广州水道咸潮影响因素分析

莫思平[1]，李 越[2]，卢素兰[2]

（1. 南京水利科学研究院，水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京 210029；2. 珠江水利科学研究院，广东 广州 510610）

摘要：根据实测资料分析了广州水道的咸潮变化规律及其主要影响因素.根据盐度数学模型计算了地形、海平面、风况和流量分配方式4种因素对咸潮的影响程度,结果表明,年内流量分配方式对咸界的影响最明显,其次是地形和风况的变化,海平面抬升对咸潮影响相对较小.

关 键 词：咸潮；地形；海平面抬升；风况；径流；盐度数学模型；广州水道
中图分类号：P731.12-34 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-640X(2007)04-0036-07

Analysis of factors affecting saline water intrusion in Guangzhou waterway

MO Si-ping[1], LI Yue[2], LU Su-lan[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*; 2. *Pearl River Research Institute, Guangzhou* 510610, *China*)

Abstract: Based on field data, this paper analyzes the impact of saline water intrusion on Guangzhou waterway and identifies the dominant factors determining the variation of saline water tide. Furthermore, by the use of salinity mathematical model, the degree of effects of four factors, i. e., terrain, sea level, wind regime and flow rate distribution on saline water tide variation, is presented respectively. Among these factors, flow rate distribution has significant effects on the saline water boundary, terrain and wind regime have less significant effects on it, and the sea level can affect the saline water tide weakly.

Key words: saline water intrusion; terrain; sea level; wind regime; runoff; salinity mathematical model; Guangzhou waterway

珠江三角洲河涌交错,水网相连,大小河道324条,河道总长约1 600 km,网河密度0.81～0.88 km/km^2,是世界上网河密度最大最复杂的三角洲之一(见图1).珠江三角洲网河年均承泄西江、北江和东江径流量3 004亿m^3,谭江等其他河流的径流量256亿m^3,其中流经广州地区的径流量约1 141亿m^3.珠江口为弱潮河口,潮差较小,但由于河宽、水深较大,纳潮容积大.珠江是我国七大江河中含沙量最小的河流,多年平均含沙量0.27kg/m^3,全流域多年平均输沙量约为8 870万t.统计表明,珠江三角洲年均输沙量自20世纪90年代以来呈现较为明显的下降趋势[1].这主要是流域上游水土保持、西江、北江干流已建成多座

收稿日期：2007-05-08
作者简介：莫思平(1960-),男,广西梧州人,高级工程师,主要从事河流动力学研究. E-mail：spmo@nhri.cn

水利枢纽、网河内水道出现大规模人工采沙的结果. 水体含沙量低于挟沙能力将引起河床冲刷，加上人工采沙，导致河口地区河床大幅下切，河道纳潮量增加，从而加剧河道内咸潮的影响.

