

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.010

# 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响

林若兰<sup>1,2</sup>, 卓文珊<sup>3</sup>, 曾珂<sup>1,2</sup>, 梁廖逢<sup>2,4</sup>, 刘茹<sup>2,4</sup>, 刘祖发<sup>2,4</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;  
3. 中山大学测试中心, 广东 广州 510275; 4. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:**采用 MIKE3 构建珠江东四口门三维水动力数值模型, 对枯水期各风向下珠江口的水动力进行模拟, 分析北风、东北风和东风对河口涨落潮流速、盐度分布、潮通量的影响。结果表明: 表层和底层水体的涨落潮流速变化在风的作用下是相反的。北风促进虎门垂向环流的发展, 使小潮期垂向净环流出现频次增加且环流强度增大, 导致口门内盐水入侵距离增大, 垂向平均盐度增大, 东北风的影响与北风相似但幅度较小, 东风则相反。北风、东北风使东四口门涨潮量减少, 东风使涨潮量增加, 落潮量的变化则不仅与风向相关, 还与河道走向、垂向环流有关, 因此 4 个口门的落潮量对风的响应有所不同。风的持续作用对虎门盐水入侵影响较大, 对其他三口门影响相对较小。

**关键词:** 风向; 咸潮入侵; 潮通量; 余流; 垂向环流; 东四口门; 珠江

**中图分类号:** P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)01-0066-10

**Influence of different wind direction on saltwater intrusion in East four portals of Pearl River** // LIN Ruolan<sup>1,2</sup>, ZHUO Wenshan<sup>3</sup>, ZENG Ke<sup>1,2</sup>, LIANG Liaofeng<sup>2,4</sup>, LIU Ru<sup>2,4</sup>, LIU Zufa<sup>2,4</sup> (1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Center of Water Resource and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Instrumental Analysis & Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** MIKE3 was used to build a three-dimensional hydrodynamic numerical model of the East four portals of the Pearl River, which simulated the hydrodynamic forces of the Pearl River Estuary under different wind directions in the dry season, and analyzed the influence of the north wind, northeast wind and east wind on current velocity of rising and falling tide, salinity distribution and tidal flux of the estuary. The results show that the velocity change of rising and falling tide of surface and bottom water is opposite under the action of wind. The north wind promotes the development of the vertical circulation in Humen, increases the frequency and intensity of the vertical net circulation in neap tide, and results in the increase of the saltwater intrusion distance and the vertical average salinity in Humen. The influence of the northeast wind is similar to that of the north wind, but the range is smaller, while the east wind is opposite. The north and northeast winds reduce the tide rise of the East four portals, while the east wind increases the tide rise. The variation of falling tide is not only related to the wind direction, but also to the channel trend and vertical circulation. Therefore, the response of the falling tide to the wind is different in the East four portals. The lasting effect of wind on the saltwater intrusion of Humen is greater than that of the other three.

**Key words:** wind direction; saltwater intrusion; tidal flux; residual current; vertical circulation; East four portals; Pearl River

河口咸潮入侵对珠三角城市群生产、生活、生态各方面用水有着重要的影响<sup>[1]</sup>。目前针对珠江口的咸潮问题已经进行了较多的研究, 从方法上主要

分为 3 类: 基于实测资料的数学统计分析<sup>[2-7]</sup>、基于数值模型的分析与计算<sup>[8-11]</sup>及物理模型试验<sup>[12]</sup>。但这些研究主要局限在径流、潮流、海平面上升等方

基金项目: 国家自然科学基金(41301627); 中国气象局气候变化专项(CCSF201715)

作者简介: 林若兰(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: linr5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘祖发, 副教授, 博士。E-mail: eeslzf@sysu.edu.cn

面对咸潮的影响进行研究,对风这一影响因素的研究较少。实际上河口地区普遍存在着表层向海、底层向陆的环流,除了密度梯度效应外,风是形成这种环流的另一重要驱动力。Hansen 等<sup>[13]</sup>研究表明风由河道上游向海吹时加强河口两层环流,反方向则抑制环流发展;Weisberg 等<sup>[14-16]</sup>也发现了风作用下的两层流结构;Manca 等<sup>[17]</sup>对台伯河河口的研究发现风速大于 4 m/s 时能控制表层海流并抬升潮位,从而解释台伯河河口在径流量较大的情况下盐水入侵仍能发生;Héctor 等<sup>[18]</sup>通过实测水文资料对弱潮汐型河口 Jamapa 进行研究,发现下河口风(局部作用)和西北风(远距离作用)都能增强盐水楔入侵,影响盐水楔位置;秦志新等<sup>[19]</sup>研究发现在西北偏北的大风作用下,沐官岛海湾水库突然出现垂向混合从而导致表层盐度超标的风险较大。由此可见,风对盐水入侵的影响不容忽视。针对珠江口也有学者进行了相关研究,包芸等<sup>[20]</sup>基于 Backhaus 的三维斜压非线性模型论述了均匀西南风场对斜压场的影响;刘欢等<sup>[21]</sup>运用 Ecomsed 三维斜压模型计算风对垂向环流形成的影响,推断枯季期间磨刀门水道在东北季风影响下形成环流的情况。但对不同风向下的潮流运动和盐度分布进行对比的研究较少。李越等<sup>[22]</sup>对枯季不同风向对广州附近水道咸潮的影响进行分析,但采用一维、二维联解数学模型,无法反映表底层水体对风的响应差异。

本文根据珠江东四口门枯季实测资料,采用 MIKE3 建立三维水动力模型,在验证模型的可靠性基础上,分析在无风、北风、东北风和东风的作用下枯水期东四口门的潮流运动和盐度分布的变化,对咸潮入侵问题的认识起补充作用,旨在为河口生态环境的维护、水资源管理等提供参考。

## 1 模型的建立

### 1.1 控制方程及计算方法

MIKE3 数值模型可模拟具有自由表面的三维流动系统,同时考虑质量守恒、动量守恒、盐度及温度守恒,局部盐度、温度、压力平衡。其数学基础是雷诺平均化的 N-S 方程,包括紊流影响、密度变化及温盐平衡方程。水动力学模块采用交替方向隐式迭代法(ADI 方法)对质量及动量守恒方程进行积分,且对产生的数学矩阵采用双精度扫描法进行求解<sup>[23]</sup>。

### 1.2 计算区域及网格划分

计算区域为北江三角洲水系、东江三角洲水系及伶仃洋河口湾,上游到达博罗站、老鸦岗站、三水站以及南华站,下游到达伶仃洋 25 m 等深线附近(图 1)。东四口门中虎门对应水文站点为大虎站、

