



岸线变化和海平面抬升 对珠江河口水体交换的影响^{*}

蒋文治^{1, 2, 3}, 季小梅^{1, 4}, 张蔚^{1, 2, 3}, 徐龔文⁵

- (1. 河海大学, 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏南京 210098;
2. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 上海滩涂海岸工程技术
研究中心, 上海 200061; 4. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;
5. 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东广州 510611)

摘要: 水体交换能力是评价河口水域自净能力的一个指标。为研究岸线变化下珠江河口水体交换能力的变化情况以及海平面抬升对其的影响, 建立珠江河口二维水动力-保守物质运输模型, 并将模型模拟的水位、流速、流向结果与实测数据进行对比。运用欧拉法, 分别计算洪枯季、高低潮位下不同年代岸线变化和海平面抬升不同高度时珠江河口水体滞留时间的变化情况。结果表明: 岸线围垦对珠江河口各水域水体交换的影响不尽相同, 如从 20 世纪 70 年代—2010 年, 伶仃洋水域的平均水体滞留时间先保持几乎不变后略微减小, 而黄茅海和磨刀门水域则因状况而异; 海平面抬升不利于水体交换, 珠江各水域平均水体滞留时间随海平面抬升而增长, 且枯季增加的时间大于洪季。

关键词: 岸线变化; 海平面抬升; 水体滞留时间; 珠江河口

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0019-08

Influence of coastline change and sea-level rise on water exchange in the Pearl River Estuary

JIANG Wen-zhi^{1,2,3}, JI Xiao-mei^{1,4}, ZHANG Wei^{1,2,3}, XU Yan-wen⁵

(1.Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.Engineering Research Center of the Education Ministry of Dredging Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3.Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China; 4.Key Laboratory of Port,
Waterway & Sedimentation Engineering, Ministry of Communications, PRC, Nanjing 210029, China; 5.Key Laboratory of the
Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Water exchangeability is an indicator for evaluating the self-purification ability of estuary. To study the influence of shoreline changes and sea level rise on water exchange in the Pearl River Estuary, we establish a two-dimensional hydrodynamic-conservative mass transport model, compare the results of water level and flow direction simulated by the model with the measured data, and use the Euler method to calculate the water residence time variation of the Pearl River Estuary due to coastline changes and sea-level rise under the condition of wet and dry seasons and high and low tides. The results show that the impact of shoreline changes on water exchange in

收稿日期: 2020-09-17

*基金项目: 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金资助项目(2018KJ05); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金项目(Yk220001-5); 河海大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200204036)

作者简介: 蒋文治(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为气候变化对河口海岸水动力的影响。

通讯作者: 季小梅(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为河口海岸水动力环境数值模拟。E-mail: vastocean@hhu.edu.cn。

the Pearl River Estuary is different, for example from the 1970s to 2010, the average water residence time of the Lingding Bay first remains almost unchanged and then decreases slightly, while the water average water residence time of the Huangmao Bay and Modao Bay vary depending on the situation. Sea level rise is not conducive to water exchange, the water residence time increases with the rise of sea level, and the time increases in the dry season is longer than that in the wet season.

Keywords: coastline change; sea-level rise; water residence time; the Pearl River Estuary

在长期对河口水环境问题的探索过程中，人们发现水体环境的改善最终归结为对污染物归宿的控制^[1]，在河口的潮涨潮落和径流过程的作用下，海岸环境下的污染物浓度与外界水体发生交换并得到稀释^[2]。水体交换能力反映了污染物稀释能力的强弱，而水体滞留时间^[3-5]是水体交换能力的一种体现方式，通过对水体滞留时间的研究，可以分析河口污染物稀释能力，进而分析水质与水生态。