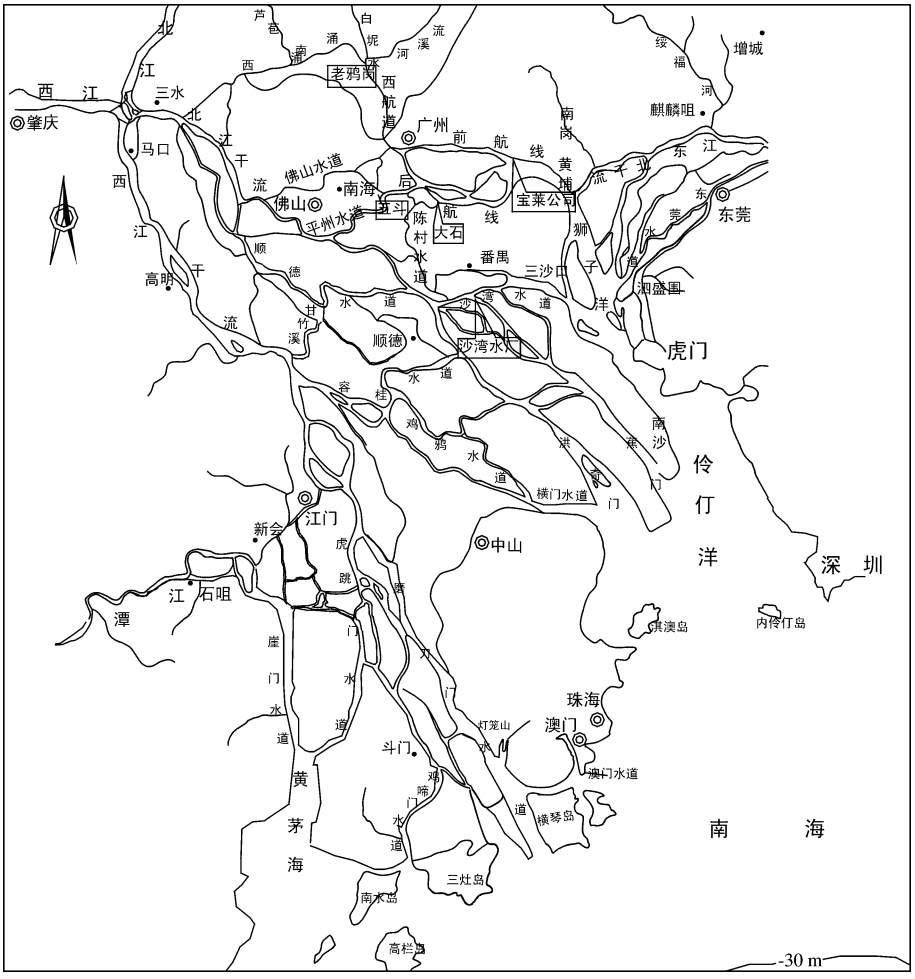


图 1　珠江三角洲水道图

Fig. 1　Pearl River estuary map

广州水道包括西航道、前航道、后航道、黄埔水道等. 本文研究范围除上述水道外，还包括虎门、蕉门、洪奇沥、横门及伶仃洋海域的一部分(见图 1).

所谓咸潮，即含氯度大于河水含氯度并随潮流涨落进退于河口区的潮水，它是高矿化度的海水因引潮力作用而倒灌进入河道与河水相混合的结果. 珠江三角洲地区发生较严重咸潮的年份是 1955、1960、1963、1970、1977、1989、1993、1999 及 2004 ~ 2006 年. 20 世纪 80 年代以前，珠江三角洲受咸潮危害最突出的是农业；随着经济的发展，咸潮逐渐影响工业生产和生活饮水. 当河道水体含氯度超过 250 mg/L(0. 25‰)时，就不能满足供水水质标准，影响城镇生活供水. 近十几年来，珠江三角洲地区咸潮持续时间增长、上溯影响范围趋大、强度趋于严重[2].

1　咸潮演变及其影响因素分析

以多年月平均最大的含氯度 0. 25‰的分布界线为常年咸水入侵界线，以历年最大含氯度 0. 25‰为大旱年咸水入侵界线. 据有关文献统计[3]，近十几年来，平水年时，南海大陆架高盐水团入侵至伶仃洋内伶仃岛附近、磨刀门、鸡啼门外海区和黄茅海湾口；含氯度 1‰的咸水入侵至虎门大虎、南沙等地；含氯度 0. 25‰的咸潮界线在虎门东江北干流出口、磨刀门水道灯笼山等地. 大旱年份含氯度 1‰ 的咸水入侵到虎门黄埔以上、沙湾水道下段等地；含氯度 0. 25‰的咸潮线可达西航道、沙湾水道的三善滘等地. 与平水年相比，含氯度

为 0.25‰的咸潮界大旱年时上移约 13 km,常年咸水界上溯约 4 km.

广州市处于珠江三角洲网河内,上游外围受西、北江及东江影响,下游受伶仃洋潮汐控制,水体含氯度影响因素多,在同一水道或同一断面,水体含氯度也会因季节(上游来水多寡)、潮别(涨或落)、时程(潮涨潮退过程)、河道与口门地形变化、海平面上升及风向风力等因素而改变. 它不但与潮流运动规律密切联系,也有其自身的特殊性,使得该区域的咸潮活动规律十分复杂.

