

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 05. 08

基于水幕方法的珠江河口抑咸对策

王 青¹, 吕紫君², 孙 杰¹, 吴 彦¹, 韩 笑¹, 孔 俊¹

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要:基于数值模拟手段,论证水幕方法扰动底层盐水楔实现抑制咸潮入侵的可行性。结果表明,在磨刀门河道上游深槽设置水平喷水干扰盐水楔,可以有效减弱底层盐水浓度,在底部高盐水团附近喷水的抑咸效果优于其他断面,并且喷水流量存在最优值,当小于该值时,咸潮上溯距离随流量的减小逐渐增大,当大于该值时,咸潮上溯距离随流量的增大逐渐增大。进一步研究发现磨刀门河口地区小潮期进行盐水楔扰动的效果最好,低盐度等值线($\leq 0.5‰$)向外海退缩程度显著,有利于河口区取水。

关键词:咸潮入侵;水幕;盐水楔;上溯距离;磨刀门水道;珠江口

中图分类号:P731.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)05 - 0050 - 07

Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method

WANG Qing¹, LYU Zijun², SUN Jie¹, WU Yan¹, HAN Xiao¹, KONG Jun¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence(Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Corp. Ltd, Nanjing 210006, China)

Abstract: Based on numerical simulations, the feasibility of disturbing the bottom saline water wedge to control saline water intrusion by water curtain method is studied. The results show that the concentration of the bottom saline water can be effectively reduced by setting level jets in the deep channel of the upper reach; The position of the best saline water intrusion control effect is near the bottom of the high saline water mass; There is an optimal water flow value. When water flow is less than the value, saline water intrusion length increases with the decrease of flow. When water flow is more than the value, saline water intrusion length increases with the increase of flow. Further studies show that the best phase of disturbing the saline water wedge is setting level jets during neap tide. Low salinity contours($\leq 0.5‰$) retreat to the sea apparently, which is beneficial to the water intake.

Key words: saline water intrusion; water curtain; saline water wedge; intrusion length; Modaomen Waterway; Pearl River Estuary

咸潮是河口地区特有的自然现象,多发于枯水干旱时期,是河口研究中的关键问题^[1-4]。21 世纪以来,由于上游径流量变化、航道疏浚和口外挖沙的影响,珠江口磨刀门咸潮上溯日趋严重,造成严重的生态危害,直接影响生活用水、工业用水以及农作物灌溉。进行抑咸对策研究具有重要的现实意义。

在非工程措施上,由于对珠江口磨刀门咸潮上

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501010);江苏省六大人才高峰培养项目(HYGC-004);河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金(201706)

作者简介:王青(1993—),女,硕士研究生,研究方向为河口海岸水动力学。E-mail:wangqing199399@126.com

溯认识存在分歧,众多学者在河口压咸时机的选择上各执一词。闻平等^[5]认为最佳压咸补淡的时机为大潮转小潮期;尹小玲等^[6]分析实测资料发现压咸应在盐水回落期;陈荣力等^[7]认为大潮期是加大流量进行压咸的妥当时机;李春初^[8]认为大潮向中潮的变化时期的压咸效果最佳。但是抑咸能否达到预期目标还依赖于上游的径流量人工调蓄,受制于整个流域的水资源调配问题,操作难度较大。在工程措施上,许多国家采用在河口修建截流墙或人工潜坝等工程措施来阻挡咸潮的上溯。Luyun 等^[9]通过 SEAWAT 模型预测截流墙安装后的盐水楔入侵现象,试验和数值模拟结果表明较短的截流墙能更快去除残留盐水。Botero-Acosta 等^[10]通过注入淡水和提高含水层的水压头,建立液压屏障以减少咸潮上溯。Basdurak 等^[11]以注水井、抽水井、注水井和抽水井相结合以及地下屏障为防治手段,采用 SWI(sea water intrusion)技术模拟理想化的矩形沿海含水层的地下水流动,以控制咸潮上溯。Abd-Elhamid^[12]基于 SEAWAT 模型对尼罗河三角洲进行研究,发现减少抽水,增加流量补给,抽取咸水以及这 3 种的组合能够有效抑制咸潮,使得海岸线附近含水层咸潮上溯减少,保护土壤免受盐渍化。Abdoulhalik 等^[13]通过物理模型试验和数值模型研究,分析 3 种不同结构的截流墙对盐水楔的破坏作用。Abdoulhalik 等^[14]通过对传统的地下物理屏障进行改进,提出一种控制咸潮上溯的新型屏障系统,该系统将不透水防渗墙和半渗透性地下水坝进行结合,该系统相较不透水防渗墙和半渗透性地下水坝,分别使咸潮上溯距离减小 62% 和 42%。程香菊等^[15]基于 FVCOM 模型,发现人工潜坝能够使得 0.5% 盐度等值线向外海退缩;罗丹等^[16]通过物理

