	44 431	41 034	-3 397
9	40 043	34 521	-5 522
10	33 305	26 045	-7 260
11	23 197	19 923	-3 274
12	14 318	15 687	1 369
年平均	28 574.00	2 7404.25	-1 169.75

由大通站月均径流量分析可知,三峡工程建成后径流量增加主要出现在12月至次年3月,其中3月增加最多,可达3 535 m³·s⁻¹;径流量减少主要出现在4月—12月,其中10月减少最多,可达7 260 m³·s⁻¹。年内径流量分布总体呈现季节性差异缩小、洪

峰流量削减的特征。将三峡工程建成前径流量与三峡工程建成后径流量(见表2)下盐度时空变化进行对比,为保证盐度达到稳定,共计算14个月,其中第一个月和最后一个月分别为前一年的12月与下一年的1月,选取中间的12个月进行分析。为全面分析三峡工程影响下长江口盐度时空变化特征,选取全年(1月—12月)、冬季(12月—次年2月)及秋季(9月—11月)3个阶段,其中冬季与秋季分别对应径流量增加与减少最明显的2个季节,而全年则能反映长江口的总体变化趋势。

图6为三峡工程建成前后年平均盐度的变化特征。从图6可以看出,受三峡工程建成后年平均径流量降低的影响,长江口口门处的盐度升高,但各支盐度增加程度不同。南槽口盐度增加值最大可达1.0~1.3 psu,较三峡工程建成前增加约10%;北支中下游段盐度增加0.7~0.8 psu,增加约7%;北港受径流量变化影响最小,盐度仅增加约5%。图7为三峡工程建成前后冬季长江口盐度的变化特征。三峡工程建成后冬季长江口盐水入侵程度整体降低,

其中变化最明显的是南槽、北槽,盐度降低 0.5~0.9 psu,降低约 8%;其次是北港口,盐度降低 0.5~0.7 psu,降低约 7%;最后是北支,降低 0.3~0.6 psu,其中北支上游盐度降低明显,降低约 6%。图 8 为三峡工程建成前后秋季长江口盐度的变化特征。三峡工程建成后,秋季南槽盐度依旧变化最明显,盐度增加 1.0~2.4 psu,增加约 23%;其次是北支中游段,盐度增加 1.4~2.2 psu,增加约 20%;最后是北槽与北港,盐度增加 0.5~1.9 psu,增加约 15%。

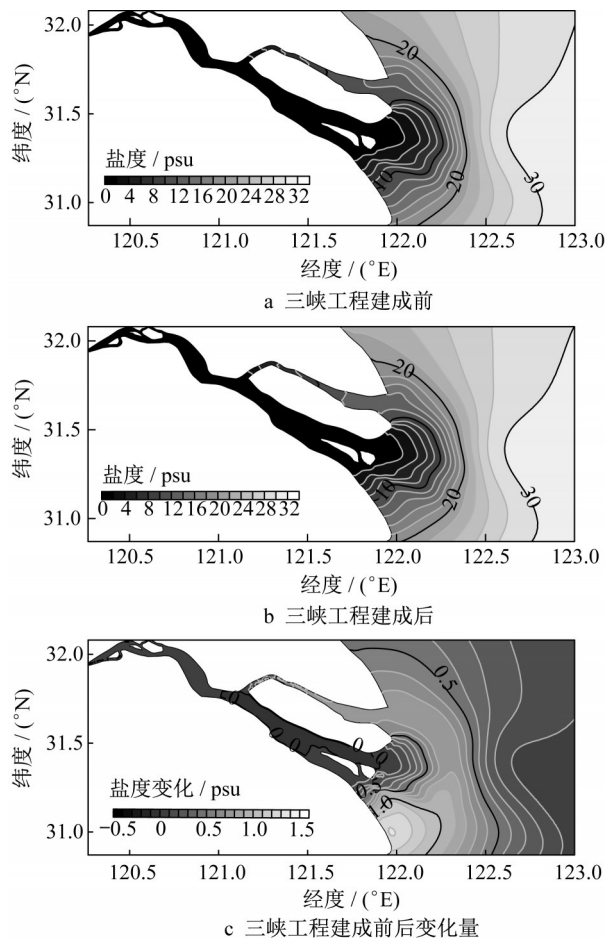


图 6 三峡工程影响下长江口年平均盐度分布

Fig.6 Annual average salinity distribution in the Yangtze River Estuary due to the Three Gorges Project

3 盐度锋对径流量变化的响应特征

长江口盐度梯度的变化主要受径流及潮流控制,前述讨论的年平均盐度以及随季节变化的盐度平面分布,反映了径流和涨落潮流对盐度的共同影响。径流和涨潮流联合作用下,北港口门外盐淡水混合水体明显向北移动;径流和落潮流联合作用下,北港和南北槽口

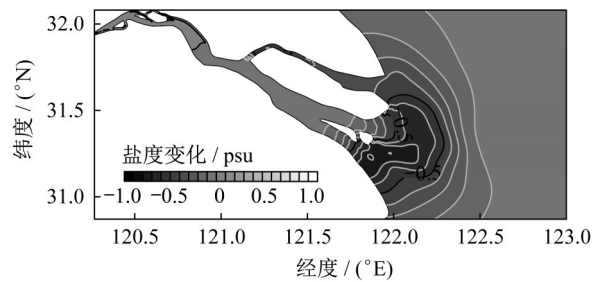


图 7 三峡工程影响下长江口冬季平均盐度变化

Fig.7 Average salinity change in winter in the Yangtze River Estuary due to the Three Gorges Project