泗盛围站,蕉门、洪奇门、横门对应水文站点分别为南沙站、冯马庙站、横门站。上游水动力边界条件为水位或者流量,下边界条件采用经过校正的全球潮汐预测模型生成同步的外海边界的潮位。边界盐度条件采用实测盐度值,其中三水、南华、博罗实测盐度为 0,老鸦岗的边界盐度由非逐时数据插值而成,外海开边界盐度值设为 35‰。初始盐度场由研究区 18 个实测站点盐度数据插值而成,有利于计算稳定并加快收敛,率定验证时的风条件采用同步的深圳宝安机场的数据。为更好地拟合多变的河口湾地形和曲折岸线,采用非结构化三角网格,外海开边界处采用 5 km 的分辨率,内河道采用 500 m 左右的分辨率,部分细河道采用 50~100 m 左右的分辨率,计算网格共包含 33 445 个网格,21 766 个节点,垂向上采用  $\sigma$  坐标等距划分 5 层,采用 1999 年的河道地形数据。模型采用斜压模式,考虑温度和盐度对密度的影响,密度计算根据 UNESCO 海水标准方程。设置干湿边界的临界判断值,对河床糙率等重要参数进行率定,水平扩散性系数采用 Smagorinsky 公式进行计算。模型考虑径流、科氏力、潮流、风等重要动力因子的影响,不考虑降水、蒸发以及水工结构物等因素的影响。

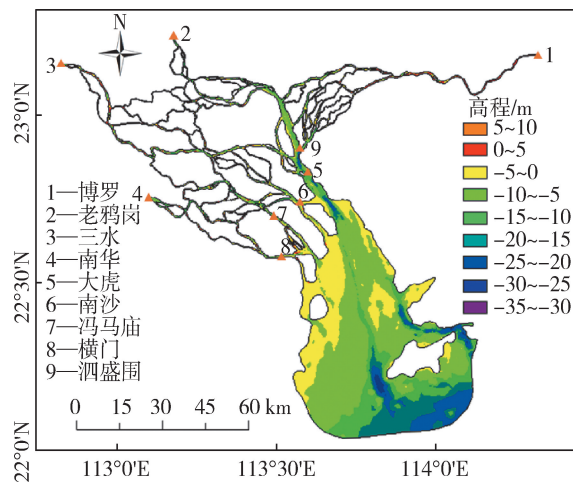


图 1 模型范围内河道地形及测站分布

Fig. 1 Channel topography and station distribution within model range

## 2 模型的验证

近几十年来人类采砂、疏浚等活动对河口地形产生较大影响,为保证地形和水文资料相匹配,采用与地形年份最接近的珠江口 2001 年 2 月 8—16 日的水位、流量、盐度数据进行率定和验证。其中水位  $Z$  和流量  $Q$  为逐时数据,盐度  $S$  为非逐时数据。仅列出东四口门附近站点的模拟情况,模拟结果与实测值的对比情况见图 2、图 3、图 4。

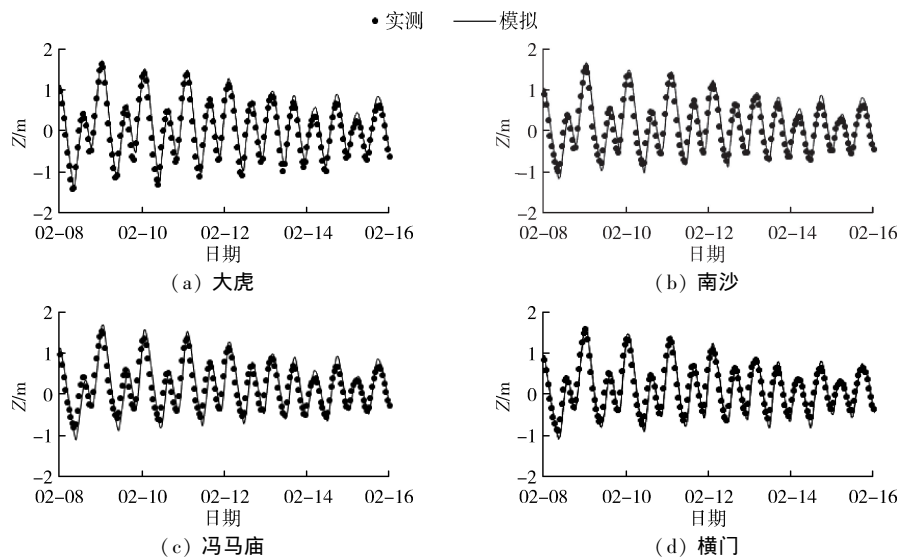


图 2 2001 年水位模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured water level values in 2001

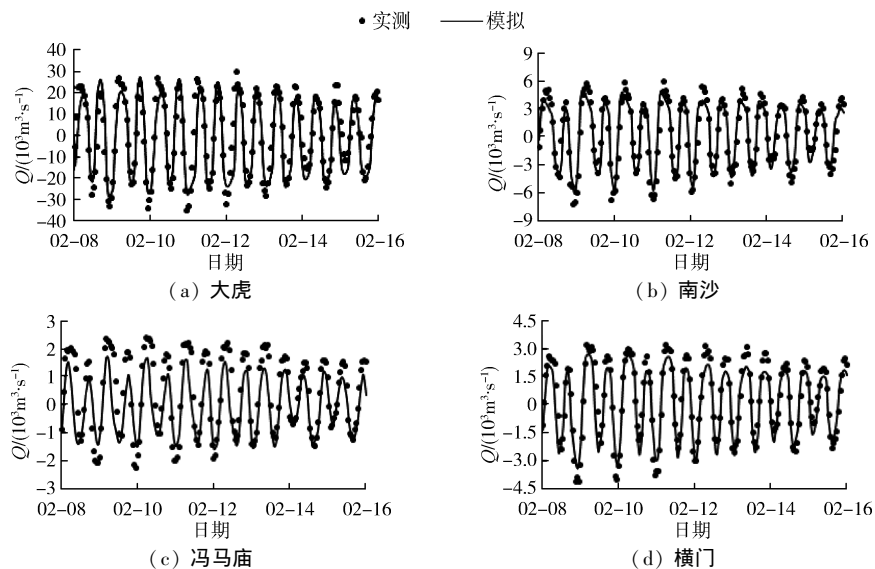


图 3 2001 年流量模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured flow values in 2001

