

2007—2008年冬季珠江三角洲强咸潮事件*

罗琳, 陈举, 杨威, 王东晓

(中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 根据 2007—2008 年冬季大、小潮时对珠江河口的走航和定点同步观测资料, 分析了虎门水道、横门水道和磨刀门水道的盐度、流场特征以及各口门咸水入侵的程度, 探讨了影响各口门与水道咸潮的因素。分析结果显示, 该季度咸潮入侵现象严重, 对珠海、广州等地的供水造成影响; 咸潮的入侵受潮汐、径流和风的共同作用, 各因素对各个口门的影响程度不同; 磨刀门的咸潮活动有较独特的规律和动力机制。

关键词: 珠江口; 咸潮; 径流; 风; 潮汐

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)06-0022-07

An intensive saltwater intrusion in the Pearl River Delta during the winter of 2007–2008

LUO Lin, CHEN Ju, YANG Wei, WANG Dong-xiao

(Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Based on the observations in the Pearl River Estuary in the winter of 2007–2008, the authors analyze the characteristics of salinity, current and salt intrusion at the Humen, Hengmen and Modaomen channels. The results indicate that the salt intrusion was serious and affected the water supply for Zhuhai and Guangzhou that winter. Runoff, tide and wind affected the salt intrusion together, and their contributions were different at different waterways. The intrusion of saltwater at the Modaomen Channel has a particular characteristic and dynamical mechanism.

Key words: Pearl River estuary; salt intrusion; runoff; wind; tide

一般认为咸潮是一种天然水文现象, 当河流流量不足, 令海水上溯(倒灌), 咸淡水混合造成上游河道水体变咸, 即形成咸潮。当咸潮发生时, 海水通过河流或其他渠道, 倒流到内陆淡水河中, 一部分还下渗到地下水层, 使淡水的含盐量大幅上升, 直接危害到饮用水资源。高盐度的水会对人体造成危害, 据中国《生活饮用水水源水质标准》(CJ3020-93), 氯化物含量均应小于 $250\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (即 250 度)。当含盐度超过 250 度时, 特殊人群, 如老年人, 患高血压、心脏病、糖尿病的人群, 已不宜再饮用了; 当含盐度超过 400 度时, 已不适合任何人饮用。由环流动力和咸淡水混合导致的盐水入侵是河口的一个重要特征, 在国内外的河口地区都曾被观测到。资料分析

和模拟研究发现, 影响咸潮的因素包括枯水期上游径流量、天文潮汐作用、局地风和海平面上升等自然因素和非法挖沙、航道疏浚改变潮汐通道等人为因素^[1-5]。

近年来珠江三角洲地区冬季咸潮持续时间增长、上溯影响范围趋大、强度趋于严重^[6-7]。严重影响了沿岸城镇饮水安全和农业灌溉用水的需求, 受影响的城市和地区包括广州、中山、珠海、澳门和深圳等。2004—2005 年冬珠江三角洲爆发了 42 年来最强的咸潮, 迫使 2005 年初首次实施了珠江流域大规模的远程跨省区调水、从西江调水压咸的应急措施。此后为了确保珠三角地区和澳门特别行政区的供水安全, 每年的枯水季均需根据水情预报对水

收稿日期: 2009-06-15; 修订日期: 2009-08-10。孙淑杰编辑

基金项目: 广东省重大科技专项规划项目(2007A032600002); 海洋公益性行业科研专项(200705019); 国家 908 专项(908-01-ZH2, 908-02-03-05, 908-01-BC17); 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(SQ200810)

作者简介: 罗琳(1978—), 女, 广西柳州市人, 博士, 主要从事河口水动力与水质研究。E-mail: luolin@scsio.ac.cn

通讯作者: 王东晓。E-mail: dxwang@scsio.ac.cn

量进行调度。2007 年 9 月下旬伊始, 华南大部分地区持续少雨, 11 月份北江流域跌破百年新低, 直至 12 月中旬, 广东的平均降雨量仅次于 1992 年的历史同期最小值, 导致广东西部出现 30 年一遇的重旱。珠海市的广昌、裕州、平岗 3 个主要泵站均受到咸潮的侵袭^[8]。由于咸潮是集气象、径流与海洋潮汐于一体的综合问题, 2007 年 12 月下旬至 2008 年 1 月上旬, 中国科学院南海海洋研究所对珠江口展开了为期 6 天的强化观测, 观测虎门水道、横门水道和磨刀门水道全潮过程的咸水入侵特征, 了解珠海、中山市内河咸潮入侵的强度和范围, 同时对咸潮入侵的程度与气象、径流和潮流的关系进行研究。