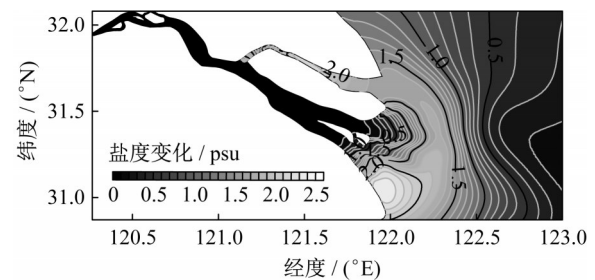


图 8 三峡工程影响下长江口秋季平均盐度变化

Fig.8 Average salinity change in autumn in the Yangtze River Estuary due to the Three Gorges Project

门外盐淡水混合水体明显向东南移动;落潮期间长江口门外盐淡水混合水体向海输运更远,水平盐度梯度也比涨潮期间大。由于重点探究径流量变化对长江口 4 支盐度锋特征值的影响,因此本节中选择 M_2 分潮作为外海边界驱动数学模型,减小不规则潮汐变化对盐度锋的影响。模型的计算时长为 3 个月,根据上海海事局编制的 1972 年—2018 年《长江口潮汐表》^[15] 计算得到该时段的最大潮差为 3.21 m。根据水利部 1999 年—2000 年《水情年报》(<http://mwr.gov.cn>),大通站枯季最低流量为 $8\,100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,洪季最大流量为 $83\,900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,故在模型中设置径流量范围为 $10\,000\sim 80\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、间隔为 $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 共 15 种情景,模型的其他设置保持不变。分析盐度锋对径流量变化的响应特征时,为减少图形所占篇幅,仅绘出径流间隔为 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的 8 种情景。

3.1 南槽

图 9 为 M_2 分潮驱动下南槽纵剖面盐度及其梯度对径流量的响应特征。从图 9 可以看出,南槽的盐度梯度沿纵向呈现出双峰结构,即南槽中上游的强锋面(主锋面)和南槽下游的弱锋面。随径流量的增加,第一锋面下移并逐渐与第二锋面合并。当径流量较小时 ($10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) 盐水入侵较严重,南槽第一

锋面非常强,盐度梯度达到 $0.92 \text{ psu}\cdot\text{km}^{-1}$,盐度为 15.22 psu ,并且第一锋面位置最靠上游(距起点 95 km 左右),第二锋面处于萌发阶段;当径流量为 $10\,000\sim 50\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着径流量的增加,第一锋面逐渐削弱并向外海移动,第二锋面逐渐增强但

位置几乎不变,始终在距起点 147 km 附近,即主锋面由第一锋面向第二锋面转移,并且主锋面盐度逐渐降低;当径流量超过 $50\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,第一锋面已基本消亡,主锋面变为第二锋面,位置随径流量增加几乎无变化,此时第二锋面盐度在 8 psu 左右。