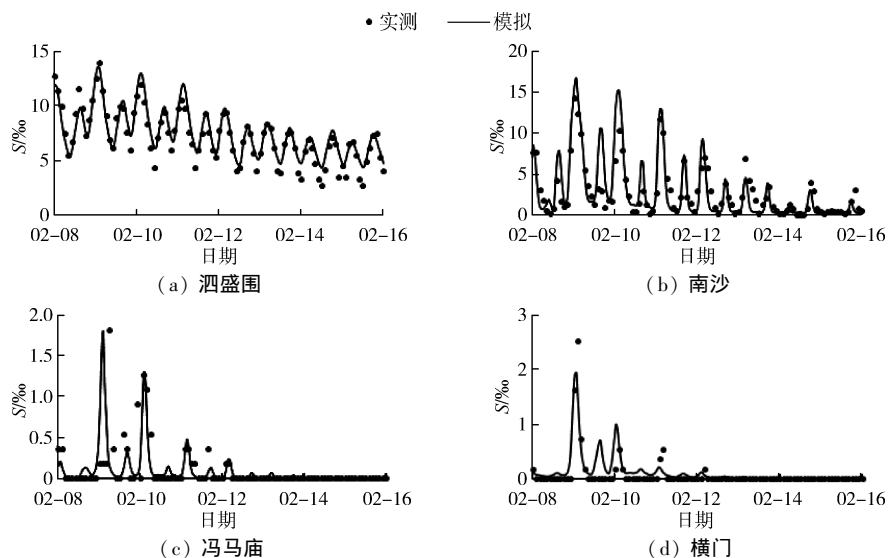


图 4 2001 年盐度模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured salinity values in 2001

珠江口潮汐类型为不规则半日潮,一天内分别有两个不等的高潮和低潮,由图 2 可知各站点从大潮到小潮的模拟水位与实测水位值具有很好的拟合度,无论是振幅还是相位均比较吻合,相关系数  $R$  均大于 0.9,纳西效率系数  $N_s$  均大于 0.8。由图 3 可知,各站点流量大小及涨落潮流向的变化也拟合较好, $R$  均大于 0.9, $N_s$  均大于 0.7,但 4 个站点流量振幅整体偏小,可能是地形数据分辨率不足所致。由图 4 可知,从大潮到小潮,盐度逐渐降低,横门、冯马庙由于口外浅滩淤积,盐水入侵较弱,总体盐度较低,南沙涨潮和落潮时盐度相差较大,涨潮时盐水从蕉门的龙穴南水道和鳧洲水道两个通道进入蕉门,盐度增加,落潮时较大的下泄径流量使盐度大大降低。由于虎门是潮汐型河口,盐水上溯较强,泗盛围的盐度整体较大,即使小潮落潮时也大于 2‰,模型基本能反映盐度的变化规律。

3 模型的应用

风是影响潮汐运动的驱动力之一,在平面上,风通过剪切应力引起水体的平面输送;垂向上,风通过垂向气压的变化促使表底层水体交换进而影响盐度的分布,影响河口环流。为了进一步探究风的影响,应用经过率定、验证的模型,通过数值试验来分析风对东四口门咸潮的影响。珠江口枯季常风向为北,次常风向为东、东北,2000 年 12 月至次年 2 月季风平均风速为 4.9 m/s<sup>[24]</sup>,因此选取北风、东北风和东风 3 种风向来进行研究,风速统一为 5 m/s,水文条件选取 2001 年 2 月至 4 月的日平均流量,对 2001 年 2 月 7 日至 4 月 1 日进行模拟,模拟时段包含 4 个大潮和 4 个小潮,分析不同风作用下流速、盐度、潮通量的变化。风对水体的表面摩擦力取决于风速,剪力值  $\tau_s$  计算公式为

$$\tau_s = \rho_a c_d |\mu_w| \mu_w \tag{1}$$

式中: $\rho_a$  为空气密度; $\mu_w$  为海平面上 10 m 处所测量到的风速; $c_d$  为拖曳系数,根据 Wu<sup>[25]</sup> 的经验公式进行计算。

4 结果分析

4.1 流速

虎门盐水楔入侵距离较长。以虎门为例,分别计算模拟时段大小潮期大虎站各层水体在北风、东北风、东风 3 种条件下的涨落潮流速及平均流速变化率(表 1)。大潮时,潮汐动力较强,风的影响有限,各层水体的涨落潮流速变幅在 1% 以内,平均流速变幅在 11% 以内,由于底层流速较小,所以底层流速变幅较大。落潮时,北风通过表面应力使表层

落潮流速增大(相比于无风条件),底层产生向上游的补偿流,使底层落潮流速减小。而东风对落潮流速的影响则相反,抑制表层落潮流,促进底层落潮流。涨潮时,北风使表层涨潮流速减小,底层涨潮流速增大,东风则相反,促进表层涨潮流,抑制底层涨潮流。东北风的影响与北风相同,但由于风向与虎门水道呈一定夹角,影响较小。大潮时虎门各层水体的平均流速向海,表层比底层大,在北风作用下,中底层的向海平均流速减小,底层减小 10.8%,而表层的向海平均流速增大 5.3%。东北风作用下底层平均流速减小 2.7%,表层平均流速增大 1.9%。东风作用下表层的向海平均流速减小 2.8%,底层平均流速增大 7.0%。

表 1 在不同风向下大潮、小潮期间大虎站各层水体的流速变化率

Table 1 Velocity change rate of each layer of water in Dahu station during spring tide and neap tide in different wind directions

潮型	潮态	风向	流速变化率/%				
			1 层	2 层	3 层	4 层	5 层
大潮	落潮	北风	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.4
		东北风	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.1
		东风	0.5	0.3	0.2	0.0	-0.3
	涨潮	北风	0.6	0.4	0.3	0.0	-0.6
		东北风	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.3
		东风	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.2
	平均	北风	-10.8	-7.3	-4.4	-0.9	5.3
		东北风	-2.7	-1.8	-1.1	-0.1	1.9
		东风	7.0	4.7	2.8	0.7	-2.8
小潮	落潮	北风	-1.3	-1.1	-0.8	-0.4	0.4
		东北风	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0.0
		东风	0.8	0.6	0.3	0.1	-0.5
	涨潮	北风	1.0	0.8	0.5	0.1	-0.8
		东北风	0.2	0.2	0.1	0.0	-0.3
		东风	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.4
	平均	北风	-40.5	-23.1	-13.2	-4.3	9.1
		东北风	-9.4	-5.8	-3.7	-1.4	2.6
		东风	26.6	14.3	7.2	1.4	-6.4

注:1 层为底层;2、3、4 层为中层;5 层为表层。

小潮时流速对风向的响应与大潮时相同(表 1),北风使表层涨潮流速减小,落潮流速增大,并产生补偿流,使中底层涨潮流速增大,落潮流速减小。东北风作用下的流速变化与北风相同但变化幅度较小,东风则完全相反。由于小潮时潮汐动力减弱,风力的影响相对增强,流速的变化幅度整体变大。小潮时在北风作用下,中底层的向海平均流速减小,其中底层减小 40.5%,表层的向海平均流速增大 9.1%。东北风作用下底层平均流速减小 9.4%,表层平均流速增大 2.6%。东风作用下表层的向海平均流速减小 6.4%,底层平均流速增大 26.6%。