1 技术与方法

珠江口是一个弱感潮河口, 潮汐类型为不规则混合半日潮^[9]。根据天文潮的特征, 确定观测周期为 12 月 26 日—28 日(大潮期)和 12 月 31 日—1 月 2 日(小潮期)两个阶段, 整个航次采用定点连续站位观测和走航观测方式相结合, 主要的观测要素包括温度、盐度、深度和海流等常规水文要素。其中, 水文监测定点站 4 个(H1、H2、M1、M2), 观测咸潮敏感河道磨刀门水道和横门水道; 主要观测仪器采用 RCM9 海流计和 SBE37, 连续 50h, 采样间隔每 1h 一次, 观测垂向温、盐廓线及表、中、底层海流。走航观测船 3 条: 一条从磨刀门大涌口水闸外沿磨刀门水道逆流向上(L3), 设 11 个采样点; 一条从横门外涌口门沿横门水道逆流向上(L2), 设 5 个采样点; 还有一条沿珠江主航道从内伶仃岛西侧一直观测到新洲码头(L1), 设 12 个采样点。观测仪器为 CTD, 观测垂向温、盐廓线。本次调查共取得温、盐垂向廓线 456 条(图 1)。

2 结果分析

2.1 盐度特征

走航观测结果显示, 冬季虎门水道有明显的咸潮入侵趋势, 咸水沿水道入侵至新洲码头上游, 大潮时入侵强度大于小潮时。新洲码头(距河口约 40km)测到的盐度在大潮期约为 1‰, 小潮期约为 0.8‰, 均超过咸潮预警盐度 0.25‰, 显示了咸潮在虎门水道的入侵强度和范围较大。大潮时水体垂向混合良好, 在小潮时口门河道段水体有成层现象。磨刀门水道的咸潮在大潮时影响范围超过南镇水厂(距河口约 35km), 小潮时可超过全禄水厂(距河口

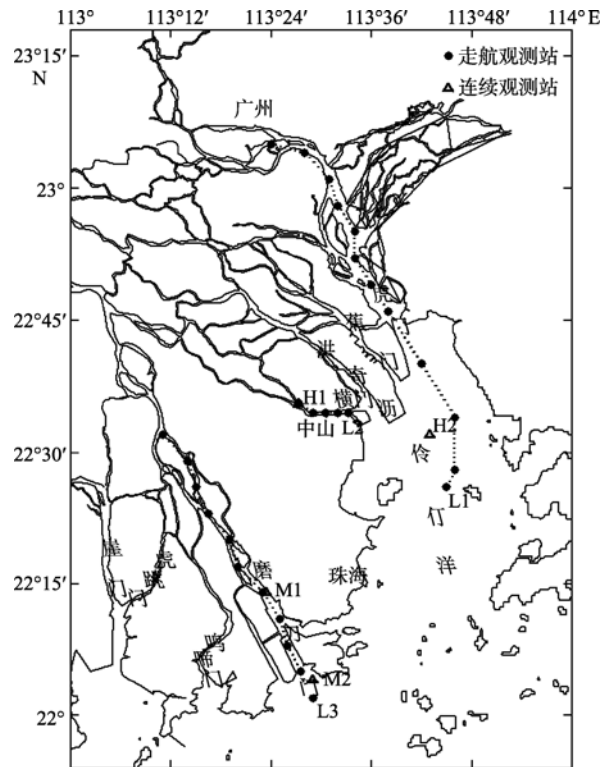


图 1 珠江河网、河口地形及监测站位设计
Fig. 1 Sampling stations in the Pearl River Estuary

45km), 小潮时期的入侵强度强于大潮, 并有明显的盐水楔出现。横门水道基本上没有受到咸潮的影响, 仅在大潮时盐水预警线上溯到口门入海处, 小潮时各走航监测站的盐度都没有达到 0.2‰(图 2)。

4 个定点站所观测的盐度变化都有明显的潮周期趋势, 一日内两涨两憩。无论在大潮期还是小潮期, 盐度约在涨憩后 3h 达到最大值, 落憩后 1h 达到最小值, 最大值出现在底层水体。但由于本区属不规则半日潮, 日潮不等现象显著, 一日内两高潮所对应的最大含盐度和两低潮对应的最小含盐度各不相同, 以高高潮后的盐度最大, 低低潮时盐度最低; 河道内观测站的盐度均小于口门外观测站的盐度。除 M1 站外, 各站在大潮期间的盐度都大于小潮期(表 1)。