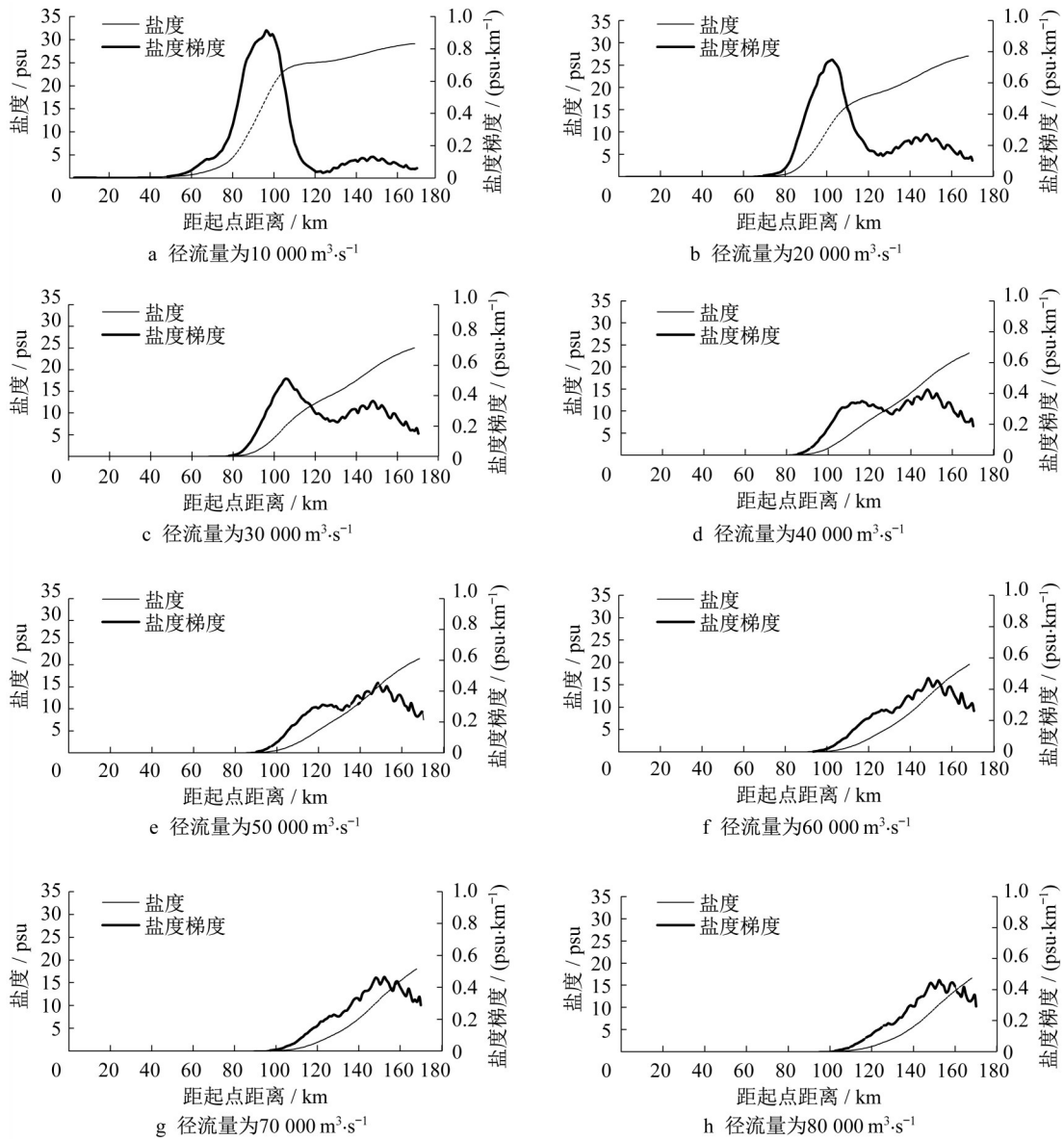


图9 径流量变化对南槽纵剖面盐度及其梯度的影响

Fig.9 Longitudinal salinity and salinity gradient in the South Passage due to runoff change

3.2 北槽

图10为 M_2 分潮驱动下北槽盐度及其梯度对径流量的响应特征。当径流量为 $10\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北槽盐度锋存在双锋面结构,其中第一锋面盐度为 8.07 psu ,第二锋面盐度为 21.30 psu 。当径流量为 $20\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,双锋面结构消失,随着径流量的增加,北槽主锋面依然有从第一锋面向第二锋面转移并合并的趋势。当径流量超过 $20\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北

槽主锋面已经移动到第二锋面处;当径流量为 $30\,000\sim 50\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北槽第二锋面强度维持在一定水平不变。然而,随着径流量进一步增大,主锋面(此时为第二锋面)强度及该锋面对应的盐度又开始降低,但位置始终没有发生明显变化。