1.1 上游径流量影响

径流是影响咸潮上溯距离最直接的因素. 在上游来水较少的枯水年份的枯水季节(10 月至翌年的 3 月)咸潮上溯相对严重. 实测资料表明,注入伶仃洋的径流具有明显的季节性,即上游径流量减小,盐度增大. 枯季各月平均含氯度虎门(泗盛围)为 1.87‰ ~ 5.52‰,口门以下赤湾为 15‰ ~ 17‰. 近年来,随着经济的迅速发展,珠江三角洲上游地区用水量增加,导致上游来水量减少,加剧了三角洲河口区的咸潮上溯.

1.2 河口及河道地形变化影响

自 20 世纪 90 年代以来,河道挖沙、河道治理等人类活动不断加剧,使得珠江三角洲及河口地区的河床普遍下切,主潮汐通道的深槽加深. 对比 2005 年与 1999 年河道地形,西江干流平均下切 2.0 m,北江干流平均下切 1.5 m. 珠江三角洲网河水道下切、河口与口外浅海区深槽加深[4],使得珠江河口及三角洲地区的潮汐通道更加畅通,有利于咸水上溯,加重了咸潮影响. 从动力上分析,由于盐度水平变化产生的斜压压强梯度力与水深成正比,河槽浚深会增加梯度力,这也是加大咸潮影响程度的另一个重要原因.

1.3 海平面上升及风的影响

珠江河口区底坡较平缓,随海平面上升,咸潮入侵可能增强,影响生活用水、灌溉及水产业用水等. 风对咸潮活动也会产生较大的影响. 不同的风向和风力直接影响咸潮的推进速度,若风向与海潮的方向一致可以加快其推进速度,扩大其影响范围.

2 盐度模型的建立及验证

珠江三角洲一、二维潮流含氯度耦合数学模型基本方程包括一、二维水流连续方程、水流运动方程和氯度输移扩散方程. 模拟范围:上边界为马口、三水、博罗、麒麟咀、西南闸、新街水、石咀等,下边界尽可能在径流影响范围之外,取外海等深线-30 m 左右处(见图 1). 以八大口门作为网河区一维和河口区及浅海区二维的搭接节点,运用一、二维联解的方法进行计算. 数模地形资料主要采用网河区 1999 年的珠江三角洲 1∶5 000的河道水下地形图,大部分河口采用 2000 年的珠江河口 1∶10 000 的水下地形图. 本次计算采用 2003 ~2005 年的地形资料及 2006 年实测西江干流水道、北江干流水道的大断面资料对网河水道地形进行更新(下称现状地形),并用 2005 年枯季实测长系列(2005 年 1 月 18 日 ~2 月 4 日)水文条件(下称“2005.1”)对模型参数进行复核及调整.

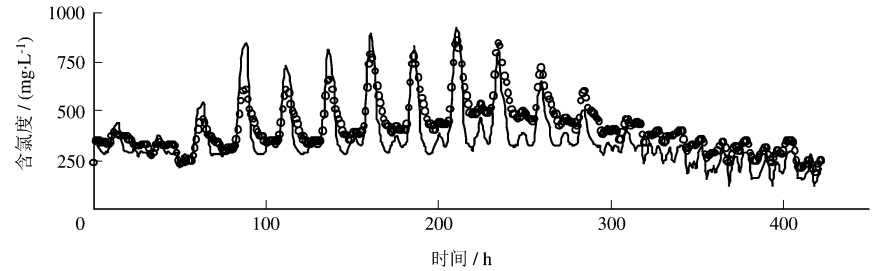
一维数值模拟中的水流连续方程和运动方程的离散采用 Preissmann 四点偏心隐式差分格式,此方法的优点是计算稳定、精度高. 珠江口浅海区属海湾形浅海区,三面有陆地,平面形状呈喇叭型,湾内有众多小岛,形状复杂,布置矩形网格会带来大量的废网格,网格节点数量巨大,并且较难准确拟合模型的陆地边界. 因此,二维数值模拟采用曲线网格模拟,利用坐标变换技术将计算区域变换成新坐标系下的规则区域,同时借助 ADI 法离散基本方程. 基本方程组离散格式的求解采用追赶法. 采用泊松方程生成网格,离散区域网格约为 480×759 个. 在外海区最大网格尺寸为 8 085 m×352 m,最小网格尺寸为 16 m×56 m. 一、二维水流水质联解,在连接处满足:①水位相等;②流量相等;③水质浓度相等. 在同一 Δt 内,先二维计算,然后一维计算.