从垂向平均来看,北风使垂向平均流速减小,东



北风也使其减小但幅度较小,东风则能使其增大。此外,与大潮时相比,大虎站小潮时多次出现底层水体的周期平均流速向陆,这与小潮时盐淡水混合作用弱,分层增强及密度流速度大有关<sup>[26]</sup>。用 Hansen 等<sup>[27]</sup>提出的无量纲环流系数  $G$  (潮周期平均的下泄流速与断面平均流速的比值) 来表征垂向环流强度,当  $G=1$ ,表底层流向相同;当  $G>1$ ,垂向环流形成。计算模拟时段小潮期间多个太阴日周期的  $G$ ,在北风作用下,小潮时  $G>1$  的频次增加,且  $G$  增大;在东北风的作用下,  $G>1$  的频次不变,但  $G$  增大;在东风作用下,  $G>1$  的频次减少。结果表明,北风、东北风促进虎门垂向环流的发展,而东风抑制垂向环流。

4.2 垂向盐度

选取模拟时段第一个和最后一个(风持续作用 45 d 后)大小潮期的盐度进行分析,为方便描述用大潮 a、小潮 a、大潮 b、小潮 b 表示。图 5 为风作用 2 d 后的大潮 a 时各风况下大虎山南到舢板洲的周期平均盐度纵剖面图。在北风作用下,虎门表层盐度整体减小,底层盐度增加,由于虎门潮汐动力较强,5 m/s 的风作用有限,盐度等值线移动的距离不大。北风产生的表面应力的分力与口门落潮流方向相

同,使表层落潮流增强,更多的表层淡水被带到外海,表层盐度略微下降,底层向上游的补偿流增强,底层的盐水楔入侵略微增强,底层盐度比无风时大。在东北风作用下,盐度分布与无风时相近,这是由于东北风方向与虎门水道有一定夹角,且虎门潮汐动力较强,对涨落潮影响有限。东风使表层涨潮流速增大,落潮流速减小,促进表层盐水向上游的输运,表层盐度比无风时略大,由于中底层的向海流速增大,底层盐水的楔入距离减小。从垂向平均盐度来看,与无风条件相比,北风、东北风使大虎山南到舢板洲的平均盐度增大,且北风的变幅更大,东风使平均盐度减小。

从大潮 a 到小潮 a (风作用 9 d 后),潮差减小,潮汐动力减弱,风的作用对虎门盐度分布的影响较明显(图 6)。与无风条件相比,小潮时,在北风作用下盐度垂向梯度增加,分层增强,虎门表底层盐度增加,大于 10‰ 的盐水整体上溯 1.6 km,楔入河口的底层盐水盐度达 18‰。表层盐度的增加是由于底层盐水楔入侵增强较明显,表层和底层发生垂向紊动混合,表层盐度也略微增大。在东北风的作用下,上游段表底层变化不大,但口门处底层 16‰ 的盐水楔入增强。在东风作用下,垂向盐度梯度明显减小,

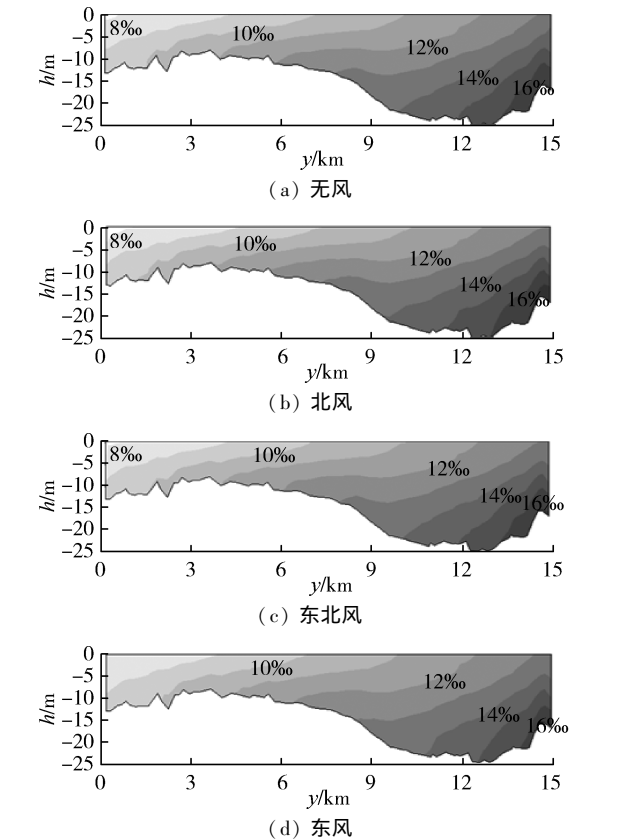


图 5 各风况下大潮 a 时期大虎山南到舢板洲纵剖面盐度分布  
Fig. 5 Distribution of salinity in longitudinal section from South Dahushan to Sanbanzhou during spring tide-a under different wind conditions

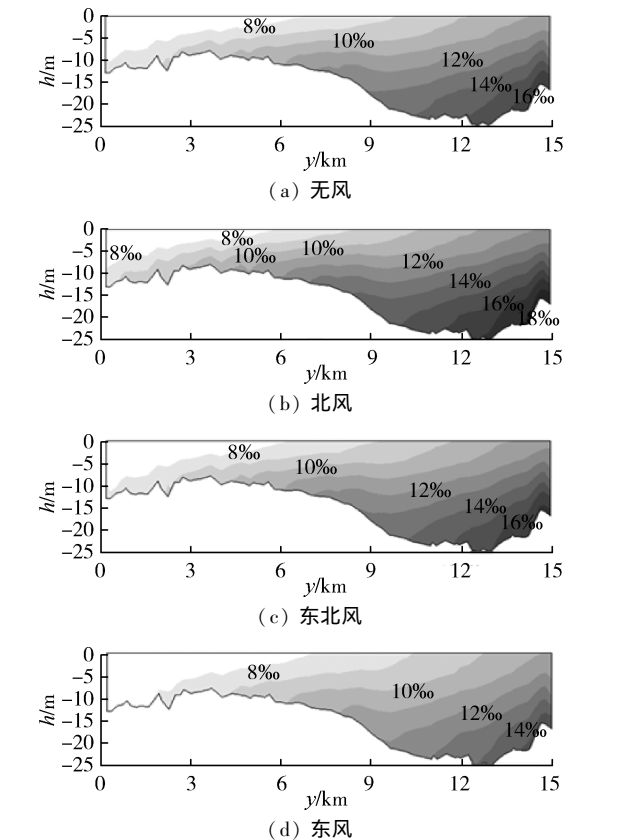


图 6 各风况下小潮 a 时期大虎山南到舢板洲纵剖面盐度分布  
Fig. 6 Distribution of salinity in longitudinal section from South Dahushan to Sanbanzhou during neap tide-a under different wind conditions