3.3 北港

图11为 M_2 分潮驱动下北港盐度及其梯度对径

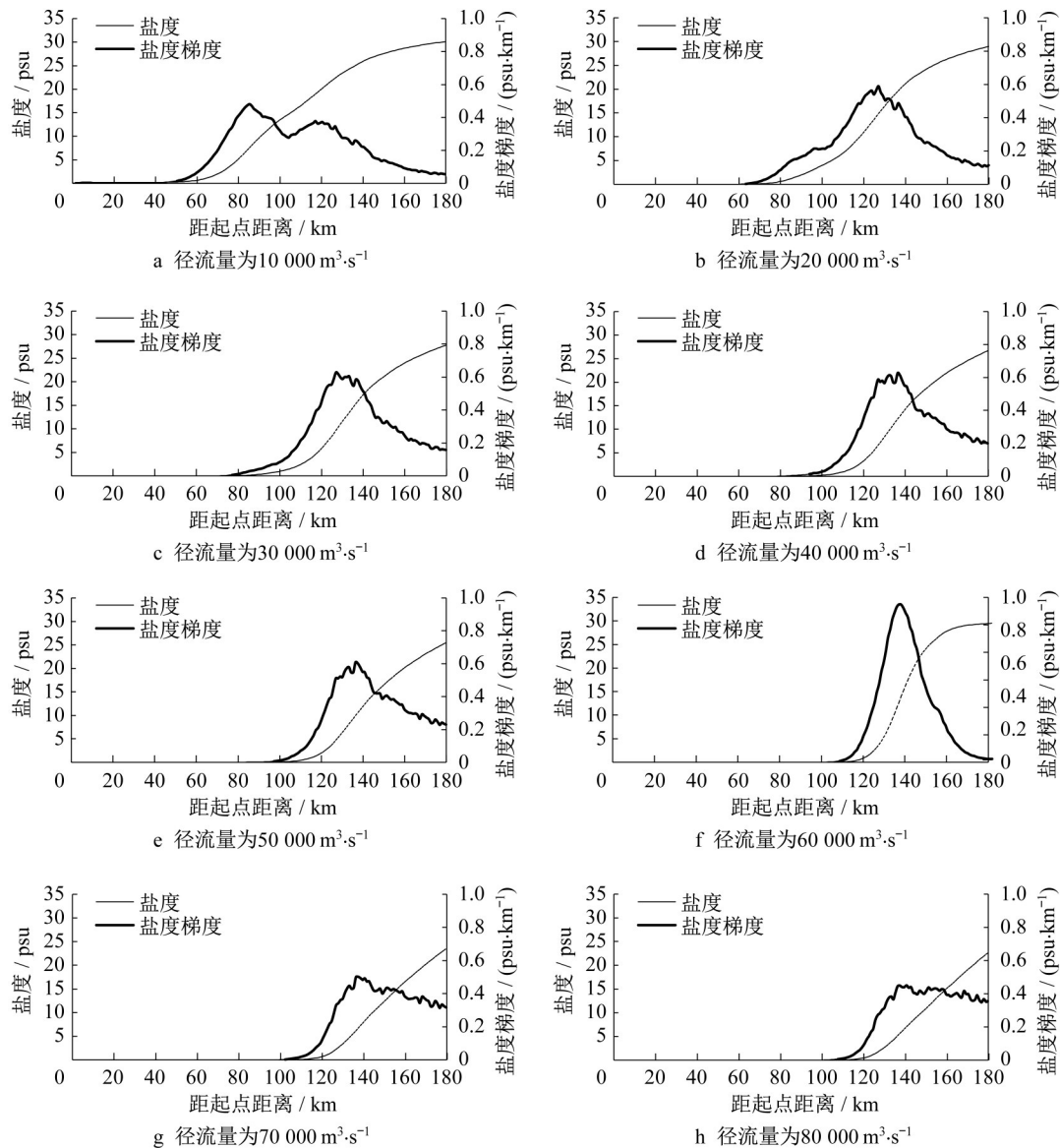


图 10 径流量变化对北槽纵剖面盐度及其梯度的影响

Fig.10 Longitudinal salinity and salinity gradient in the North Passage due to runoff change

流量的响应特征。从图 11 可以看出,当径流量为 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北港出现了微弱的双锋面结构,但当径流量增加到 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北港盐度锋的双锋面结构完全消失。根据对南槽、北槽低径流量条件下锋面结构的分析可以推断,当径流量小于 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北港是可以呈现双锋面结构的,但实际中长江上游径流量为 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时已经足够小了,再进一步减小径流量研究北港锋面变化的意义不大,因此认为北港盐度锋只有单锋面结构。北港盐度锋位置随径流量变化的响应微弱,基本停留在距上游 $130\sim 140\text{ km}$ 的范围内,但其强度却要比南槽、北槽锋面大很多,并且主锋面盐度随径流量的增

大逐渐减小,变化范围为 $13.99\sim 18.79\text{ psu}$ 。当径流在 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以内时,北港盐度锋强度对径流量变化的响应较敏感;当径流超过 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以后,锋面强度基本不再随径流量的变化而变化。

3.4 北支

图 12 为 M_2 分潮驱动下北支盐度及其梯度对径流量的响应特征。北支第一锋面对径流量变化响应十分强烈,当径流量只有 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北支第一锋面强度较大,盐度梯度可达 $1\text{ psu}\cdot\text{km}^{-1}$ 以上,并且位于靠近上游的位置(距起点 11 km),此时锋面对应的盐度为 7.46 psu ;当径流量增加至 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,北支第一锋面强度急速下降,盐度梯度为 0.36