为了研究水体交换能力的影响因素，Du 等^[6]和 Sun 等^[7]分别对切萨皮克湾和珠江河口的水体滞留时间进行计算，分析当地水体滞留时间在径流和风等要素下的变化趋势。近年来，人们越来越关注岸线变化和海平面抬升对水体交换能力的影响，已有不少学者对其进行研究。龚文平等^[8]研究人类活动和自然演变对小海潟湖水体滞留时间的影响，得出结论：小海潟湖的水体滞留时间在 1936—2001 年间有所增长，其主要的影响因素是河流净流量的减少，其次是陆地开垦造成岸线变化。Shi 等^[9]通过 EFDC(三维环境流体动力学程序)模型研究胶州湾岸线变化下的水体滞留时间的变化，结果表明：胶州湾的水体滞留时间从 1986—2008 年逐渐增加，陆地开垦对水体滞留时间产生较大影响。Liu 等^[10]研究在不同径流下，海平面抬升时的乌溪河口的水体滞留时间变化，最终得出在不同径流条件下的乌溪河口的水体滞留时间会随着海平面抬升呈现不同程度的增加，海平面抬升会导致乌溪河水质的恶化。Yang 等^[11]研究不同岸线下、海平面抬升时深圳湾水体滞留时间的变化，得出陆地开垦可能有益于增强深圳湾的水体交换能力、而海平面抬升则会起到相反效果的结论。

珠江河口是中国七大江河流域河口之一，在过去的 40 年间，珠江河口岸在人类活动的影响下岸线变化巨大，在 1976—2007 年间，珠江河口大陆岸线向海延伸了 579 m，净延伸率为 19.3 m/a，同时大陆岸线长度增加了 106.2 km^[12]。另外，海平面抬升也是珠江河口不可忽视的问题^[13]，在 1959—2011 年间珠江三角洲区域海平面平均变化速率为 4.08 mm/a，且存在加速上升趋势^[14]。

本文基于水动力-保守物质输运模型，研究珠江河口 20 世纪 70 年代、90 年代和 2010 年岸线下，以及在 2010 年岸线下海平面抬升 0.3、0.6、1.0、1.5 m 时的水体滞留时间变化，以确定岸线变化和海平面抬升对珠江河口水体交换能力的影响。

1 水动力-保守物质输运数学模型

1.1 水动力模型

1.1.1 控制方程

水动力模型是建立在三维不压缩和 Reynolds 值均匀分布的 Navier-Stokes 方程的基础上，其二维非恒定浅水方程组可见文献[15]。

1.1.2 主要参数与边界设置

模型采用 3 组不同时期的岸线，分别是 20 世纪 70 年代、90 年代和 2010 年珠江河口岸线，岸线变化可见文献[16]，其中 2010 年岸线、2010 年岸线下的模型网格分别如图 1、2 所示。河网处网格较密集，河口处的网格较稀疏，模型分辨率在 0.02~3 km 之间，时间步长为 60 s。本文主要考虑岸线变化的影响，故模型水深统一采用数据最全的 20 世纪 90 年代实测水深插值得到。模型采用热启动，水动力模型为水动力-物质运输模型提供初始条件。所有模型试验均采用相同的上下边

界条件, 模型上边界为高要、石嘴、石角、老鸦岗和博罗的实测每小时径流量。下边界范围到-30 m水深处, 边界条件一般采用TPXO8全球潮汐模型^[17]得到的每小时潮位时间序列。据Hong等^[18]估算, 2100年全球平均海平面抬升值在0.53~0.98 m, 极端情况下会达到1.5 m, 因此本文选择了4个海平面抬升值, 分别为0.3、0.6、1.0和1.5 m。海平面抬升后, 下边界条件由Ji等^[19]建立的南海北部大范围模型外边界叠加海平面抬升值后计算提供。