模型试验发现潜坝一方面能部分阻挡从底部上溯的盐水楔,另一方面能增强盐淡水掺混程度。但从河道防洪和通航的角度来看,构建水下障碍物并不可行,也易改变河道的长期演变趋势。

基于底层扰动盐水楔具有抑咸的作用,本文提出水幕方式,以珠江口磨刀门为研究对象,采用 MIKE3 软件,论证水幕方法进行盐水楔扰动研究咸潮变化的可行性,针对磨刀门河口小潮后期咸潮上溯最为严重的特征,小潮期在河道上游深槽设置水平喷水干扰盐水楔,减弱底层盐水浓度,使水体在河道纵向充分混合,比选不同喷水位置和流量的咸潮上溯特征,为确定磨刀门水道的最佳压咸措施提供科学依据。

1 研究区概况

选取珠江口磨刀门为研究区域,地理位置如图 1 所示,其中三灶为潮位测站,潮位数据为 2009 年 1 月 2—31 日的每小时实测数据。

2 盐水楔扰动模型

本文采用水幕方法进行盐水楔扰动,具体通过在河口可回收浮体上安装抽压水装置,抽取河道表层淡水,将其压入底层盐水楔中,加强底层盐淡水的混合,降低底层盐水浓度,达到减轻咸潮上溯强度的目的。本文的扰动装置系统造价低、能耗小、操作简便,可在枯季使用、洪季回收,使用方便。

2.1 控制方程

盐水楔扰动的控制方程是基于三维不可压的雷诺平均 Navier-Stokes 方程,遵循 Boussinesq 假定和静压假定,连续方程:

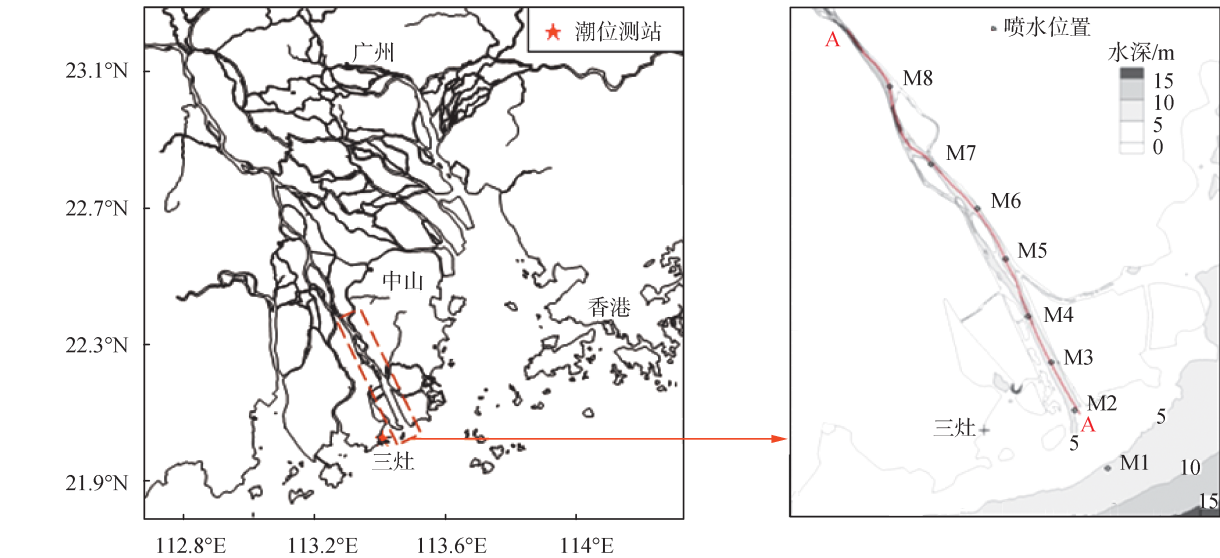


图 1 研究区域地理位置和研究点布置

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

式中: t 为时间; x, y, z 为直角坐标系坐标; η 为水面波动; d 为静水水深; h 为总水深 ($h = \eta + d$); u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度分量; f 为科氏力参数 ($f = 2\Omega \sin \varphi$, Ω 为地球自转角速度, φ 为纬度); g 为重力加速度; ρ 为水的密度; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为波浪辐射应力; v_v 为垂向紊流系数; p_a 为大气压; ρ_0 为水的相对密度; F_u, F_v 分别为 x, y 方向的应力项; A 为黏性系数。

盐度扩散方程:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$F_s = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) \right) s$$

式中: F_s 为盐度水平扩散项; D_v 为垂向扩散系数; D_h 为水平扩散系数; s 为盐度。

本文垂向紊流模型选择的是标准 $k-\varepsilon$ 模型, 水平向紊流模型选择的是 Smagorinsky 模型。

标准 $k-\varepsilon$ 模型中, 垂向紊流系数的表达式为

$$v_v = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: c_μ 为经验常数; k 为单元体的紊动动能; ε 为单元体的紊动动能的耗散。

Smagorinsky 模型中, 黏性系数的表达式为

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2)$$

式中: c_s 为常数; l 为特性长度; S_{ij} 为应变率。

磨刀门盐水楔扰动计算区域见图 1, 上游河道边界给出流量过程, 外海边界给出潮位过程, 其中 M1 ~ M8 为研究点。计算时间为 2009 年 1 月 2 日

24:00 至 31 日 14:00, 时间步长为 900 s。

2.2 扰动时间选择

包芸等^[17-18]通过对磨刀门水道盐度和流速的垂向精细观测, 发现小潮期涨潮时间明显长于落潮时间, 在涨潮流的驱动下, 咸潮强烈上溯, 使得小潮后期咸潮上溯最严重。Wang 等^[19]研究磨刀门水道发现咸潮上溯在小潮增强, 在大潮减弱, 咸界入侵最远出现在小潮之后的中潮。基于上述研究, 笔者在小潮期间 (2009 年 1 月 17 日 24:00 至 1 月 21 日 24:00) 全天进行盐水楔扰动, 通过在河道上游深槽设置水平喷水来研究盐水楔扰动对咸潮上溯的影响。三灶潮位过程和扰动时间见图 2。

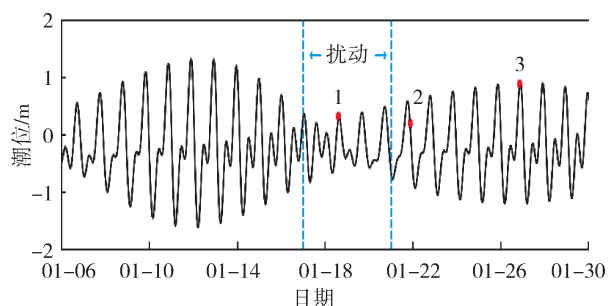


图 2 三灶潮位过程及扰动时间

2.3 扰动工况布置

为了研究盐水楔扰动下喷水位置和流量对咸潮上溯的影响, 小潮期间在 M3、M4 和 M5 点所在横断面深槽布置扰动装置。

扰动装置的横断面布置见图 3, 总平面布置见图 4。

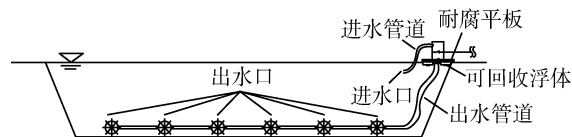


图 3 扰动装置沿河道横断面布置示意图

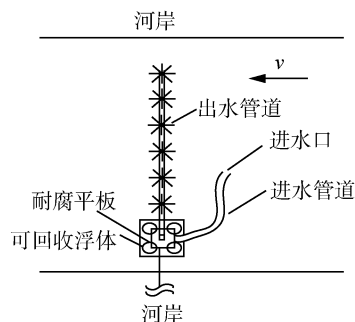


图 4 扰动装置总平面布置

扰动装置具体操作方式如下:

a. 前期安装。参照图 3, 将由河口可回收浮体支承的耐腐蚀平板安置在河道靠岸处, 平板上安置抽压水装置。进水管的位置选取在表层河水浓度较低

处,可较为向上游处布置进水口和进水管。出水管沿河岸下放,靠近河底处变向,垂直河道布置于河底,每 100 m 布置一个喷水口,共布置 6 个喷水口,喷口直径设计为 1 m,使管道上的出水喷头横向放置。

b. 操作步骤。安装好扰动装置后,通过河口可回收浮体 3 上的抽压水装置 4,小潮期间(2009 年 1 月 17 日 0:00 至 21 日 0:00)全天从本地抽取河道表层淡水,将其压入底层盐水楔中,加强底层盐淡水的混合,降低底层盐水浓度。具体扰动工况布置见表 1。

表 1 扰动工况			
工况	喷水位置	喷水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水平流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
工况 1	M3	10	12.7
工况 2	M3	20	25.5
工况 3	M3	25	31.8
工况 4	M3	30	38.2
工况 5	M3	40	50.9
工况 6	M4	10	12.7
工况 7	M4	20	25.5
工况 8	M4	25	31.8
工况 9	M4	30	38.2
工况 10	M4	40	50.9
工况 11	M5	10	12.7
工况 12	M5	20	25.5
工况 13	M5	25	31.8
工况 14	M5	30	38.2
工况 15	M5	40	50.9

3 结果分析

3.1 盐水楔扰动对咸潮上溯距离的影响

考虑饮用水的盐度标准为不大于 0.5‰,本文咸潮上溯距离定义为以口门附近 M2 点为起始点,向上游沿河道纵剖面到底部盐度为 0.5‰处的距离。

首先考虑不喷水工况,无喷水时,咸潮上溯最大瞬时距离为 34.88 km,出现在小潮之后的中潮(1 月 21 日 21 点),即咸潮上溯最严重的时期,以此作为基本工况判断抑咸效果。其他工况咸潮上溯最大瞬时距离见表 2。

3.1.1 M3 点扰动

通过对工况 1~5 的分析,这 5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均出现在 1 月 21 日 21:00,即小潮后的中潮,这时正是咸潮上溯最严重的时期。由表 2 可知,5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均比不喷水工况有所减小,说明在 M3 点设置喷水能够有效减弱小潮后中潮期的咸潮上溯,其中工况 4 的咸潮

表 2 不同扰动工况的咸潮上溯最大瞬时距离				
工况	喷水位置	喷水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	咸潮上溯最大 瞬时距离/ km	减小的咸潮上 溯最大瞬时 距离/km
工况 1	M3	10	32.68	2.20
工况 2	M3	20	30.90	3.98
工况 3	M3	25	30.61	4.27
工况 4	M3	30	30.60	4.28
工况 5	M3	40	31.19	3.69
工况 6	M4	10	34.08	0.80
工况 7	M4	20	33.18	1.70
工况 8	M4	25	33.28	1.60
工况 9	M4	30	33.46	1.42
工况 10	M4	40	33.99	0.89
工况 11	M5	10	32.98	1.90
工况 12	M5	20	31.29	3.59
工况 13	M5	25	31.09	3.79
工况 14	M5	30	31.29	3.59
工况 15	M5	40	32.38	2.50

上溯最大瞬时距离最小,为 30.60 km,相较不喷水工况,减小 4.28 km,说明在 M3 点设置喷水,工况 4 减弱咸潮上溯的效果最好。

3.1.2 M4 点扰动

由工况 6~10 的可知,这 5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均出现在 1 月 21 日 21:00,即小潮后的中潮,正是咸潮上溯最严重的时期。由表 2 可知,5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均比不喷水工况有所减小,说明在 M4 点设置喷水能够有效减弱小潮后中潮期的咸潮上溯,其中工况 7 的咸潮上溯最大瞬时距离最小,为 33.18 km,相较不喷水工况,减小 1.70 km,说明在 M4 点设置喷水,工况 7 减弱咸潮上溯的效果最好。