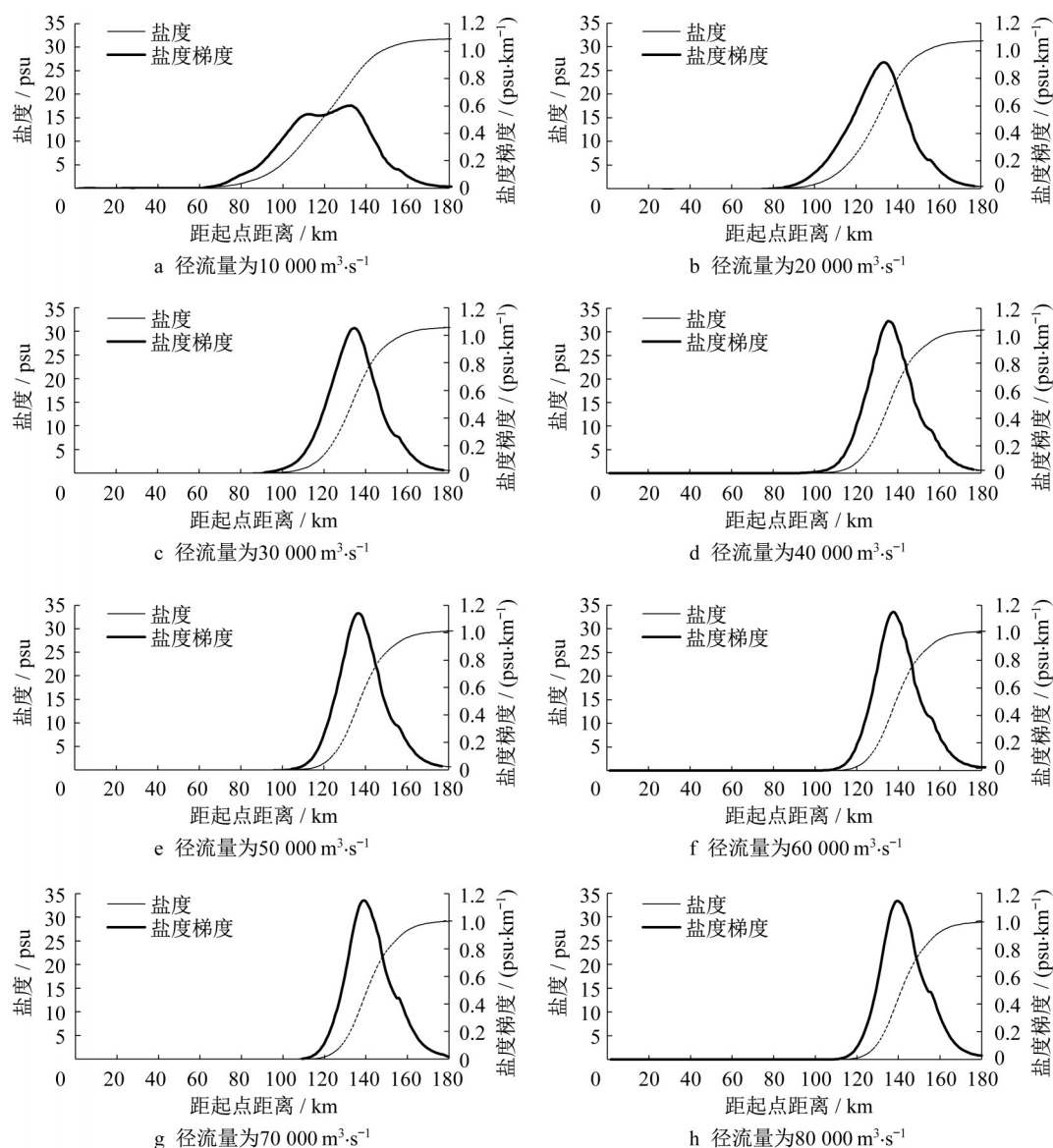


图 11 径流量变化对北港纵剖面盐度及其梯度的影响

Fig.11 Longitudinal salinity and salinity gradient in the North Channel due to runoff change

$\text{psu}\cdot\text{km}^{-1}$, 锋面开始呈现波浪形态, 位置仍处于上游 (距起点 13 km), 盐度也随之降低至 2.31 psu; 随着径流量进一步增加至 $30\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 第一锋面波浪形态依旧存在, 强度降低至 $0.17\ \text{psu}\cdot\text{km}^{-1}$, 并且第一锋面位置由第一波峰处 (距起点 13 km) 转移至最后波峰处 (距起点 53 km), 即从上游向中游移动; 当径流量大于 $40\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 第一锋面的波浪形态基本消失, 强度持续降低, 锋面主要位于距起点 58 km 以外的位置。北支第二锋面随径流量变化特征与北槽第二锋面基本一致, 当径流量在 $50\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以内时, 第二锋面强度随径流量增大而增加; 当径流量超过 $50\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 第二锋面强度随径流量增大而减小, 并且位置变化不明显, 位于距起点

109~113 km 处, 但第二锋面所对应的盐度随径流量的增加始终减小, 由 21.51 psu ($10\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) 降低至 8.64 psu ($80\,000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)。整体上, 随径流量的增加, 北支主锋面依旧由第一锋面向第二锋面移动并合并。

4 长江口盐度锋与径流量变化的定量关系

为探究各支盐度锋与径流量之间的定量关系, 绘制 15 种径流量情景下长江口 4 支盐度锋特征值 (位置、强度) 与径流量的拟合函数 (见图 13~16)。利用判定系数 R^2 进行拟合优度检验, R^2 越接近于 1,