分层减弱,楔入河口的盐度明显减小,降至 14‰,垂向混合作用下表层盐度也减小。小潮时垂向平均盐度的变化规律与大潮时相同。从 2 月到 3 月底,随着上游来水流量的增大,盐水逐渐后退,同时随着时间的积累,不同风向下的盐度分布差异较大(图 7 和图 8)。北风明显抑制盐水的后退,使盐水在口门内停留的时间较长,东北风也有相似的作用但不明显,东风加快盐水的后退。

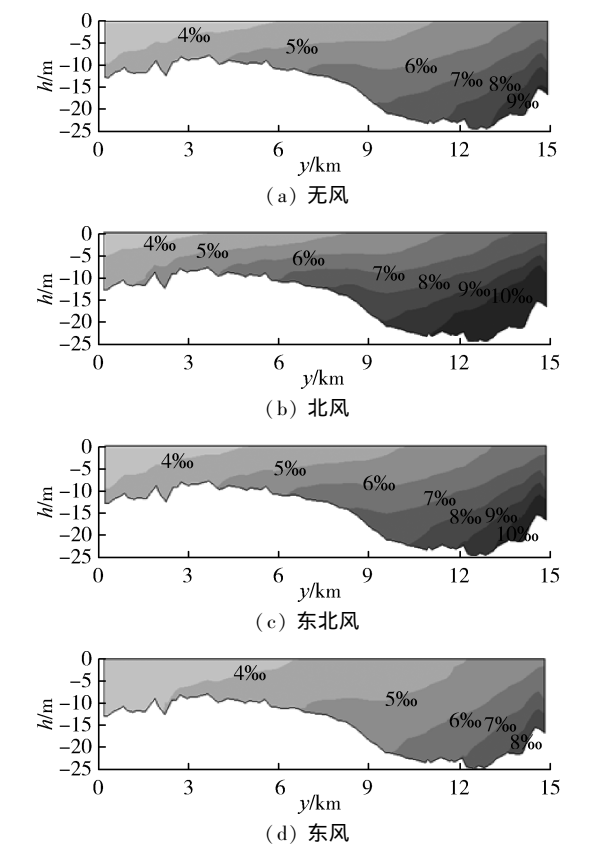


图 7 各风况下大潮 b 时期大虎山南到舢板洲纵剖面盐度分布  
Fig.7 Distribution of salinity in longitudinal section from South Dahushan to Sanbanzhou during spring tide-b under different wind conditions

4.3 潮通量

物质的滞留、积蓄作用对河口海岸环境的影响至关重要,计算模拟时段典型大小潮期横门、冯马庙、南沙、大虎 4 个站点的潮通量变化(表 2),向陆为正,向海为负,表中的大潮、小潮的太阴日周期的净通量都为负,均为净泄量。对于涨潮量,北风、东北风作用下大潮和小潮时横门、冯马庙、南沙、大虎 4 个站点都减少,东风作用下大潮和小潮时 4 个站点都增加,但对于落潮量各个站点的变化规律不同。横门在北风作用下落潮量增加,这与北风促进口门外的落潮流有关,在东风、东北风作用下落潮量减少,且东风下的降幅更大,这与横门水道东西走向有关。洪奇门与横门落潮量的变化规律相似,不同点在于洪奇门在东北风作用下落潮量是增加的,这与

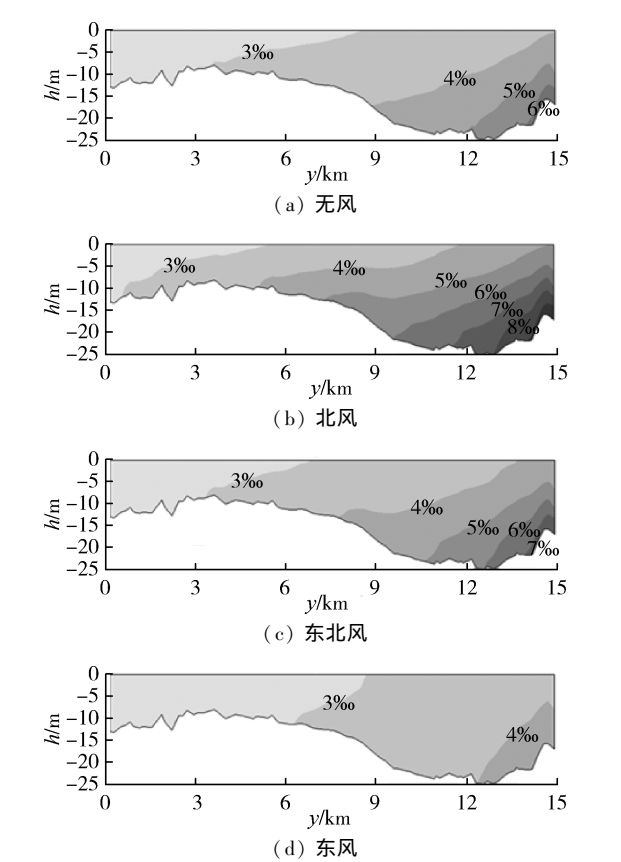


图 8 各风况下小潮 b 时期大虎山南到舢板洲纵剖面盐度分布  
Fig.8 Distribution of salinity in longitudinal section from South Dahushan to Sanbanzhou during neap tide-b under different wind conditions

表 2 各风况下各站的潮通量变化		Table 2 Variation of tidal flux at each station under different wind conditions				
潮型	潮态	断面	无风时潮 通量/万 m <sup>3</sup>	潮通量变化/%		
				北风	东北风	东风
大潮	涨潮	横门	2 511	-1.1	-0.3	0.1
		冯马庙	2 958	-3.1	-0.5	2.4
		南沙	14 019	-0.9	-0.4	0.4
		大虎	68 441	-0.6	-0.3	0.2
	落潮	横门	-2 819	0.0	-0.3	-0.2
		冯马庙	-4 348	0.1	0.0	-0.1
		南沙	-17 370	-1.4	-0.6	0.6
		大虎	-71 860	-0.4	-0.2	0.1
小潮	涨潮	横门	1 030	-2.3	-1.7	0.8
		冯马庙	1 335	-4.1	-0.9	3.0
		南沙	6 928	-1.7	-1.4	0.6
		大虎	34 196	-1.4	-0.8	0.1
	落潮	横门	-1 800	1.6	-0.8	-1.7
		冯马庙	-3 336	2.3	0.6	-2.3
		南沙	-10 978	-2.8	-1.2	1.1
		大虎	-36 552	-1.4	-0.8	0.1