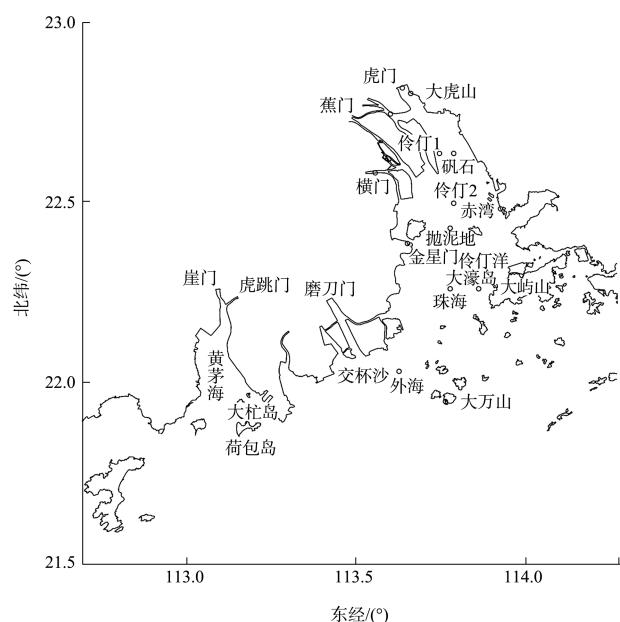


图1 珠江河口2010年岸线

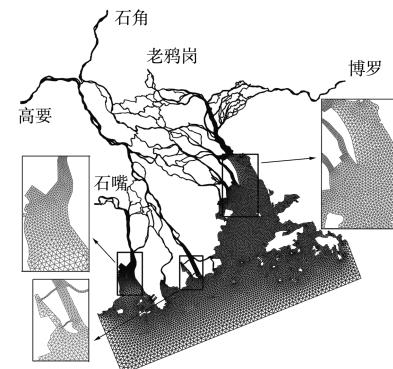


图2 珠江三角洲模型网格

1.2 保守物质运输模型

1.2.1 控制方程

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(uhc)}{\partial x} + \frac{\partial(vhc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(h\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) \quad (1)$$

式中: t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 向的速度分量, ε_x 、 ε_y 为 x 、 y 向的对流扩散系数; c 为保守物质浓度。

1.2.2 主要参数及边界设置

物质运输模型以水动力模型结果作为初始条件, 水动力条件的边界设置相同。物质运输模型初始条件设置计算区域的示踪物质的相对浓度为1, 其余区域设置相对浓度为0, 上、下边界条件均设置为0。在伶仃洋、磨刀门水域、黄茅海采用不同的示踪物质以区分计算, 其计算区域具体位置见表1。示踪物质的弥散系数和降解系数都设置为0以模拟水体动力交换过程。

表1 模型计算区域

计算区域	具体位置
伶仃洋	虎门、蕉门、洪奇门以及横门和穿过大屿山的东北-西南走向的线所围成的水域
磨刀门水域	磨刀门和穿过交杯沙东北-西南走向的线所围成的水域
黄茅海	崖门、虎跳门和大忙岛与荷包岛之间东北-西南走向的线所围成的水域

1.2.3 水体滞留时间计算

目前水体滞留时间的计算方法主要有拉格朗日法和欧拉法^[20]。匡翠萍等^[21]曾用欧拉法计算了河北省秦皇岛的岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响和清淤疏浚工程对七里海潟湖湿地水体交换的影响。欧拉法基于对流扩散方程, 能更好地反映水体交换过程^[22]。本文采用欧拉法对水体滞留时间进行计算。

水体滞留时间定义为初始的单位浓度的示踪物质由于动力作用衰减至一个较小值时所需要的

时间。平均滞留时间 T_r 的计算公式^[23]为:

$$T_r = \int_0^{+\infty} r(t) dt \quad (2)$$

$$r(t) = \frac{\int_{\Omega} H(x,y,t) \cdot C(x,y,t) d\Omega}{\int_{\Omega} H(x,y,t_0) \cdot C(x,y,t_0) d\Omega} \quad (3)$$

式中: $r(t)$ 为保守物质相对质量; t_0 为初始时间; t 为时间; $C(x,y,t)$ 为保守物质浓度; $H(x,y,t)$ 为水深; Ω 为计算区域。为了使计算结果精确, 示踪物质浓度必须下降至一个较小值, 本文所有

$r(t)$ 值均下降至 1% 以下, 且 $r(t)$ 值较低时用最小二乘法对 $r(t) = \beta e^{-kt}$ (k 和 β 为系数) 进行拟合, 再用式(2)对拟合的曲线进行积分, 以得出水体滞留时间。

2 模型结果分析

2.1 模型验证

模型水位和流速验证采用 1999-07-15—1999-07-20 的实测潮位和 2007-08-13—2007-08-14、2007-08-16—2007-08-17 的实测潮位和流速数据, 数据时间间隔为 1h。模型验证包括水位验证和流速验证。1999 年潮位站为横门站、蕉门站和大虎山站。2007 年潮位验证站为赤湾、大虎山、金星门、横门、蕉门和内伶仃站, 流速验证站为伶仃 1、伶仃 2、大濠岛、矾石、抛泥地和外海站 (图 1)。模型模拟水位结果和实测水位比较如图 3 所示, 其中第 1 行为 1999 年的水位验证, 第 2、3 行为 2007 年的水位验证。模型模拟流速、流向结果和实测数据比较如图 4 所示, 可以看出计算值和实测值拟合较好, 误差在 10% 之内, 满足《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》^[24] 的验证标准。