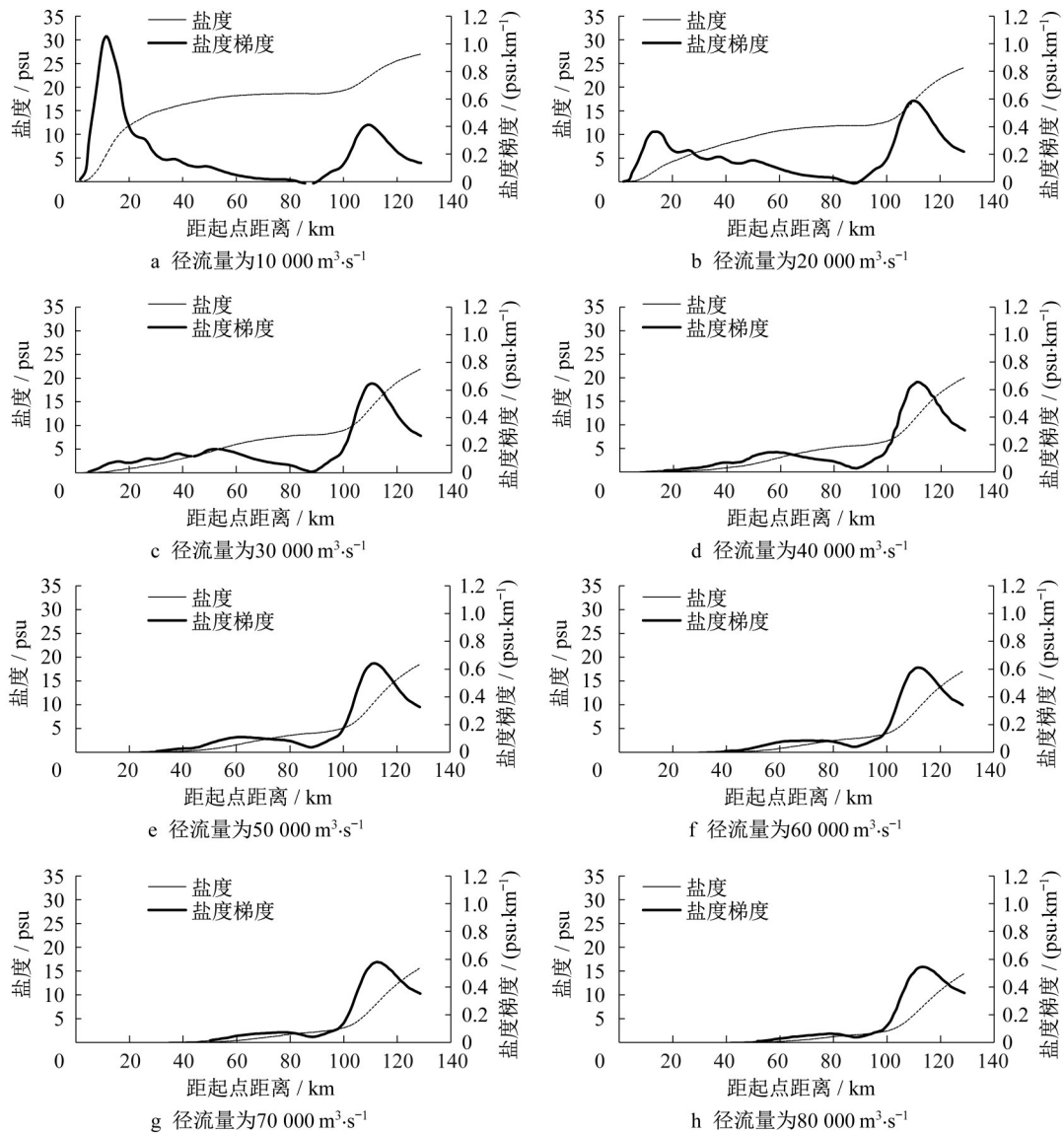


图 12 径流量变化对北支纵剖面盐度及其梯度的影响

Fig.12 Longitudinal salinity and salinity gradient in the North Branch due to runoff change

说明拟合关系越好。

图 13 为南槽盐度锋特征值与径流量的拟合函数关系。南槽第一锋面位置与径流量成线性相关, R^2 为 0.851, 强度与径流量成二次函数相关, R^2 为 0.916; 南槽第二锋面位置与径流量之间的拟合结果相对差一些, R^2 为 0.553, 这可能是由南槽第二锋面位置基本不随径流量改变造成的, 第二锋面强度与径流量成二次函数相关, R^2 为 0.783。

图 14 为北槽盐度锋特征值与径流量的拟合函数关系。由于北槽盐度锋第一锋面在径流量超过 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时就已经消失, 因此仅对第二锋面的变化特征进行拟合。北槽第二锋面位置与径流量成线性相关, R^2 为 0.814, 强度与径流量成二次函数相关,

R^2 为 0.829。

图 15 为北港盐度锋特征值与径流量的拟合函数关系。北港盐度锋为单锋面结构, 锋面位置与径流量之间成线性相关, R^2 为 0.764, 强度与径流成二次函数相关, R^2 为 0.745。

图 16 为北支盐度锋特征值与径流量的拟合函数关系。由于北支盐度锋的第一锋面存在波浪形态, 并且随径流量增加有从第一波峰向最后一波峰移动的趋势, 同时第一锋面位置随径流量增加出现突变的情况。经拟合, 第一锋面位置与径流量成线性相关, R^2 为 0.839, 强度与径流量成二次函数相关, R^2 为 0.894。北支第二锋面位置与径流量之间成线性相关, R^2 为 0.628, 强度与径流量成二次函数相关,

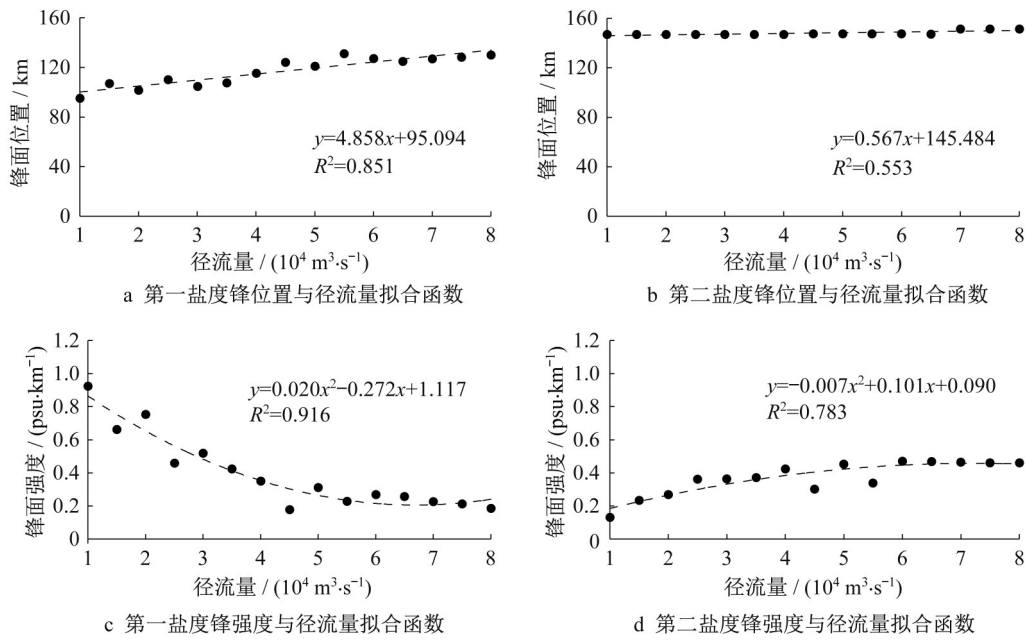


图13 南槽盐度锋特征值与径流量的拟合函数

Fig.13 Fitting function between salinity frontal eigenvalue and runoff in the South Passage