对比在 M3 点和 M4 点喷水,发现相同的喷水流量下,M3 点减小的咸潮上溯最大瞬时距离高于 M4 点,可知在 M3 点设置喷水的抑咸效果优于在 M4 点。

3.1.3 M5 点扰动

通过对工况 11~15 的分析,发现这 5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均出现在 1 月 21 日 21:00,即小潮后的中潮,正是咸潮上溯最严重的时期。由表 2 可知,5 种工况的咸潮上溯最大瞬时距离均比不喷水工况有所减小,说明在 M5 点设置喷水能够有效减弱小潮后中潮期的咸潮上溯,其中工况 13 对应的咸潮上溯最大瞬时距离最小,为 31.09 km,相较不喷水工况减小 3.79 km,说明在 M5 点设置喷水,工况 13 减弱咸潮上溯的效果最好。

3.1.4 综合分析

所有工况的咸潮上溯最大瞬时距离均出现在 1

月 21 日 21:00,即小潮后的中潮,正是咸潮上溯最严重的时期。在小潮期设置喷水后,各工况的咸潮上溯最大瞬时距离均有所减小,其中小潮后的中潮期咸潮上溯强度减弱明显。

综合上述 15 种工况来看,喷水位置及流量选择对咸潮上溯距离的影响较大。相同喷水流量条件下,在底部高盐水团附近(M3 点所在断面)喷水的抑咸效果优于其他断面(M4、M5 点所在断面)。抑咸措施下,断面喷水流量存在最优值,当小于该值时,咸潮上溯距离随着流量的减小逐渐增大,这主要是因为流量较小时对盐水楔起不到顶冲作用,不足以破坏盐水楔,但是随着流量的增大,对盐水楔的破坏作用也随之增大,使得咸潮上溯距离越来越小;当大于该值时,咸潮上溯距离随着流量的增大而逐渐增大,这主要是因为流量较大时,直接破坏了盐水楔,盐水从原来的层化状态加速变成了掺混状态,相较不喷水的情况,盐水楔破坏导致的高浓盐度现象提前出现,使得咸潮上溯距离越来越大。其中 M3 断面喷水流量最优值为 $30\text{ m}^3/\text{s}$,M4 断面喷水临界流量最优值为 $20\text{ m}^3/\text{s}$,M5 断面喷水临界流量最优值为 $25\text{ m}^3/\text{s}$ 。在 M3 点所在断面进行盐水楔扰动,减弱咸潮上溯的效果最好,这主要是由于小潮期间磨刀门水道盐水楔位于 M3 点所在断面附近,当在该断面水平喷水时,盐水楔结构受到一定程度的破坏,底层高盐水无法持续蓄积,使得咸潮上溯强度减弱最为明显。

3.2 盐水楔扰动对纵向盐度分布的影响

研究时间为 2009 年 1 月 16—31 日,纵断面位置见图 1 的 A—A 断面,各个时刻与潮汐的对应关系见图 2 中的 1~3,分别为小潮涨停时刻、咸潮上溯最严重时刻和大潮涨停时刻。由于不喷水工况咸潮上溯最严重的时刻出现在小潮之后的中潮(1 月 21 日 21:00),所以中潮时期用咸潮上溯最严重时刻代替中潮涨停时刻进行分析,从而更显著地展示减弱咸潮的效果。因在 M3 点所在断面喷水对减弱咸潮上溯的效果最好,因此,对设置 M3 喷水情况下的小潮涨停时刻、咸潮上溯最严重时刻和大潮涨停时刻的纵断面盐度进行分析。

图 5 是设置 M3 喷水情况下的咸潮上溯最严重时刻的纵断面盐度分布图。相较不喷水工况,咸潮上溯最严重时刻的咸潮上溯强度明显减弱,0.5‰、1‰和 5‰低盐度等值线向外海退缩程度显著,其中 0.5‰盐度等值线作为最关心的取水依据,在喷水流量为 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 时,它的上溯最远点由 M8 点附近向海退缩约 4.2 km,而 10‰、15‰和

20‰这些高盐度等值线退缩程度较小。综合所有的盐度等值线变化情况发现,盐水楔扰动对低盐度区域的影响比较大,使得低盐度等值线显著向外海退缩。对比由图 5 可知,设置喷水流量 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 时的减弱咸潮上溯的效果最好,与第 3.1.4 节的结论相同。