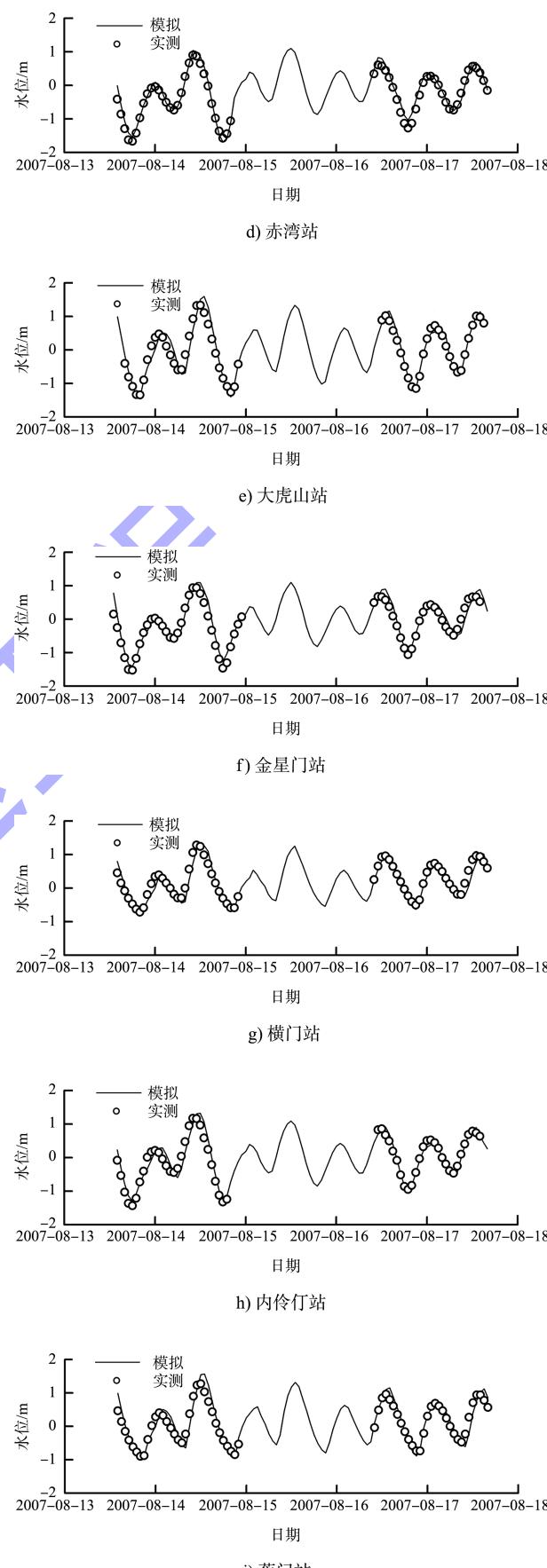
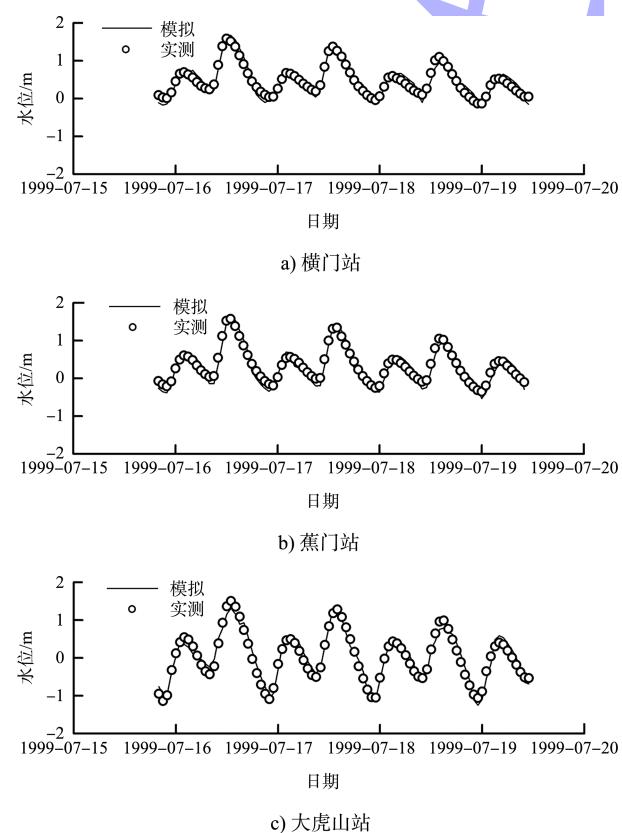