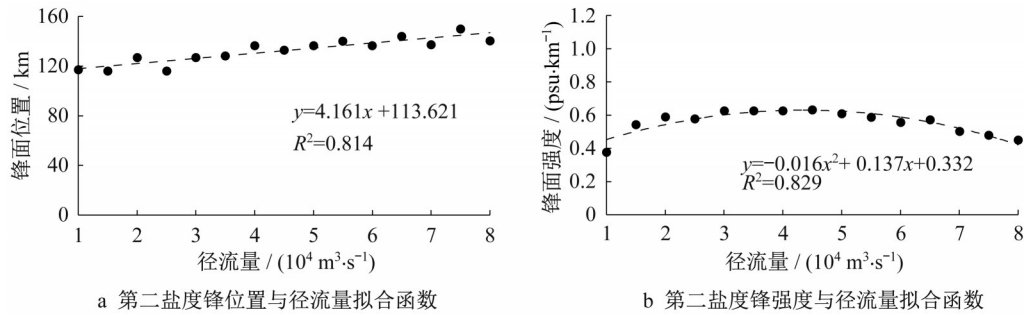


图14 北槽盐度锋特征值与径流量的拟合函数

Fig.14 Fitting function between salinity frontal eigenvalue and runoff in the North Passage

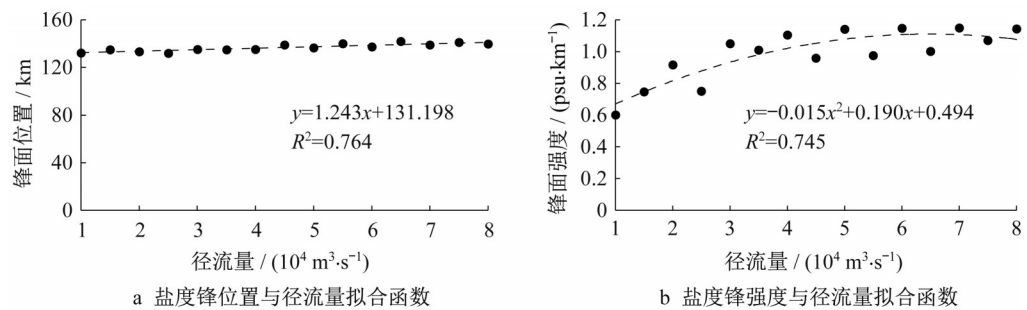


图15 北港盐度锋特征值与径流量的拟合函数

Fig.15 Fitting function between salinity frontal eigenvalue and runoff in the North Channel

R^2 为0.749。

各支的函数曲线可写成如下统一形式:

盐度锋位置与径流量之间函数关系为

$$y = Ax + B$$

盐度锋强度与径流量之间函数关系为

$$y = Cx^2 + Dx + E$$

将各个盐度锋的位置和强度与径流量的拟合系数进行统计,如表3和表4所示。可以看出:盐度锋位置与径流量成线性关系,第一锋面位置的变化比第二锋面更加明显;盐度锋强度与径流量成二次函数关系,并且二次项系数在第一锋面处为正,在第二锋面处为负。

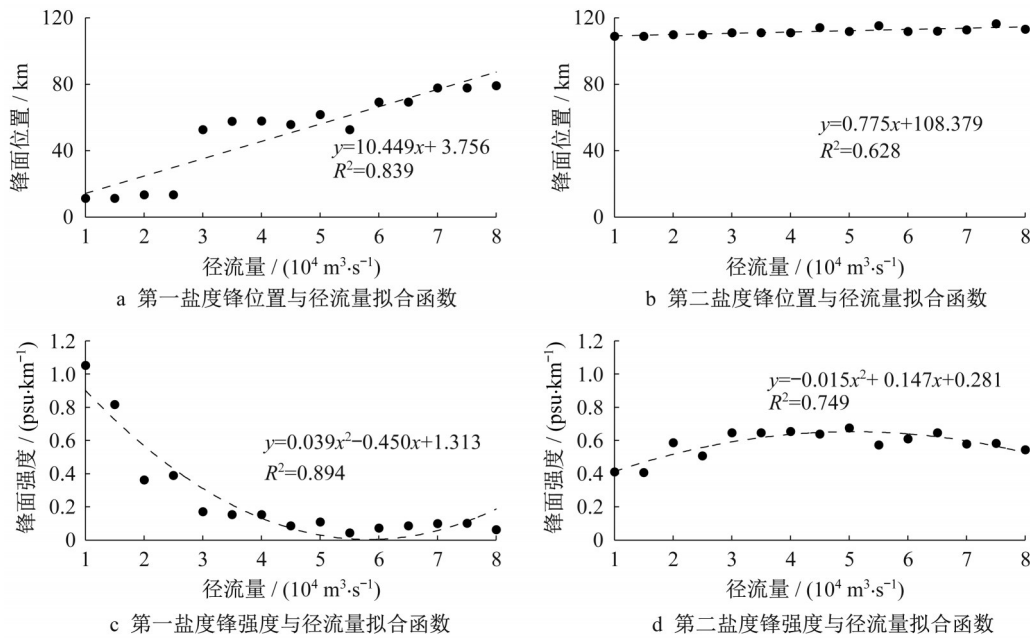


图 16 北支盐度锋特征值与径流量的拟合函数

Fig.16 Fitting function between salinity frontal eigenvalue and runoff in the North Branch

表 3 盐度锋位置与径流量关系的拟合系数

Tab.3 Fitting coefficient of the relationship between salinity frontal position and runoff