咸淡水的混合在垂向上也有较大的变化, 盐度表现为从上到下逐渐增大, 以涨憩附近最为显著, 在高高潮时表、底层盐度差异最大。大潮期间 M1 和 M2 站的垂向盐度梯度分别为 $0.25\text{‰}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $1.27\text{‰}\cdot\text{m}^{-1}$, 口门外的盐度差大于河道内, H1 和 H2 站亦如此。从大潮期到小潮期, 表底层盐度差都有增大的趋势, 显示潮汐动力和混合能力的减弱。H1 站的盐度垂向梯度在小潮期小于大潮期, 与 H1 站小潮时基本上为冲淡水占据有关。

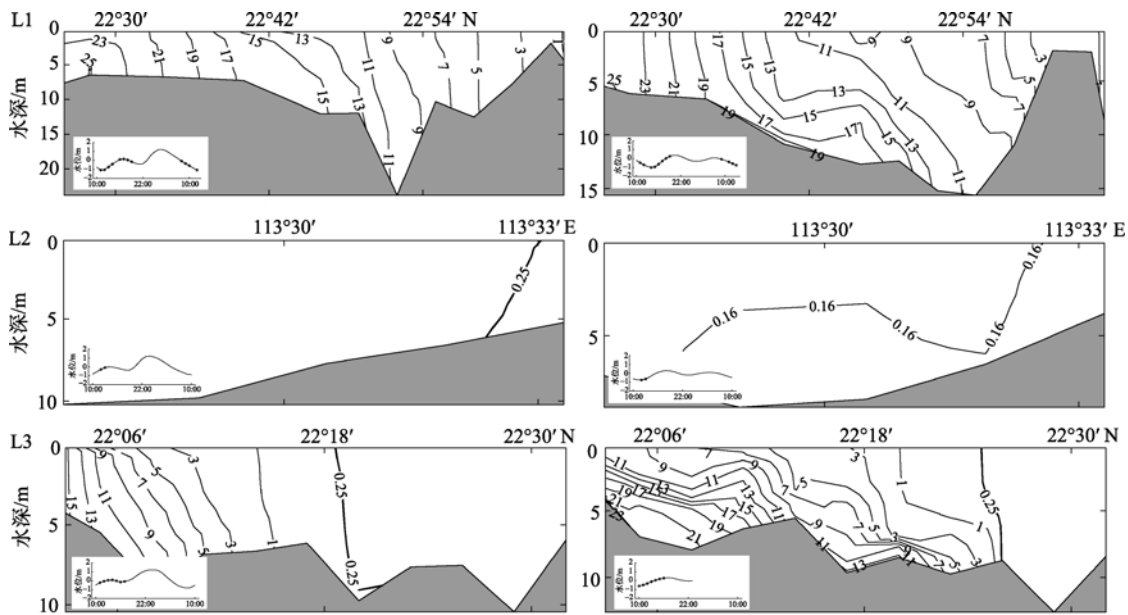


图 2 走航各断面的盐度等值线

左边为大潮时, 右边为小潮时; 小图分别为广州、横门、灯笼山潮位站对应走航时刻的潮位信息

Fig. 2 Salinity isolines along sections L1, L2, and L3 during spring tide (left panel) and neap tide (right panel)

表 1 各定点站平均盐度及垂向梯度特征

Tab. 1 Salinity and its vertical gradient at stations M1, M2, H1, and H2

站名	潮汐	表层/‰	底层/‰	垂向平均/‰	垂向梯度/(‰·m ⁻¹)	分层系数 <i>N</i>
M1	大潮	1.74	3.18	2.7	0.25	0.35
	小潮	5.14	15.17	10.3	2.19	1.05
M2	大潮	16.56	22.85	20.76	1.27	0.27
	小潮	13.46	23.28	20.27	1.46	0.44
H1	大潮	0.21	0.23	0.22	0.004	0.09
	小潮	0.16	0.16	0.16	0.001	0.03
H2	大潮	16.97	20.66	19.68	0.87	0.16
	小潮	4.66	11.10	8.67	1.09	0.65