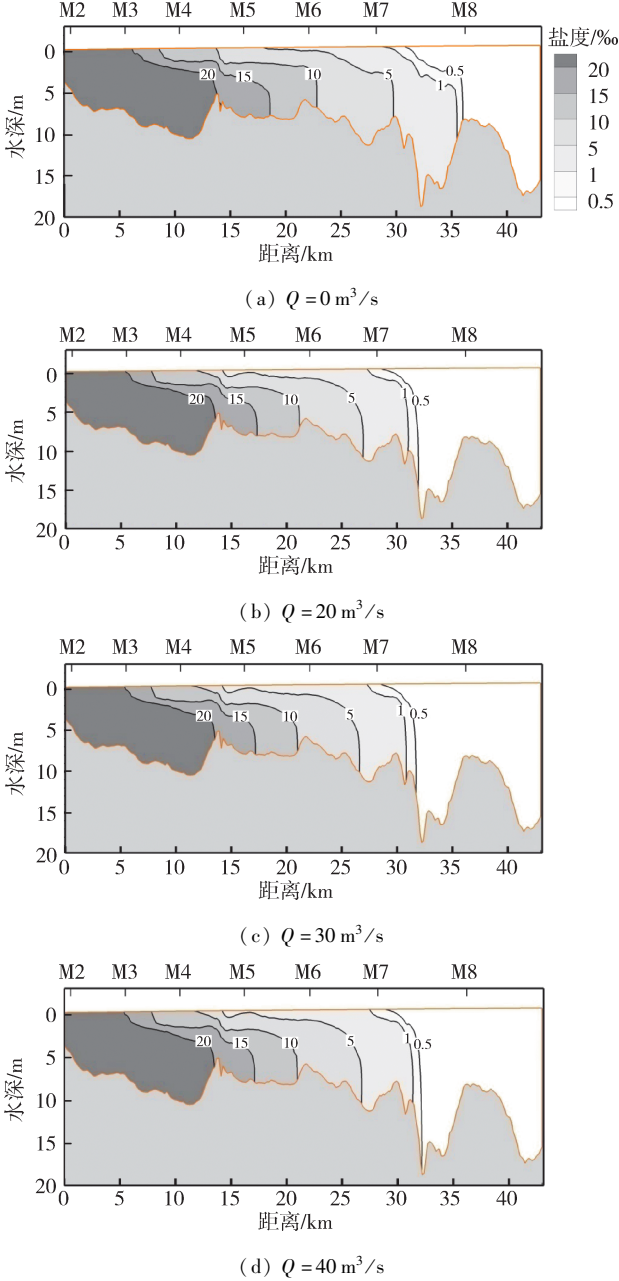


图 5 设置 M3 喷水的咸潮上溯最严重时刻的纵断面盐度分布

相较不喷水工况,小潮涨停时刻的咸潮上溯强度明显减弱,低盐度等值线向外海退缩程度显著,高盐度等值线退缩程度较小;大潮涨停时刻的咸潮上溯强度减弱不明显,各个盐度等值线向外海退缩程度都较小。

3.3 盐水楔扰动对垂向盐度分布的影响

图 6 为不喷水工况和工况 4 的表层和底层盐度时间过程对比图。在 M3 点进行盐水楔扰动后($Q =$

30 m³/s),平岗和联石湾的表层和底层盐度都明显减小,其中底层盐度减小的更加明显,主要原因是直接作用于底部盐水楔,对其进行扰动,加强底层盐淡水混合,降低底层盐水浓度,使得底层盐度减小明显。