锋面名称	A	B	R^2
南槽第一锋面	4.858	95.094	0.851
南槽第二锋面	0.567	145.484	0.553
北槽第二锋面	4.161	113.621	0.814
北港锋面	1.243	131.198	0.764
北支第一锋面	10.449	3.756	0.839
北支第二锋面	0.775	108.379	0.628

表 4 盐度锋强度与径流量关系的拟合系数

Tab.4 Fitting coefficient of the relationship between salinity frontal intensity and runoff

锋面名称	C	D	E	R^2
南槽第一锋面	0.020	-0.272	1.117	0.916
南槽第二锋面	-0.007	0.101	0.090	0.783
北槽第二锋面	-0.016	0.137	0.332	0.829
北港锋面	-0.015	0.190	0.494	0.745
北支第一锋面	0.039	-0.450	1.313	0.894
北支第二锋面	-0.015	0.147	0.281	0.749

5 结论

(1) 在长江口口门处,三峡工程建成后年平均盐度整体增加,其中南槽盐度增加最明显,增加约 10%,北港受径流量影响最小,盐度仅增加 5%;冬季(12月—次年2月)盐度整体降低,南槽、北槽处降低最明显,降低约 8%;秋季(9月—11月)盐度整体增加,南槽增加最明显,增加约 23%。

(2) 除长江口北港外,其余各支盐度锋在低径流量下都呈现出较为明显的双锋面结构。北支第一锋面在径流量为 20 000~40 000 $m^3 \cdot s^{-1}$ 时呈现波浪

形态。随着径流量的增加,各支盐度锋均呈现由第一锋面向第二锋面移动并合并的趋势。

(3) 盐度锋位置与径流量成线性关系,并且第一锋面位置与径流量关系的斜率要大于第二锋面,表明第一锋面随径流量的变化较第二锋面明显;盐度锋强度与径流量成二次函数关系,并且二次项系数在第一和第二锋面处分别为正值和负值。

作者贡献声明:

匡翠萍:方法提出,论文撰写与修改。

陈 括:数据分析,论文撰写。

武云龙:数值模拟,图像绘制。

王 洁:数值模拟,论文撰写。

参考文献:

- [1] 陈沈良,谷国传,胡方西.长江口外羽状锋的屏障效应及其对水下三角洲塑造的影响[J].海洋科学,2001,25(5):55.
CHEN Shenliang, GU Guochuan, HU Fangxi. The barrier effect of plume front on the submerged delta development of Yangtze River Estuary[J]. Marine Sciences, 2001, 25(5): 55.
- [2] 毛汉礼,甘子钧,蓝淑芳.长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J].海洋与湖沼,1963(3):183.
MAO Hanli, GAN Zijun, LAN Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963(3): 183.
- [3] 宁修仁,史君贤,蔡昱明,等.长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J].海洋学报(中文版),2004,26(6):96.
NING Xiuren, SHI Junxian, CAI Yuming, et al. Biological productivity front in the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay and its ecological effects [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (Chinese Version), 2004, 26(6): 96.
- [4] HUANG S B, LI K M, JIANG G Q, et al. Influence of salinity fronts on nutrition substance and biology in Pearl River Estuary[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 18.
- [5] KIM H C, YAMAGUCHI H, YOO S, et al. Distribution of Changjiang diluted water detected by satellite chlorophyll-a and its interannual variation during 1998—2007 [J]. Journal of Oceanography, 2009, 65(1):129.
- [6] RABOUILLE C, CONLEY D J, DAI M H, et al. Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: the Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhne River [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1527.
- [7] MOON J H, PANG I C, YONG J H. Response of the Changjiang diluted water around Jeju Island to external forcings: a modeling study of 2002 and 2006 [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(13): 1549.
- [8] MOLINAS E, VINZON S B, DE PAULA X V C, et al. Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon Estuary[J]. Ocean Dynamics, 2014, 64: 1583.
- [9] 胡方西,胡辉,谷国传.长江河口盐度锋[J].海洋与湖沼,1995(S1):23.
HU Fangxi, HU Hui, GU Guochuan. Salinity fronts in the Changjiang River Estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995(S1): 23.
- [10] 陈伟,王小华.象山港盐度锋面及其动力成因[J].海洋学研究,1998(1):2.
CHEN Wei, WANG Xiaohua. Tidal fronts and their formation in the Xiangshan Bay [J]. Journal of Marine Sciences, 1998(1): 2.
- [11] 高钦钦,姜晓均,朱建荣.浅析径流量、盐度锋面与底形变化对河口环流的影响[J].上海水务,2013,29(4):26.
GAO Qinqin, JIANG Xiaojun, ZHU Jianrong. Brief analysis of the impact of the runoff, salinity front and topography variation on the estuary circulation [J]. Shanghai Water, 2013, 29(4): 26.
- [12] DHI Group. MIKE 21&MIKE 3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation [M]. Hørsholm: DHI Group, 2021.
- [13] WILLMOTT C J. On the validation of models [J]. Physical Geography, 1981, 2: 184.
- [14] 唐建华,赵升伟,刘玮祎,等.三峡水库对长江河口北支咸潮倒灌影响探讨[J].水科学进展,2011,22(4):554.
TANG Jianhua, ZHAO Shengwei, LIU Weiyi, et al. Influences of Three Gorges Reservoir on salt water intrusion from the North Branch to the South Branch of the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 554.
- [15] 中华人民共和国上海海事局.上海港杭州湾潮汐表[M].北京:人民交通出版社,2015.
Shanghai Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Shanghai Port and Hangzhou Bay tide table [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.