注: $N = \delta S / S_0$, δS 为表、底层盐度差, S_0 为垂线平均盐度。

2.2 潮流/余流场特征

外海潮流进入口门后, 受地形的限制, 基本上表现为往复流或接近往复流, 涨潮时指向河道内, 落潮时指向口门外。涨潮时 M1、M2 站的流向基本在 300°—330°之间, 落潮时在 150°左右; H1 站涨潮时流向在 315°左右, 落潮时在 135°左右; H2 站由于距离横门口较远, 受虎门和蕉门的径流作用较大, 涨潮流向在 330°—0°之间, 落潮在 150°—170°之间, 小潮时站位调整靠近横门口, 流向亦有所调整, 涨潮在 330°左右, 落潮在 150°左右。

受径流的顶托作用, 各测站的表层落潮流速均大于涨潮流速。大潮期间各站涨潮时表层平均流速在 15—45 cm·s⁻¹ 之间, 落潮平均流速 35—55 cm·s⁻¹, M2 站最大流速可达到 1.7 m·s⁻¹; 从表层到底层, 流速逐渐降低, 底层涨、落潮平均流速分别为 15—25 cm·s⁻¹ 和 20—30 cm·s⁻¹。小潮时流速比大潮期减小, 表层涨、落潮平均流速在 10—35 cm·s⁻¹ 和 15—

45 cm·s⁻¹ 之间, 底层则分别为 11—17 cm·s⁻¹ 和 8—13 cm·s⁻¹, 底层涨潮流速大于落潮时流速。从空间上看, 从口门向上游流速明显减弱。无论大、小潮, 各站的涨潮历时都长于落潮历时。

余流是扣除周期性潮流之后的非周期性流的总称。由于珠江口的潮汐类型主要为不规则半日混合潮, 在此对一个全日潮周期(约 25h)的流平均后进行简单计算。余流显示典型的重力环流现象, 磨刀门两个测站(M1、M2)的表层余流在大、小潮时均沿河道指向下游, 余流流速在小潮时均为约 27 cm·s⁻¹, 大潮时分别为 14.3 和 23 cm·s⁻¹; 大潮时 M1、M2 的中层余流方向不变, 流速迅速降低至表层的 1/2 左右, 小潮时两站余流方向发生偏转, 指向上游河道, M1 站流速很低, 仅为 2.2 cm·s⁻¹, 但 M2 站流速可达到 22 cm·s⁻¹; 底层余流除大潮时河道站仍受径流影响方向指向口外, 其余均转向西北偏北方向指向河道的方向, M1 站余流流速较小, M2 站较大(图 3)。

横门水道—内伶仃洋的两个定点站, H1 站受潮流影响较小, 无论大小潮时表、中、底层余流方向均沿河道方向由上游指向口门, 流速由表及底逐渐减弱, 大潮时由表层的 $19.4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 减弱至底层的 $11.7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 小

潮时流速比大潮时低, 不超过 $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; H2 站表层余流偏向东南, 大潮时流速约 $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 小潮时增加到 $28 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 中层由于水深过浅没有测量, 底层余流转向西北方向, 只有 $4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。