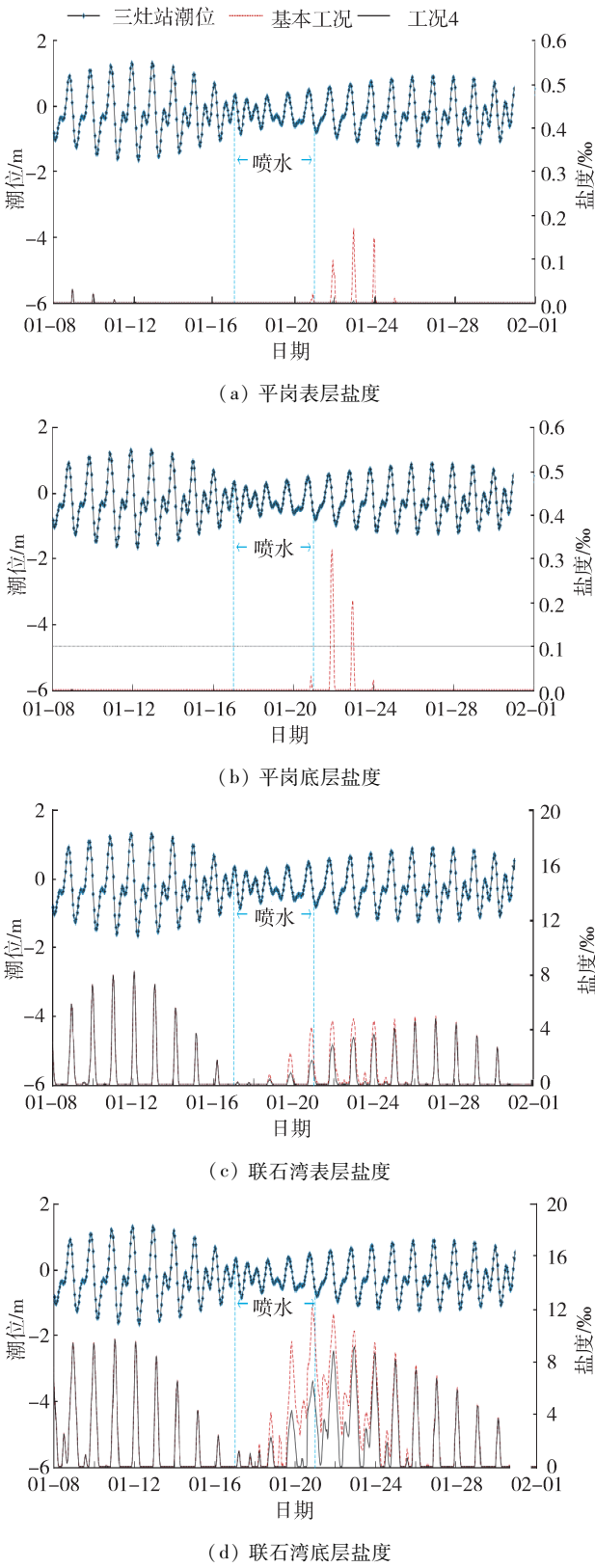


图6 不喷水工况和工况4的表层盐度和底层盐度时间过程对比

研究表明,进行盐水楔扰动能有效减弱表层和底层盐度,为河口地区取水难题的解决提供了一种新方法,但是也存在一些缺陷。一方面,本研究未考虑风的影响,而河口取水多取表层水,风对表层盐度的影响比较大且不可忽略,因此本研究进行的盐水楔扰动对抑咸和对供水的作用存在一定局限性;另一方面,本研究选择小潮期间全天进行盐水楔扰动,未考虑长时间连续扰动产生的航运、生态和经济成本等方面的问题。

4 结 论

a. 本研究所有工况的咸潮上溯最大瞬时距离均出现在1月21日21:00,即小潮后的中潮,正是咸潮上溯最严重的时期。在小潮期进行盐水楔扰动后,各工况的咸潮上溯最大瞬时距离均有所减小。

b. 相同喷水流量条件下,在底部高盐水团附近(M3点所在断面)喷水的抑咸效果优于其他断面。

c. 抑咸措施下,喷水流量存在最优值,当小于该值时,咸潮上溯距离随着流量的减小逐渐增大;当大于该值时,咸潮上溯距离随着流量的增大逐渐增大。

d. 在M3点进行盐水楔扰动后,以小潮期和中潮期抑制咸水上溯的作用最优,表现为低盐度和高盐度等值线都呈现向海后退的趋势,低盐区的后退趋势更为明显。

e. 盐水楔扰动后,河道内平岗和联石湾的表层盐度和底层盐度明显减小。

参考文献:

[1] 孔兰,陈晓宏. 珠江口咸潮影响因素分析[J]. 水资源保护,2015,31(6):94-97. (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Analysis on the influence factors of saltwater in Pearl River Estuary[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):94-97. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 孔兰,陈晓宏,刘斌,等. 咸潮影响下磨刀门水道取淡时机初探[J]. 水资源保护,2011,27(6):24-27. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, LIU Bin, et al. A preliminary study on fresh water extraction time under influence of salt tide in Modaomen Channel[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6):24-27. (in Chinese))