咸潮上溯的危害主要集中于枯水期,因此,对水动力、含氯度模型的验证选择枯水水文组合. 水动力模型验证包括水位和流量,氯度验证断面主要是网河区同步测验的受咸潮影响的下游大断面及部分水厂. 一、二维水动力和氯度数模与“2005.1”水文条件的验证对比结果表明,计算的潮位过程相位、数值与实测值吻合较好,误差多在 0.10 m 以下;流量的相位及量值与实测值基本吻合,涨、落平均误差低于±10%(见表 1);含氯度变化过程与原型的形态、相位和幅度基本一致(见表 1 和图 2)[2].

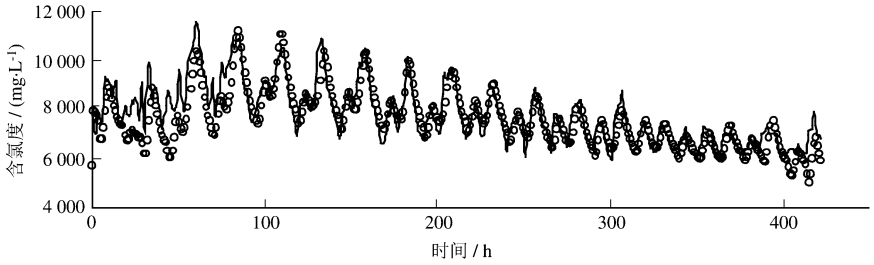
表 1　部分站点流量和含氯度特征值验证

Tab. 1　Comparison between field data and calculated values of discharge and salinity

站　位	流量/（$m^3 \cdot s^{-1}$）						含氯度/（‰）					
	落平均			涨平均			最　高			最　低		
	实　测	计　算	偏差/（%）	实　测	计　算	偏差/（%）	实　测	计　算	偏　差	实　测	计　算	偏　差
浮标厂	730	763	4.6	796	851	6.9	11.60	11.20	−0.40	5.950	5.080	−0.87
黄埔右	1 573	1 575	0.1	1 653	1 627	−1.5	0.92	0.86	−0.06	0.122	0.190	0.068
泗盛围	1 906	1 804	−5.3	2 156	1 881	−12	6.00	5.70	−0.30	1.860	1.570	−0.29
三善滘	1 303	1 232	−5.4	1 106	1 010	−8.7	0.23	0.25	0.02	0.012	0.010	−0.002



（a）　浮标厂（2005-01-18　9:00 ~ 02-04　23：00）



（b）　泗盛围（2005-01-18　9:00 ~ 02-04　23：00）

图 2　浮标厂和泗盛围站含氯度过程验证

Fig. 2　Comparison of salinity hydrograph at Fubiaochang and Sishengwei station

河口是咸淡水交汇地区，水流情况复杂. 由于咸、淡水存在密度差，口门局部地区会出现盐水楔[5]，其盐度垂线分布常具有三维特征. 虽然对口门区咸潮入侵进行的概化处理会对计算结果有一定影响，但验证结果说明本研究采用一维、二维联合求解的模式是可行的.

3　计算成果分析

3.1　河床挖深对咸潮的影响

根据各水道历史变化趋势，对现状地形继续挖深以研究其对咸潮的影响. 东江和广州水道第一次挖深拟定为 0.7 m，第二次挖深为 1.5 ~ 2.0 m；北江和西江第一次挖深拟定为 1.34 m，第二次挖深为 3 ~ 4 m. 计算结果见表 2，从表 2 可见，流溪河、白坭河、西南涌、佛山水道、平洲水道、陈村水道随着地形不断下切，咸界上溯明显；而沙湾水道在第一次挖深时咸界下移，第二次挖深时咸界略有上溯. 这是由于地形变化改变了河道分流比，从而影响潮界和咸界的上溯和下移.

计算分析表明，随着水道的加深，除了磨刀门的山潮比不断增加外，其余 7 个口门的山潮比不断减小，研究时段内随着水道挖深，各水厂及站点的咸潮超标时间逐渐增加（见表 3）（时段为半月潮，360 h）；最高和最低含氯度值也不断增加. 距离河口越近，受潮汐动力影响越大，且上游径流动力较小时，盐度累积较多；西航道、前后航道、黄埔水道及沙湾水道中下段的主要水厂（图 1）和站点含氯度超过 0.25‰累计时间相对较长，而且最高和最低含氯度也相对较高.