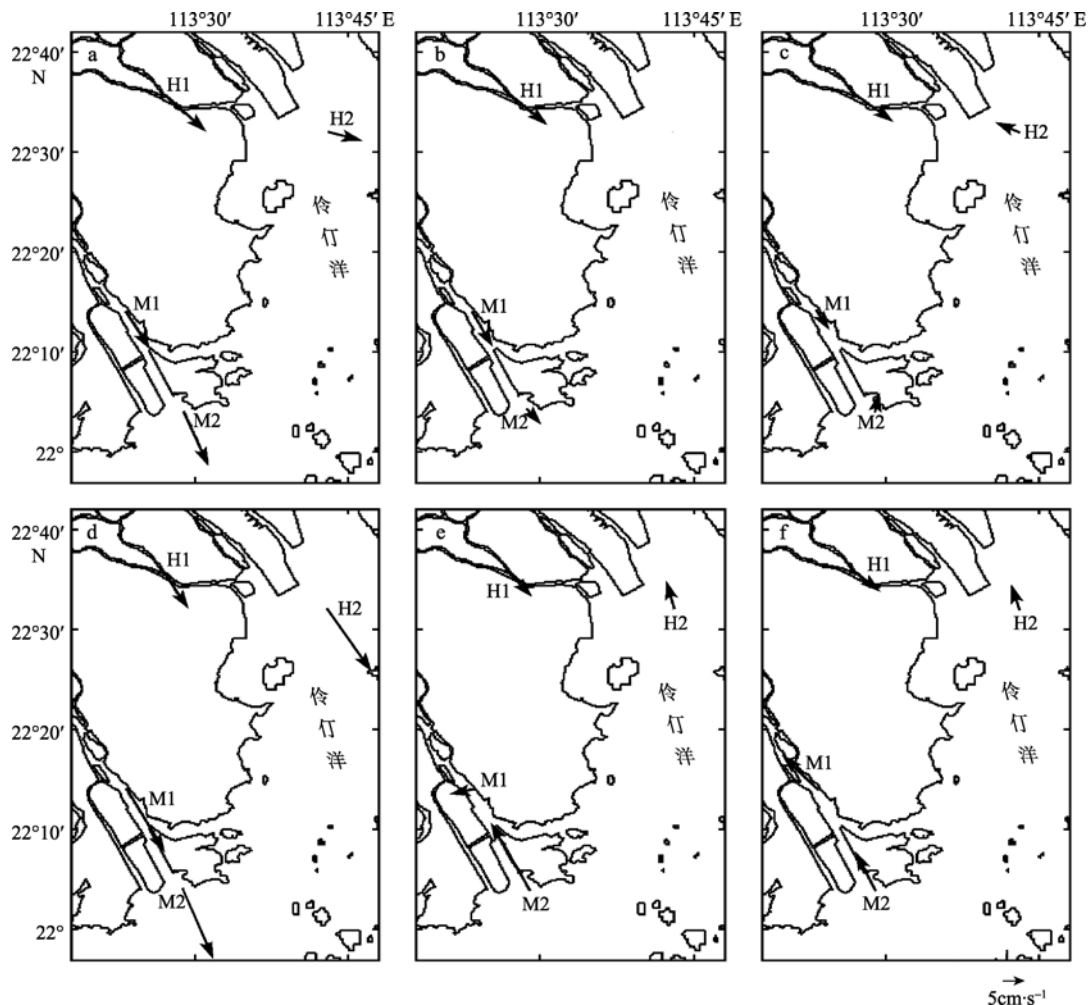


图 3 定点站 M1、M2、H1、H2 的余流

a. 大潮时表层; b. 大潮时中层; c. 大潮时底层; d. 小潮时表层; e. 小潮时中层; f. 小潮时底层
Fig. 3 Residual flow during spring and neap tides at stations M1, M2, H1, and H2

3 讨论

珠江三角洲的水系由三江(西、北、东江)汇流、八口入海组成, 径、潮流条件复杂, 在不同的口门水道、不同的时间, 径流和潮流有不同的作用强度^[10]。伶仃洋湾顶的西部和北部有四大口门淡水注入, 表层盐度呈西北-东南向朝湾口逐渐升高, 在夏季能冲出河口区形成一个向外海延伸的冲淡水舌; 但在冬季径流量骤减, 底层密度大的南海高盐水沿海底向陆做补偿运动, 并沿中、东两条深槽向上游入侵, 咸水可以沿虎门上溯到很远的距离。西侧由于径流的顶托, 盐水入侵距离短^[11-12]; 另一方面西部浅滩区大而浅, 对潮的上溯起阻滞作用, 使盐水界的季节

移动范围较小, 这也是横门水道没有监测到咸潮入侵的原因。

同样在枯水期盐水会随潮流从外海进入磨刀门并向上游入侵, 但本次观测期间连续站和走航观测均呈现小潮期间咸水入侵强度强于大潮时的现象(图 2、表 1)。由于影响咸潮入侵的动力条件包括经口门水道下泄的珠江径流、外海进入的潮流和风等因素, 根据动力条件进行分析, 该现象的发生可能有如下几个原因。

3.1 径流

径流是影响咸潮上溯距离的最直接因素, 它直接阻碍了潮波向上游的传播。从年际变化的尺度来说, 上游流量与测站的盐度呈反相关关系, 即上游

流量小时,测站盐度增大^[13]。本次观测大潮期来临之时,西江、北江的高要、石角水文站流量出现一次峰值,在25日两站日均流量都达到了本月最大值,是两江12月份平均流量的1.43倍;而后流量逐渐降低,在30号左右降低了近30%(图4)。西江和北江的径流量占珠江年总径流量的85%左右,分别注入八大口门;东江占7%,注入虎门^[14]。根据最近的珠江八大出海口水量分配比研究,磨刀门水道的分配比约为28.6%,横门水道约为16.1%,虎门水道的约为14.8%^[15],因此横门水道和虎门水道受西江和北江水量增减的影响比磨刀门水道小得多。虽然并不清楚占虎门近半出海水量的东江流量是否同样发生激增,但可以从增水原因上分析。西江和北江径流量大增的原因可能有两个:一是由国家防汛抗旱总