水道走向不同有关。南沙站和大虎站在北风、东北风的作用下落潮量减少。由 4.1 可知风对大虎站表底层的涨落潮流速的影响不同,表现为表层顺风流速增加,逆风流速减小,底层逆风流速增加,顺风流

速减小。由于伶仃洋东部潮汐动力较强,盐度较高的盐水能到达大虎、南沙这两个站点处,形成盐淡水异重流,在北风、东北风作用下异重流增强,可能使落潮量反而较小,而东风则使落潮量增加。而横门站和冯马庙站径流作用远大于潮汐动力,盐度较高的盐水团不能到达该位置处,平均盐度小于1‰(实测数据),盐淡水密度差小,不存在明显异重流。由于大潮时潮汐动力较强,风的影响相对较小,因此小潮时涨落潮量的变化幅度比较大,但也不超过5%。

4.4 东四口门盐水入侵

对风作用45 d后的大小潮时期的表底层盐度分布进行分析。图9为无风作用下大潮b时东四口门外的底层盐度分布,可见盐度分布存在横向差异,东高西低,等盐度线基本呈东北-西南走向。由于蕉门、洪奇门、横门的径流作用相对较强,虎门的径流作用相对较弱,再加上科氏力使潮差向潮波传播方向的右侧递增,等盐度线向虎门凸出。浅滩和深槽的水动力特征存在差异,由于深槽区垂向环流发育,盐水上溯更远,等盐度线在两个深槽处凸出,呈现双峰结构,底层大于27‰的高盐水上溯至内伶仃岛附近。在垂向上,由于海水密度较淡水密度大,海水从底部入侵,表层盐度普遍比底层要低,由于表层水体

受风、波浪影响掺混作用强,表层水体等盐度线的双峰结构不如底层明显(图10)。枯水期小潮期间的盐度分布与大潮相似,但由于小潮时潮汐动力较弱,盐水上溯距离较小(图略)。

由图9可见,对于大潮时的底层水体盐度分布,与无风时相比,在北风、东北风的作用下,东四口门外底层水体盐度整体增加,且增幅从东向西递减,到伶仃洋西岸附近盐度下降。在北风的作用下,虎门口附近盐度增幅最大,达4‰~6‰,这是由于虎门口盐淡水交汇,表底层水体密度差大,且水深较大,垂向环流发育,而北风促进垂向环流,使虎门口盐水入侵加剧。到内伶仃岛以南径流作用较小,表底层盐度相差较小,分层减弱,北风的影响减弱,盐度增幅比虎门口附近小。而伶仃洋西部为浅滩,在北风摩擦应力作用下,横门、洪奇门向海潮通量增加(表2),盐度降低。在东北风作用下,口门外盐度变化整体与北风相似,但和北风相比虎门口附近盐度增幅较小,伶仃洋西岸盐度降幅较大。在东风作用下,由于抑制河口垂向环流,虎门口门外底层盐度下降,由于东风使淡水流出蕉门、洪奇门、横门后方向偏西南,因此越往西岸盐度降幅越大,而矾石浅滩以南水域盐度增加可能是由于东风对邻近海域的

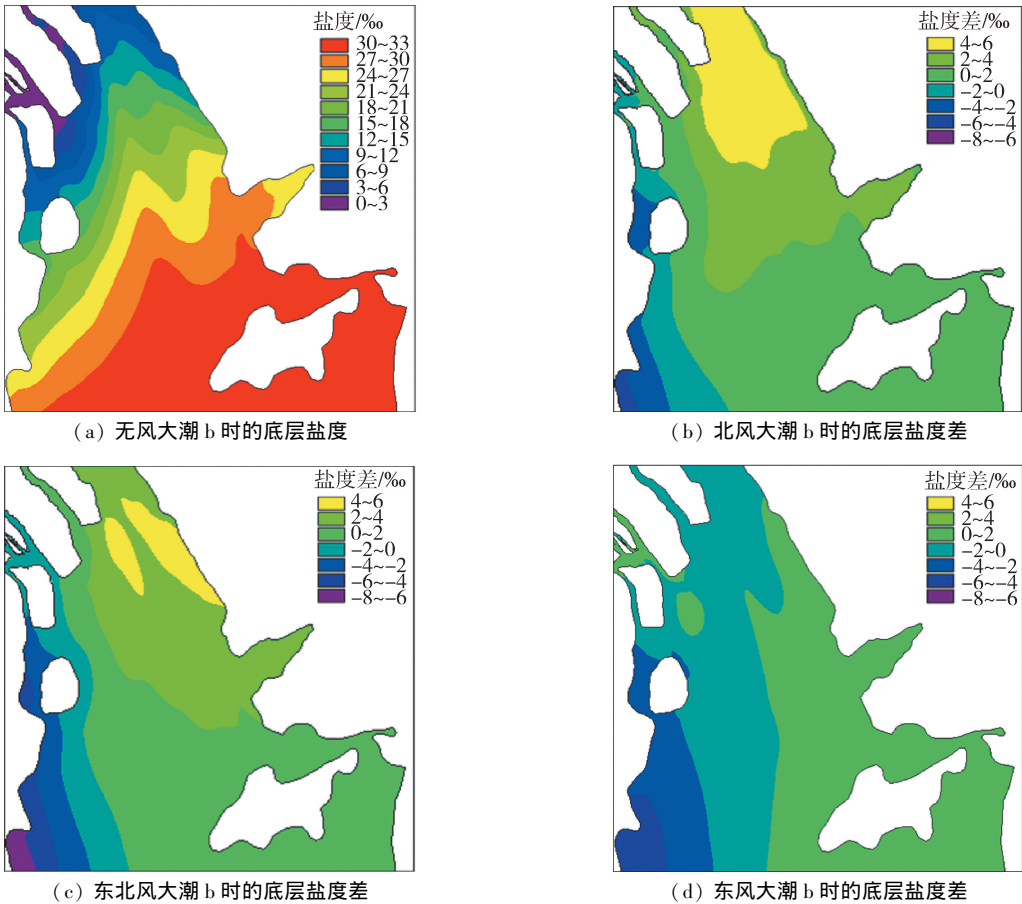


图9 口门外无风条件下的底层盐度分布及各风况下的底层盐度差

Fig.9 Distribution of bottom layer salinity and difference of bottom layer salinity under different wind conditions