表 2 不同河床挖深咸界上溯距离

Tab. 2 Variation of saline water boundary with different channel deepening （单位：m）

河 道	1999 年地形	第一次地形挖深	第二次地形挖深	河 道	1999 年地形	第一次地形挖深	第二次地形挖深
流 溪 河	-303	-265	-662	平洲水道	-505	-971	-2 958
白 坭 河	-228	-229	-494	陈村水道	-146	-1 603	-2 350
西 南 涌	-438	-668	-8 411	沙湾水道	2 945	237	-31
佛山水道	-2 471	-3 127	-6 675				

注：负值表示咸界上溯，正值为下移

表 3 不同地形情况下主要水厂及站点咸潮累计超标时间

Tab. 3 Over standard salinity duration with various terrains （单位：h）

位 置	1999 年地形	现 状地 形	第一次地形挖深	第二次地形挖深	位 置	1999 年地形	现 状地 形	第一次地形挖深	第二次地形挖深
老鸦岗	39	36	42	46	宝莱取水点	360	360	360	360
五 斗	169	143	177	212	沙湾水厂	0	15	13	15
大 石	360	360	360	360					

3.2 海平面抬升对咸潮的影响

根据有关研究成果，估计 2010 规划水平年的海平面上升 0.05 m，2020 年上升 0.10 m[6]. 将模型验证时段内的半月潮潮位分别抬高 0.05 和 0.10 m 作为二维模型两种工况的下边界，上边界采用与下边界对应时段的流量过程，河道地形条件与现状地形相同. 统计海平面抬升情况下广州市主要水厂及站点氯度超标（含氯度超过 0.25‰）时间（见表 4）结果表明，现状水平年、2010 规划年、2020 规划年的咸潮超标时间变化不大（时段为 360 h）；含氯度超标时间较长的依然为广州水道的水厂及主要站点，沙湾水道中上段及老鸦岗以上河段受咸潮影响较小. 随着海平面的抬升，山潮比逐渐变小，潮界上移，咸潮上溯，如西航道、前后航道、白坭河、沙湾水道等河道含氯度受涨潮动力影响较大；在佛山水道、平洲水道、陈村水道等河道，受上游分流比变化影响，潮界下移，咸界下移（见表 5）.

表 4 海平面抬升情况下部分水厂及站点咸潮累计超标时间

Tab. 4 Over standard salinity duration in the case of rising sea level （单位：h）

位 置	现状水平年	2010 规划年	2020 规划年	位 置	现状水平年	2010 规划年	2020 规划年
老 鸦 岗	36	36	38	宝莱取水点	360	360	360
五 斗	143	135	140	沙湾水厂	15	15	15
大 石	360	360	360				

表 5 海平面上升主要水道咸界上溯距离

Tab. 5 Variation of saline water boundary due to rising sea level （单位：m）

河 道	2010 年	2020 年	河 道	2010 年	2020 年
流 溪 河	-60	-95	平洲水道	250	98
白 坭 河	-79	-292	陈村水道	95	74
西 南 涌	-220	-227	沙湾水道	-3	-298
佛山水道	1 526	1 483			

注：负值表示咸界上溯，正值为咸界下移

3.3 风对咸潮的影响

枯季伶仃洋的常风向为 N 向，次常风向为 NE、E、SE、ESE 向等. 据此，本文选择 N 向风（多年平均风速为 9.4 m/s）、NE 向风（多年平均风速为 5.9 m/s）、E 向风（多年平均风速 7.5 m/s）、SE 向风（多年平均风速 4.0 m/s）4 种风况. 计算结果表明，在 E、SE、NE、N 向风作用下，广州水道的咸界都是下移的. 流溪河、西南涌、佛山水道、平洲水道、陈村水道在 E 向风时咸界下移较其他风向大；白坭河在 N 向风时咸界下移较大；佛山水道在各风向时咸界下移都较大；4 种风况中，SE 向风在各水道的咸界下移距离较小（见表 6）. 总的来说，

不同风况下各水道的咸界变化规律与其潮界变化规律一致.