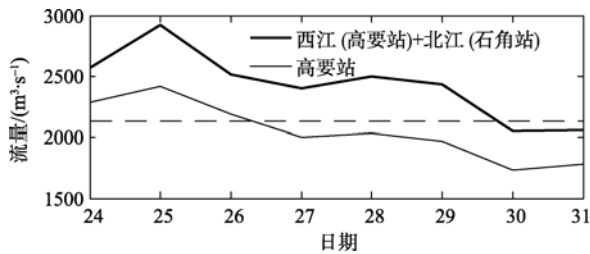


图4 2007年12月份西江和北江日均流量

虚线为12月平均流量

Fig. 4 Total discharge of Xi River and Bei River during December 2007

指挥部实施的压咸补淡措施^[16];二是降水——大潮观测期前23日左右粤西北经历了一场较大的降雨,据地面站观测资料,西江上游最大日降雨量达到91mm。而东江流域既不属于跨省调水的调度范围,在观测前期也没有明显的降雨过程。如果假设东江水量没有较大的波动,则在本次调查期间径流量的增加对大潮期盐水入侵磨刀门水道的压制作用最大。

3.2 风

本次观测的小潮期间,珠江口受冷空气入侵。根据广东省水文局水雨情自动测报系统显示,大潮期南沙站的平均风速为 $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,小潮期为 $2.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速仅为 $4.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风对东四口门的咸水上溯过程影响并不大;但在磨刀门,大潮期间的平均风速为 $2.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,小潮期间平均风速增至 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速可达到 $10.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5)。风向为东北偏北风,对落潮时的余流有明显的推动作用,对涨潮流有削弱作用。虽然风速与表层流速并没有显著的相关关系,但在径流减弱的情况下小潮期表层的余流流速大于大潮期,应与风的作用有关;沿河道吹向下游方向的风推动了上层河水的下泄,下层密度大的海流加速向河道上游做补偿运动,表现为中、底层的余流转向且流速增加(图4),密度环流增强,进一步加强了盐水的入侵。不同方向的局地风对河口水体输送的作用曾通过模拟得到证实^[4]。

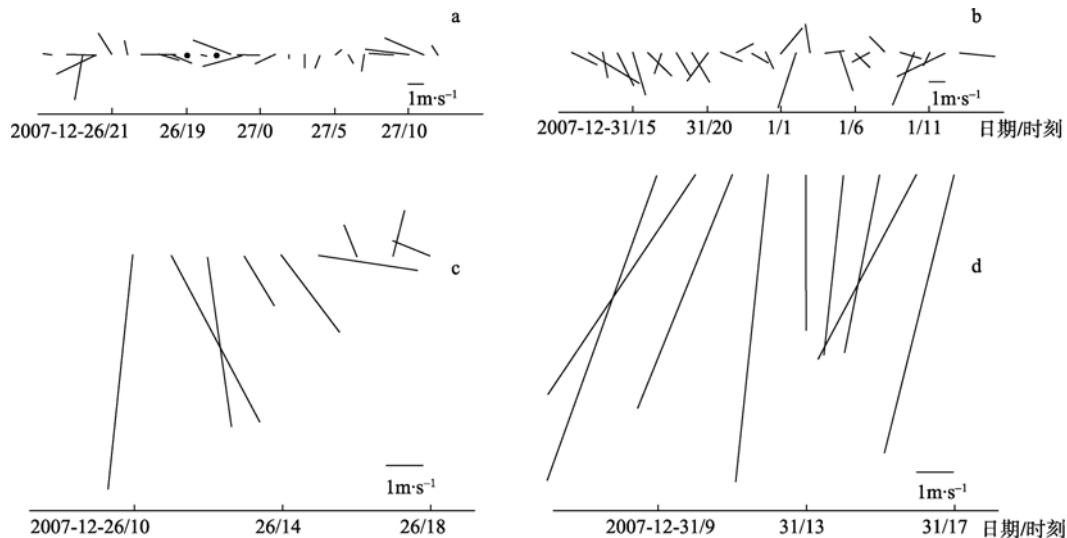


图5 走航观测期间风的时间序列

a. 虎门南沙站大潮时; b. 南沙站小潮时; c. 磨刀门大横琴站大潮时; d. 大横琴站小潮时

Fig. 5 Wind vectors at Nansha and Dahengqin during spring tide and neap tide.