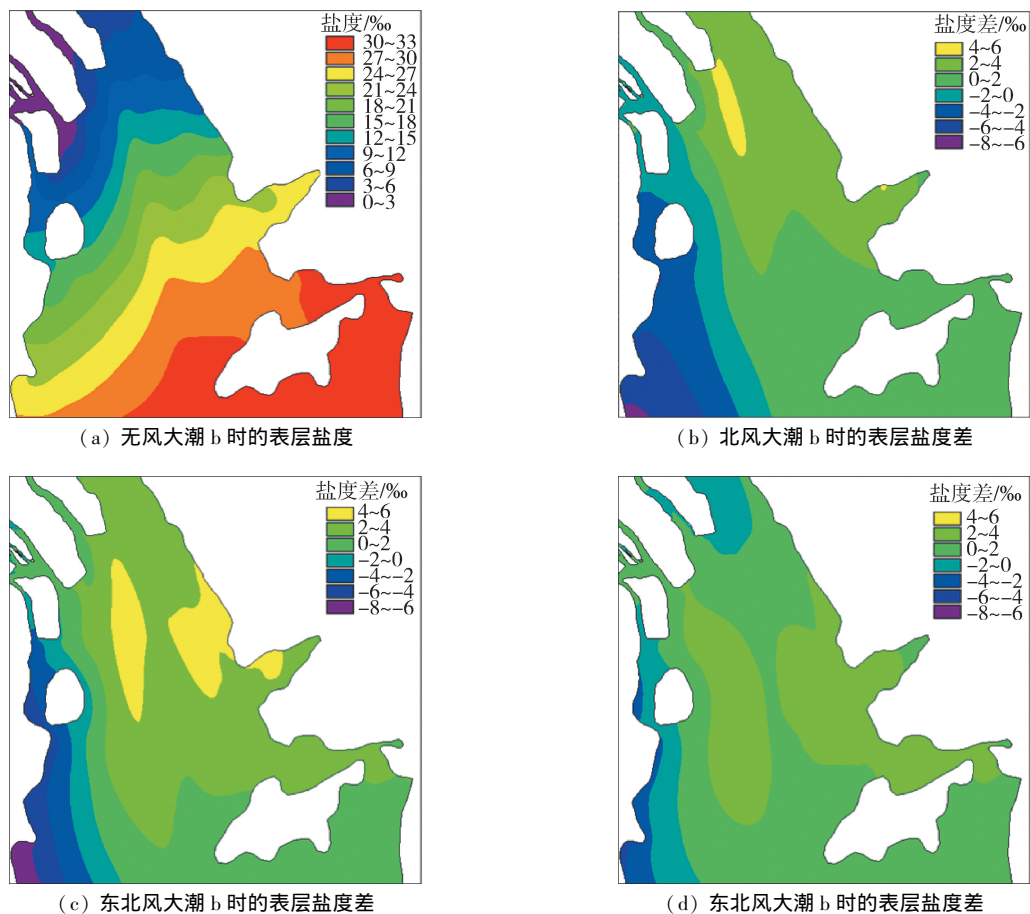


图 10 口门外无风条件下的表层盐度分布及各风况下的表层盐度差

Fig. 10 Distribution of surface salinity and difference of surface salinity under different wind conditions

Ekman 向岸运输作用以及混合作用使盐度略微增加。

由图 10 可见,对于大潮时的表层水体,由于在北风、东北风的作用下底层盐水入侵加剧,表层水体和底层发生垂向混合,伶仃洋东部、中部表层水体的盐度也增加。东风的平流输运作用促进中部表层水体与西部混合,使伶仃洋表层水体整体盐度增加的面积大于东北风、北风。但对于虎门口表层水体,由于东风抑制垂向环流,盐水入侵较弱,口门内表层、底层盐度都下降。小潮时各风作用下的表底层盐度变化规律与大潮时相同。

结果表明,北风、东北风的持续作用使虎门盐水入侵加剧,虎门口口处底层盐度可增加  $4‰ \sim 6‰$ ,表层盐度增加  $2‰ \sim 4‰$ 。由于盐水可通过枕箱水道进入蕉门,对蕉门口盐水入侵有一定影响。但北风、东北风对洪奇门、横门的影响较小,表底层盐度变化幅度不超过  $\pm 2‰$ 。东风抑制东四口门盐水入侵,东四口门外底层盐度降低  $0 \sim 2‰$ ,对于表层水体,虎门表层盐度降低,其他三口门略微上升。

## 5 结 论

a. 表底层水体的流速对风的响应是相反的,表层水体顺风流动,底层水体逆风流动,因此风影响垂

向环流的发展。在北风作用下,虎门口小潮时垂向净环流的出现频次增加,且环流强度增大。在东北风的作用下,垂向净环流的频次不变,但垂向环流强度增大。在东风作用下,垂向净环流的频次减少。

b. 北风、东北风使东四口门涨潮量减少,东风使涨潮量增加。而落潮量的变化则不仅与风向相关,还与河道走向、垂向环流有关,因此四个口门的落潮量对风的响应有所不同。

c. 不同风向下河口湾盐度的空间分布也有所不同,从而影响到上游口门内的咸潮活动。风的持续作用对虎门内盐水入侵影响较大,北风、东北风促进虎门盐水的入侵,当上游来水流量增大时,北风、东北风抑制盐水的后退,咸潮活动时间变长,东风则相反。风对于其他 3 个径流型河口盐水入侵有一定影响,但相对较小。因此,进行长时段的咸潮模拟预测时需要考虑季风的影响,提高模拟预测精度。

## 参考文献:

- [1] 刘曾美,郑志勤,陈斯达,等. 南方感潮地区水库的挖潜改造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 122-127. (LIU Zengmei, ZHENG Zhiqin, CHEN Sida, et al. Study on unearthing and developing the potentialities of