图 3 潮位验证

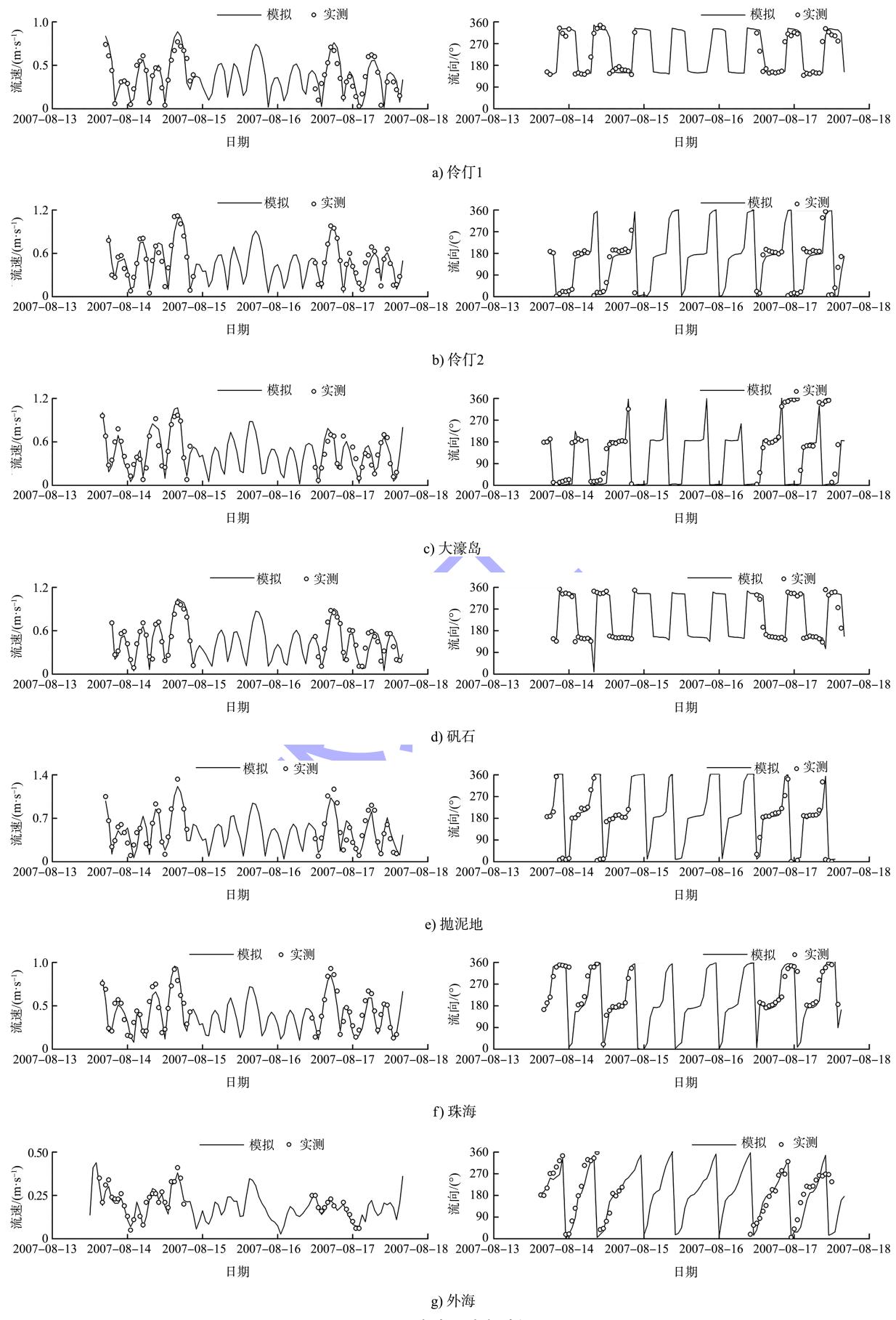


图 4 流速、流向验证

2.2 模型工况设置

考虑到潮位的影响^[25], 对下边界在高潮位和低潮位时的平均水体滞留时间进行计算, 并对2010年岸线下的伶仃洋水域处于平均最高和最低水位时的平均水体滞留时间进行计算。为使计算结果精确, 模型的洪季运行时间为7月中旬—9月中旬, 日平均流量约为11 881 m³/s; 枯季运行时间为1月中旬—4月中旬, 日平均流量约为4 766 m³/s。