3.3 潮汐动力

枯水期径流锐减,潮汐动力加强并控制网河区,呈现潮强径弱的局面。无论大、小潮时各站的盐度都呈现出明显的潮周期变化。大潮期定点站的盐度随时间变化的等值线几成垂直,潮汐混合达到表层;

与大潮期相比,小潮期的盐度等值线大致呈平行分布,垂向混合减弱,仅发生在水体的中、下层,层化趋势加强(图6)。根据 Hansen 和 Rattray 提出的分层参数 N 来分析磨刀门、横门和虎门水道的咸淡水混合情况。分层参数的定义是:

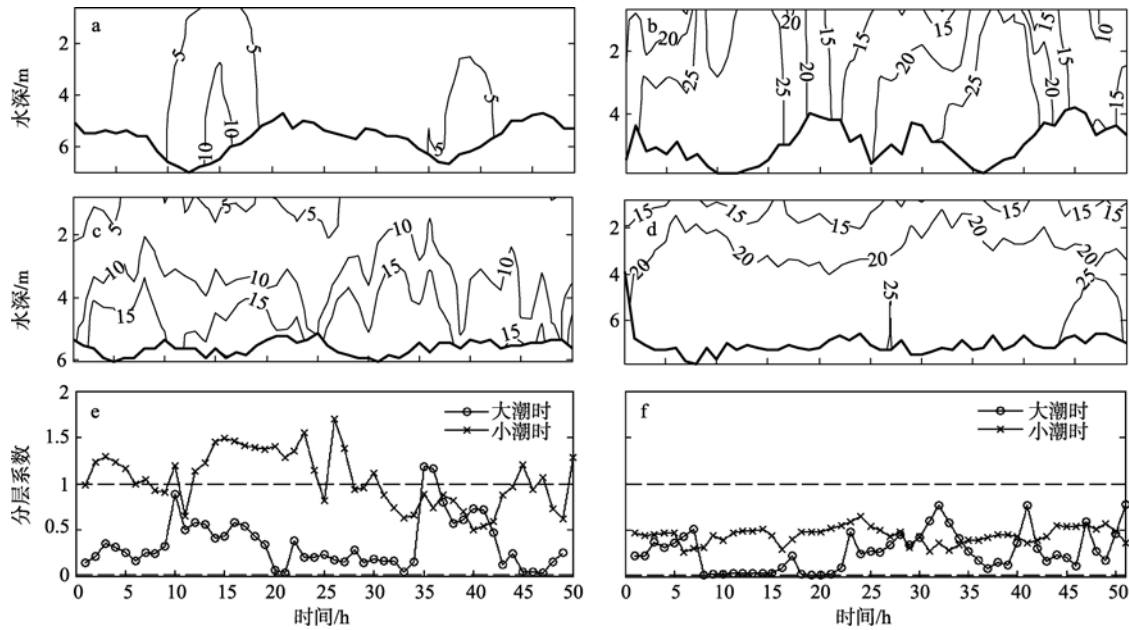


图 6 M1 站(左)和 M2 站(右)盐度与分层系数的时间序列

a、b 为大潮时; c、d 为小潮时; e、f 为分层系数

Fig. 6 Time series of salinity during spring tide (a, b) and neap tide (c, d), and time series of stratification factor at Station M1 (e) and Station M2 (f)

$$N = \delta S / S_0$$

其中 δS 为表、底层盐度差, S_0 为垂线平均盐度。当 $N > 1$ 时河口为高低分层型, $0.01 < N < 1$ 时为缓混合型, $N < 0.01$ 时为强混合型^[17]。根据计算, 各站在小潮期的分层系数均显著大于大潮期, 其中以磨刀门水道观测点 M1 最为显著。H1、H2、M2 站以及 L1、L2 走航各站位在大、小潮时分层系数均在 0.01—1 内, 属缓混合型; 而小潮时 M1 站大部分观测时段以及 L3 走航站位盐水楔部分(22.23°—22.4°N)分层系数数值都超过了 1, 呈高度分层型。密度差异的增大使斜压梯度力进一步增强, 所形成的垂向环流加剧了底层咸水对磨刀门水道的入侵。因此, 磨刀门大、小潮间的动力形态转化也可能影响了盐水入侵的程度, 即小潮期重力环流的增强可能使盐水楔上溯更远的距离。