- a reservoir for the flood detention and storage in the southern tidal area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2): 122-127. (in Chinese))
- [2] 贾良文, 吴超羽, 任杰, 等. 珠江口磨刀门枯季水文特征及河口动力过程[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 82-88. (JIA Liangwen, WU Chaoyu, REN Jie, et al. Hydrologic characteristics and estuarine dynamic process during the dry season in Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 82-88. (in Chinese))
  - [3] 李若华, 夏冬梅, 姚凯华. 钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 21-25. (LI Ruohua, XIA Dongmei, YAO Kaihua. Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 21-25. (in Chinese))
  - [4] 任杰, 刘宏坤, 贾良文, 等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 715-720. (REN Jie, LIU Hongkun, JIA Liangwen, et al. Research on salinity mixing and stratification mechanisms at the Modaomen channel[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 715-720. (in Chinese))
  - [5] 方神光, 崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 14-18. (FANG Shengguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 14-18. (in Chinese))
  - [6] 王艺霖, 苏程佳, 陈晓宏, 等. 磨刀门水道枯水期咸潮变化趋势及成因[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 37-43. (WANG Yilin, SU Chengjia, CHEN Xiaohong, et al. Change trend and cause of salt tide in Modaomen Channel during dry seasons[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 37-43. (in Chinese))
  - [7] 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))
  - [8] YANG Z, KHANGAOKAR T. Modeling tidal circulation and stratification in Skagit River estuary using an unstructured ocean model[J]. Ocean Modeling, 2009, 28(1): 34-49.
  - [9] 程香菊, 詹威, 郭振仁, 等. 珠江西四口门盐水入侵数值模拟及分析[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 554-563. (CHENG Xiangju, ZHAN Wei, GUO Zhenren, et al. Numerical simulation and analysis of saltwater intrusion to four western watercourses of Pearl River estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 554-563. (in Chinese))
  - [10] 胡溪, 毛献忠. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 529-536. (HU Xi, MAO Xianzhong. Study on saltwater intrusion in Modaomen of the Pearl Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 529-536. (in Chinese))
  - [11] 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))
  - [12] 刘志敏, 黄国如, 高时友. 珠江河口压咸补淡枯季调水的物理模型研究[J]. 人民珠江, 2009(2): 27-28. (LIU Zhiming, HUANG Guoru, GAO Shiyu. Study on physical model of water transfer in Pearl River Estuary during dry season[J]. Pearl River, 2009(2): 27-28. (in Chinese))
  - [13] HANSEN D V, RATTRAY M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1965, 23: 104-122.
  - [14] WEISBERG R H. The noutidal flow in the Providence River of Narragansett bay: a stochastic approach to estuarine circulation [J]. Journal of Physical Oceanography, 1976, 6(5): 721-734.
  - [15] ELLIOT A J. Observations of the meteorologically induced circulation in the Potomac estuary[J]. Estuarine, Coastal and Marine Science, 1978, 6(3): 285-299.
  - [16] WANG D P. Wind-driven circulation in the Chesapeake bay, winter, 1975[J]. Journal of Physical Oceanography, 1979, 9(3): 564-572.
  - [17] MANCA F, CAPELLI G, VIGNA F L, et al. Wind-induced salt-wedge intrusion in the Tiber river mouth (Rome-Central Italy) [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(4): 1083-1095.
  - [18] HÉCTOR P V, ROSARIO S G, ARNOLDO V L. Effects of tides, wind and river discharge on the salt intrusion in a microtidal tropical estuary[J]. Regional Studies in Marine Science, 2018, 24: 400-410.
  - [19] 秦志新, 高增文, 李静, 等. 海湾水库突然混合临界风速的预测[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 76-81. (QIN Zhixin, GAO Zengwen, LI Jing, et al. Prediction of critical wind speed of sudden mixing in bay reservoir[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 76-81. (in Chinese))
  - [20] 包芸, 任杰. 珠江河口西南风强迫下潮流场的数值模拟[J]. 海洋通报, 2003(4): 8-14. (BAO Yun, REN Jie. Numerical simulation of tidal current field under the forcing of southwest wind in the Pearl River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2003(4): 8-14. (in Chinese))
  - [21] 刘欢, 吴超羽, 包芸, 等. 一次东北季风过程下珠江口磨刀门河口环流研究[J]. 海洋工程, 2008(2): 102-111. (LIU Huan, WU Chaoyu, BAO Yun, et al. Research on the Modaomen estuarine circulation under a winter monsoon[J]. The Ocean Engineering, 2008(2): 102-111. (in Chinese))
  - [22] 李越, 张萍, 王旻. 枯季不同风向对广州附近水道咸潮影响分析[J]. 广东水利水电, 2009(12): 14-18. (LI Yue,

- ZHANG Ping, WANG Yang. Effect of wind in different directions on saltwater intrusion in watercourses near Guangzhou in dry season[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2009(12):14-18. (in Chinese))
- [23] 马腾, 刘文洪, 宋策, 等. 基于 MIKE3 的水库水温结构模拟研究[J]. 电网与清洁能源[J]. 2009, 25(2):68-71. (MA Teng, LIU Wenhong, SONG Ce, et al. Application of MIKE3 in prediction analysis of the water temperature of reservoir[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2):68-71. (in Chinese))
- [24] 倪培桐, 韦惺. 强风作用下珠江伶仃洋河口湾能量耗散分析[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3):35-41. (NI Peitong, WEI Xing. Effects of strong wind on tidal energy flux and dissipation in Lingdingyang Bay of Pearl River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3):35-41. (in Chinese))
- [25] WU Jin. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane[J]. Journal of Geophysica Research, 1982, 87(C12):9704-9706.
- [26] 彭石, 何用, 刘诚, 等. 咸潮上溯期磨刀门河口垂向环流动力机制[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(5):650-657. (PENG Shi, HE Yong, LIU Cheng, et al. Dynamics of vertical circulation under the influence of salt tide in the Modaomen estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(5):650-657. (in Chinese))
- [27] HANSEN D V, RATTRAY M. New dimensions in estuary classification[J]. Limnology and Oceanography, 1966, 11:319-325.
- (收稿日期:2019-06-03 编辑:王 芳)

· 信息播报 ·

### 《水资源保护》2019 年度优秀审稿专家名单

2019 年,在广大作者、审稿专家、编委及主办单位的大力支持和帮助下,《水资源保护》的论文水平和内容质量得到明显提升。根据《世界学术期刊学术影响力指数(WAJCI)年报》(2019 版),《水资源保护》位列世界水利工程类期刊第 6 名、Q2 区第 1 名,显示出《水资源保护》在世界范围水利工程类期刊中具有较强的影响力。根据中国科学引文数据库(CSCD)2019 年期刊引证数据,《水资源保护》跻身水利工程类期刊和环境工程类期刊的 Q1 区。据中国科学技术信息研究所 2019 年发布数据,《水资源保护》影响因子 1.395,跃升水利工程类期刊第 3 名。

2019 年共有 207 位专家参与了《水资源保护》的审稿,他们为期刊发展付出了辛勤劳动,在此一并表示衷心感谢!综合审稿专家在过去一年中的审稿数量、质量和时效性等多项指标,评选出《水资源保护》2019 年度优秀审稿专家 20 名:

黄国如 华南理工大学土木与交通学院  
江 波 长江水资源保护科学研究所  
赵联芳 河海大学环境学院  
左其亭 郑州大学水利与环境学院  
郑志宏 华北水利水电大学环境与市政工程学院  
荣艳淑 河海大学水文水资源学院  
王红瑞 北京师范大学水科学研究院  
仵彦卿 上海交通大学环境科学与工程学院  
孙才志 辽宁师范大学城市与环境学院  
谢新民 中国水利水电科学研究院水资源研究所  
刘家宏 中国水利水电科学研究院  
杨柳燕 南京大学环境学院  
杨志勇 中国水利水电科学研究院  
雍 斌 河海大学地球科学与工程学院  
束龙仓 河海大学水文水资源学院  
王文圣 四川大学水利水电学院  
薛联青 河海大学水文水资源学院  
杨汉波 清华大学水利水电工程系水文水资源研究所  
吴时强 南京水利科学研究院  
金菊良 合肥工业大学土木与水利工程学院

《水资源保护》编辑部

2020-01-02