2.3 滞留时间结果分析

本文研究珠江水体滞留时间随岸线和海平面抬升的变化情况, 以枯季、高潮位、2010年岸线、海平面抬升0 m为典型工况, 其保守物质相对质量历时曲线如图5所示。可以看出, 保守物质在径流和潮流作用下不断离开和回到河口的过程, 同时在整体趋势上计算区域内保守物质相对质量不断减小, 河口内的水体不断被外界替换。此外, 在典型工况下伶仃洋、黄茅海和磨刀门的保守物质相对质量分别约在第84、59和17 d开始下降至初始值的1%以下。同时可看出, 伶仃洋的水体滞留时间最长, 黄茅海次之, 磨刀门的水体滞留时间最短, 三者在典型工况下的平均水体滞留时间

分别为23.04、10.54和3.43 d。

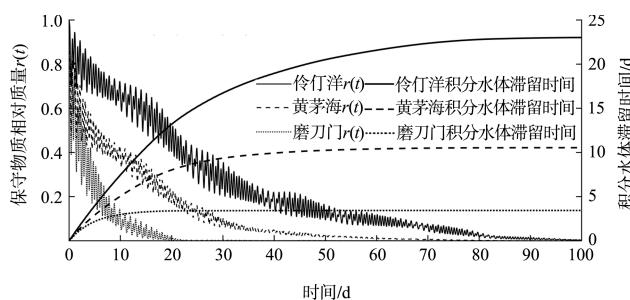


图5 典型工况保守物质相对质量历时曲线

3 滞留时间对海陆相多因素的响应

3.1 滞留时间对岸线变化的响应

珠江河口在20世纪70年代—2010年的平均水体滞留时间变化见表2。表2中20世纪70年代、90年代和2010年指的是不同年份的岸线; +0、+0.3、+0.6、+1.0、+1.5分别代表海平面抬升0、0.3、0.6、1.0和1.5 m; 高低潮位、高低水位分别指示踪剂释放在下边界处于大潮高潮位、大潮低潮位以及伶仃洋水域平均水位最高和最低的时刻。可以看出, 珠江河口不同区域的平均水体滞留时间在岸线变化下呈现不同的变化趋势。

表2 珠江河口平均水体滞留时间变化

工况	平均水体滞留时间/d							
	20世纪70年代	20世纪90年代	2010+0	2010+0.3	2010+0.6	2010+1.0	2010+1.5	
伶仃洋	洪、高潮	9.51	9.65	8.98	9.38	9.78	10.31	10.98
	洪、低潮	11.40	11.53	10.98	11.52	12.05	12.76	13.65
	枯、高潮	23.60	23.76	23.04	23.90	24.75	25.89	27.33
	枯、低潮	27.72	27.71	27.43	28.55	29.67	31.15	33.06
黄茅海	洪、高潮	5.91	4.72	5.05	5.17	5.32	5.60	6.00
	洪、低潮	8.00	6.43	7.13	7.37	7.62	8.06	8.66
	枯、高潮	12.40	9.64	10.54	10.64	10.79	11.13	11.61
	枯、低潮	17.07	13.23	15.29	15.55	15.86	16.44	17.23
磨刀门	洪、高潮	1.41	1.25	0.96	1.05	1.15	1.29	1.50
	洪、低潮	1.90	2.09	1.50	1.67	1.84	2.07	2.38
	枯、高潮	4.10	3.29	3.43	3.72	4.02	4.43	5.00
	枯、低潮	5.10	4.99	5.32	5.76	6.19	6.73	7.39

在20世纪70年代—2010年, 伶仃洋水域的平均水体滞留时间变化较小。从20世纪70年代—20世纪90年代, 除了枯季低潮位, 在其他情况下伶仃洋水域的平均滞留时间略微增加, 最大