- 2011,27(6):24-27. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 闻平,陈晓宏,刘斌,等. 磨刀门水道咸潮入侵及其变异分析[J]. 水文,2007,27(3):65-67. (WEN Ping, CHEN Xiaohong, LIU Bin, et al. Analysis of tidal saltwater intrusion and its variation in Modaomen Channel [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27 (3): 65-67. (in Chinese))
- [6] 尹小玲,张红武,方红卫. 枯季磨刀门水道咸潮活动与压咸控制分析[J]. 水动力学研究与进展,2008,23(5):554-559. (YIN Xiaoling, ZHANG Hongwu, FANG Hongwei. Hydrodynamic analysis and control on saline water intrusion in Modaomen Waterway during the dry season [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23 (5): 554-559. (in Chinese))
- [7] 陈荣力,刘诚,高时友. 磨刀门水道枯季咸潮上溯规律分析[J]. 水动力学研究与进展,2011,26(3):312-317. (CHEN Rongli, LIU Cheng, GAO Shiyu. Analysis of the mechanism on the saltwater intrusion in Modaomen Estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26 (3): 312-317. (in Chinese))
- [8] 李春初. 珠江河口咸潮问题之我见[J]. 热带地理, 2013,33(4):496-499. (LI Chunchu. My opinion on salt tide in the Pearl River estuary [J]. Tropical Geography, 2013, 33(4): 496-499. (in Chinese))
- [9] LUYUN R J, MOMII K, Nakagawa K. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377 (3/4): 227-236.
- [10] BOTERO-ACOSTA A, DONADO L D. Laboratory scale simulation of hydraulic barriers to seawater intrusion in confined coastal aquifers considering the effects of stratification [J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 25: 36-43.
- [11] BASDURAK N B, ONDER H, MOTZ L H. Analysis of techniques to limit Saltwater intrusion in coastal aquifers [J]. World Environmental and Water Resources Congress, 2007(1): 1-8.
- [12] ABD-ELHAMID H F. Investigation and control of seawater intrusion in the Eastern Nile Delta aquifer considering climate change [J]. Water Science & Technology Water Supply, 2017, 17(2): 311-323.
- [13] ABDLOULHALIK A, AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 199: 62-73.
- [14] ABDLOULHALIK A, AHMED A, HAMILL G A. A new physical barrier system for seawater intrusion control [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 416-427.
- [15] 程香菊,詹威. 数值分析磨刀门水道咸潮上溯控制工程措施的效应[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(5): 597-604. (CHENG Xiangju, ZHAN wei. Modeling approach to assess the effects of controlling engineering measures on saltwater intrusion in Modaomen Estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27 (5): 597-604. (in Chinese))
- [16] 罗丹,卢陈,刘国珍,等. 磨刀门咸潮物理模型试验-V活动潜坝抑咸效果研究[J]. 人民珠江, 2012(1): 45-48. (LUO Dan, LU Chen, LIU Guozhen, et al. Modaomen salt tide physical model test V-study on saline water intrusion control effect of submerged dam [J]. Pearl River, 2012(1): 45-48. (in Chinese))
- [17] 包芸,刘杰斌,任杰,等. 磨刀门水道盐水强烈上溯规律和动力机制研究[J]. 中国科学:G辑 物理学 力学 天文学, 2009(10): 1527-1534. (BAO Yun, LIU Jiebin, REN Jie, et al. Research of law and dynamic mechanism for strong saline water intrusion in Modaomen Waterway [J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2009(10): 1527-1534. (in Chinese))
- [18] 包芸,黄宇铭,阮波. 磨刀门水道具有垂向间断和连续结构的盐水楔[J]. 中国科学:G辑 物理学 力学 天文学, 2011(10): 1216-1223. (BAO Yun, HUANG Yuming, RUAN Bo. Salt wedge with vertical structure of discontinuous and continuous distribution in Modaomen Waterway [J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2011 (10): 1216-1223. (in Chinese))
- [19] WANG B, ZHU J R, WU H, et al. Dynamics of saltwater intrusion in the Modaomen Waterway of the Pearl River Estuary [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55 (11): 1901-1918.

(收稿日期:2017-11-10 编辑:彭桃英)