在磨刀门观测到的小潮时咸潮入侵比大潮时更强的现象虽然明显与径流量和天气状况的变化有关, 但并不属于特例。吕爱琴等^[7]曾指出, 根据实测资料统计, 磨刀门水道最大咸度一般出现在初一、十五前 1—3 天; 2003 年 12 月的水文观测也显示在磨刀门主干的一个定点观测站中潮时底层平均盐度大于大潮时^[14]。因此, 枯季磨刀门的盐水入侵可能有更复杂的动力机制。

4 结论

2007/2008 年冬季由于大旱, 珠江三角洲爆发了严重的咸潮。根据强化观测结果分析, 得出结论如下。

2007 年底—2008 年初珠江三角洲的咸潮活动强烈, 外海盐水沿虎门水道和磨刀门水道上溯了约 35—45km, 影响范围达到广州地区和珠海各水厂。横门水道基本上没有受到影响。

在这次咸潮的入侵过程中, 地形、径流、潮汐和风等因素均有一定影响。径流量的增加会压制咸水的上溯; 沿河道指向下游的风有利于密度环流的增强, 潮汐混合的减弱增强了压强梯度力, 后两者促使了外海水向口门的运动。观测期间各影响因素对各个口门的作用强度不一, 使各口门咸潮入侵的强度和ación 不一致: 虎门水道、横门水道大潮时咸潮入侵较强, 磨刀门水道小潮时咸潮较强。

对于咸潮入侵的强度和范围对径流量增减的响应、局地风对流场影响的阈值、潮汐混合对河口动力过程的改变以及磨刀门有别于其他口门的咸潮活动过程和动力机制, 无法通过有限的观测做出定量的评价, 尚需要通过模拟实验进行进一步的探讨。

参考文献

- [1] 朱建荣, 刘新成, 沈焕庭, 等. 1996年3月长江口水文观测和分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2003, 4: 87-93.
- [2] UNCLES R J, STEPHENS J A. Salt intrusion in the Tweed Estuary. *Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science*, 1996, 43: 271-293.
- [3] LIU W C, CHEN W B, CHENG R T, et al. Modeling the influence of river discharge on salt intrusion and residual circulation in Danshuei River estuary[J]. *Taiwan. Continental Shelf Research*, 2007, 27: 900-321.
- [4] XU H Z, LIN J, WANG D X. Numerical study on salinity stratification in the Pamlico River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80: 74-84.
- [5] 王津, 陈南, 姚泊. 珠江三角洲咸潮影响因子及综合防治综述[J]. 广东水利水电, 2006, 4: 4-8.
- [6] 莫思平, 李越, 卢素兰. 广州水道咸潮影响因素分析[J]. 水利水运工程学报, 2007, 4: 36-42.
- [7] 吕爱琴, 杜文印. 磨刀门水道咸潮上溯成因分析[J]. 广东水利水电, 2006, 5: 50-53.
- [8] 钟欣. 湘赣桂现 50 年一遇特大干旱. 南方日报, 2007-12-15(A03).
- [9] MAO Q W, SHI P, YIN K D, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 1797-1808.
- [10] 黄镇国, 张伟强. 珠江河口近期演变与滩涂资源[J]. 热带地理, 2004, 24(2): 97-102.
- [11] DONG L, SU J, WONG L, et al. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 1761-1777.
- [12] WONG L A, CHEN J C, XUE H, et al. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C5): 3156.
- [13] 胥加仕, 罗承平. 近年来珠江三角洲咸潮活动特点及重点研究领域探讨[J]. 人民珠江, 2005, 2: 21-23
- [14] 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 等. 珠江三角洲网河河床演变[M]. 广州: 中山大学出版社, 2002: 30-32
- [15] 姚章民. 对珠江三角洲主要河道水量分配比变化的认识[EB/OL]. http://www.pearlwater.gov.cn/zjls/t20071107_22029.htm.
- [16] 水利部珠江水利委员会. 2007—2008年度枯水期珠江水量统一调度专题[EB/OL]. <http://www.pearlwater.gov.cn/ztzl/slttydd/index.htm>.
- [17] 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.