增长值发生在枯季高潮位情况下, 其值为0.16 d; 从20世纪90年代—2010年, 伶仃洋水域的平均滞留时间略微减小, 在枯季高潮位时减小时长最多, 为0.72 d。

相较于伶仃洋, 黄茅海水域在岸线变化下的平均水体滞留时间变化趋势较为明显, 从20世纪70年代—2010年间, 黄茅海水域平均滞留时间呈现先减小后增加的趋势, 且枯季变化较洪季更为显著。在洪季时黄茅海水域的平均滞留时间先平均减小了1.38 d, 后平均增加了0.52 d; 在枯季时黄茅海水域的平均滞留时间先平均减小了3.3 d, 后平均增加了1.48 d。其次, 在低潮位时黄茅海水域的平均滞留时间变化比高潮位时显著。例如在枯季低潮位时平均滞留时间先减小了3.84 d, 后增加了2.06 d, 而在枯季高潮位则先减小了2.76 d, 后增加了0.9 d。

磨刀门水域在不同状况下的平均滞留时间随岸线变化呈现不同趋势, 在洪季高潮位时持续减小, 在洪季低潮位时先增加后减小, 而在枯季时先减小后增加, 这也从侧面表现了珠江河口径流和潮汐作用的复杂性。

3.2 滞留时间对海平面上升的响应

珠江河口的平均水体滞留时间随海平面抬升的变化见表2。可以看出, 珠江河口不同水域的平均滞留时间均随着海平面抬升而增加, 且在枯季时的增加量均大于洪季。

伶仃洋水域的平均水体滞留时间增长趋势和海平面抬升基本呈线性变化, 在洪季高潮位、洪季低潮位、枯季高潮位和枯季低潮位状况下海平面每抬升1 m, 平均水体滞留时间分别增加1.33、1.78、2.86和3.75 d。同时从上述平均时间增长速率可以看出, 洪季的增长速率小于枯季, 高潮位时增长速率小于低潮位。

黄茅海水域的平均水体滞留时间随着海平面抬升越高而增长趋势提高, 例如当在枯季低潮位

时, 在海平面抬升0~0.3 m、0.3~0.6 m、0.6~1.0 m、1.0~1.5 m的过程中平均滞留时间分别增长0.86、1.03、1.46和1.56 d/m, 在洪季低潮位时平均滞留时间分别增长0.80、0.83、1.10和1.20 d/m。

磨刀门水域的平均水体滞留时间则在不同状况下呈现不同的增长趋势。在枯季低潮位时, 在海平面抬升0~0.3 m、0.3~0.6 m、0.6~1.0 m、1.0~1.5 m的过程中平均滞留时间分别增长1.47、1.43、1.35和1.32 d/m, 其平均滞留时间随着海平面抬升越高而增长趋势略微减缓。而在其余3个工况下平均滞留时间随着海平面抬升越高而增长趋势都是略微增加的, 例如在枯季高潮位时平均滞留时间分别增长0.97、1.00、1.03和1.14 d/m。

3.3 滞留时间对高低潮位和径流量的响应

由表2可看出, 珠江河口的平均水体滞留时间和高低潮位有着密切关系, 高潮位时的平均滞留时间明显小于低潮位, 这与裴木凤等^[26]的结论相同。文献[7]也提到当计算区域水位越低时, 平均水体滞留时间越长, 因为当水位低时, 潮汐推动保守物质使其留在计算区域内。

为了深度探究潮位对伶仃洋水体滞留时间的影响程度, 对伶仃洋水域平均水位最高和最低时的平均滞留时间进行计算, 结果见表3。可以看出, 伶仃洋洪、枯季时的平均水体滞留时间分别在8.32~11.58 d、21.60~28.66 d, 洪季、枯季时的时间变化范围分别为3.26、7.06 d, 由此可见潮位对伶仃洋水域平均滞留时间影响较大, 且这种影响在径流量减小的情况下扩大。此外, 由表2、3可看出, 珠江洪季时的平均滞留时间远小于枯季。

表3 伶仃洋平均水体滞留时间

工况	洪季、高水位	洪季、低水位	枯季、高水位	枯季、低水位
平均水体滞留时间/d	8.32	11.58	21.60	28.66

4 结论

1)珠江河口不同水域的平均水体滞留时间在岸线变化下呈现不同的变化趋势。在20世纪70年代—2010年, 伶仃洋水域的平均水体滞留时间先

保持几乎不变后略微减小; 黄茅海水域的平均水体滞留时间则呈现先减小后增加的趋势, 且枯季变化较洪季更为显著; 磨刀门水域的平均水体滞留时间则在洪季高潮位时持续减小, 在洪季低潮

位时先增加后减小，而在枯季时先减小后增加。

2)珠江不同水域的平均滞留时间均随海平面抬升而持续增加，且在枯季时的增加量均大于洪季。伶仃洋水域的平均滞留时间增长趋势和海平面抬升基本呈线性变化；黄茅海水域的平均滞留时间则随着海平面抬升越高而增长趋势提高；磨刀门水域的平均滞留时间则在枯季低潮位时随海平面抬升越高增长趋势略微变缓，在枯季高潮位和洪季均略微提高。

3)潮位对珠江各水域平均滞留时间影响较大，具体体现为高潮位时的平均滞留时间较低潮位时小，且这种影响在径流量减小的情况下扩大。此外，珠江各水域洪季时的平均滞留时间远小于枯季。

4)综上所述，岸线围垦对珠江河口各水域水体交换的影响不尽相同，而海平面抬升不利于水体交换。

参考文献：

- [1] SUFFET M. Fate of pollutants in the air and water environments, part 1: mechanism of interaction between environments and mathematical modeling and the physical fate of pollutants [J]. *Journal of urban history*, 1977, 35(4): 561.
- [2] 夏华永,李绪录,韩康.大鹏湾环境容量研究 I : 自净能力模拟分析 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31 (12): 2031-2038.
- [3] MONSEN N E, CLOERN J E, LUCAS L V, et al. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales [J]. *Limnology and oceanography*, 2002, 47(5): 1545-1553.
- [4] DELHEZ E J M, HEEMINK A W, DELEERSNIJDER E. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 2004, 61(4): 691-702.
- [5] DELHEZ E J M. Transient residence and exposure times[J]. *Ocean science*, 2006, 2(4): 1-9.
- [6] DU J B, SHEN J. Water residence time in Chesapeake Bay for 1980-2012[J]. *Journal of marine systems*, 2016, 164: 101-111.
- [7] SUN J, LIN B L, LI K M, et al. A modelling study of residence time and exposure time in the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of hydro-environment research*, 2014, 8 (3): 281-291.
- [8] GONG W P, SHEN J, JIA J J. The impact of human activities on the flushing properties of a semi-enclosed lagoon: Xiaohai, Hainan, China[J]. *Marine environmental research*, 2008, 65(1): 62-76.
- [9] SHI J H, LI G X, WANG P. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Journal of coastal research*, 2011, 27 (1): 57-72.
- [10] LIU W C, LIU H M. Assessing the impacts of sea level rise on salinity intrusion and transport time scales in a tidal estuary, Taiwan[J]. *Water*, 2014, 6(2): 324-344.
- [11] YANG Y, CHUI T F M. Aquatic environmental changes and ecological implications from the combined effects of sea-level rise and land reclamation in Deep Bay, Pearl River Estuary, China[J]. *Ecological engineering*, 2017, 108: 30-39.
- [12] ZHANG W, XU Y, HOITINK A J F, et al. Morphological change in the Pearl River Delta, China[J]. *Marine geology*, 2015, 363: 202-219.
- [13] 康蕾,马丽,刘毅.珠江三角洲地区未来海平面上升及风暴潮增水的耕地损失预测[J].*地理学报*, 2015, 70(9): 1375-1389.
- [14] 何蕾,李国胜,李阔,等.1959年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势[J].*地理研究*, 2014, 33 (5): 988-1000.
- [15] 匡翠萍,董智超,顾杰,等.岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 769-777.
- [16] 王宗旭,乔煜,季小梅,等.珠江河口岸线变化对潮动力的影响[J].*科学技术与工程*, 2020, 20 (3): 1171-1180.
- [17] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2002, 19 (2): 183-204.
- [18] HONG B, LIU Z H, SHEN J, et al. Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of marine systems*, 2020, 201: 1-13.

(下转第 52 页)