表 6　不同风向的咸界上溯距离

Tab. 6　Variation of saline water boundary with various wind directions　（单位：m）

风　况	E	SE	NE	N	风　况	E	SE	NE	N
流溪河	2 018	109	1 513	1 557	平洲水道	4 537	947	3 399	3 090
白坭河	227	201	2 113	2 195	陈村水道	2 099	359	1 942	1 772
西南涌	2 198	51	1 852	1 979	沙湾水道	1 103	505	1 920	1 872
佛山水道	16 156	5 099	12 113	11 554					

注：负值表示咸界上溯，正值为咸界下移.

3.4　上游流量分配对咸潮的影响

利用已建立的珠江口一、二维联解水动力和含氯度模型，在上边界拟定了 3 种西、北江流量分配方案，以三水和马口为主进行流量分配的调整，①由于 1988 年三水和马口年平均流量相对平水年偏枯，将其年内每时刻流量修正到平水年，称平水年；②将三水、马口水平年流量统一削减 20%，使其年平均流量相对平水年较枯，称枯水年；③考虑到将来西、北江上游各水库的联合调度功能，根据上游已建成和拟建水库的调蓄能力，将马口、三水平水年的 4 ~ 9 月份的流量削减一部分到 10 ~ 3 月中，使其流量均化、简单模拟水库联合调度时咸潮的变化趋势，称流量均化. 三水和马口相应的枯季流量见表 7.

表 7　不同典型年流量分配方式 1 ~ 3 月各月平均流量

Tab. 7　Average discharge per month for Jan ~ Mar based on flow rate distribution scheme in typical year（单位：m^3/s）

水 文 站	平 水 年			流量均化			枯 水 年		
	1 月	2 月	3 月	1 月	2 月	3 月	1 月	2 月	3 月
三　水	236	302	688	249	319	727	174	222	506
马　口	2 295	2 516	4 407	2 973	3 259	5 707	1 591	1 744	3 055

计算结果（见表 8）表明，流量均化时广州水道咸界均下移，佛山水道、平洲水道、陈村水道和顺德水道咸界下移相对明显，西南涌、白坭河、流溪河及沙湾水道的紫坭河咸界下移相对较小，主要是由于佛山水道等水域受西、北江径流变化的影响较大，而西航道等河道主要受其下游前、后航道径潮动力变化的影响，因此改变较小；枯水年时三水、马口的径流量较平水年减少幅度相对较大，咸界上溯明显，尤其是佛山水道、平洲水道、陈村水道和沙湾水道，陈村水道的咸界已上溯至潭州水道，沙湾水道的咸界也已经上溯到顺德水道. 各工况下枯季 1 ~ 3 月份，在广州市区水厂和站点以及沙湾水道的中下段含氯度超过 0.25‰累计时间较长，尤其是枯水年，流量均化后，含氯度有所减小，但枯季依然有一半时间含氯度超标（见表 9，1 ~ 3 月份，2 160 h）.

表 8　不同典型年流量分配与平水年比较咸界上溯距离

Tab. 8　Relation of variation in saline water boundary and flow rate distribution in normal raining year　（单位：m）

工　况	西 南 涌	白 坭 河	流 溪 河	佛山水道	平洲水道	陈村水道	潭洲水道	顺德水道	紫 坭 河
流量均化	790	841	1 099	3 164	1 467	2 633		1 887	383
枯 水 年	−1 876	−1 498	−1 184	−15 188	−5 187		−3 082	−3 942	

注：负值表示咸界上溯，正值为咸界下移.

表 9　不同典型年流量分配部分水厂及站点的含氯度累计超标时间

Tab. 9　Over standard salinity duration with different flow rate distributions　（单位：h）

位　置	平 水 年	流量均化	枯 水 年	位　置	平 水 年	流量均化	枯 水 年
老鸦岗	55	49	87	宝莱取水点	1 856	1 656	2 041
五斗	348	174	917	沙湾水厂	94	30	440
大石	1 378	1 128	1 706				

由于珠江口受季风影响，流量具有明显的季节性. 20 世纪 60 ~ 80 年代，洪季（4 ~ 9 月）径流量大（占年径流总量的 79%），潮界下移；1‰浓度盐水一般退出口门以外，仅及伶仃洋的中北部. 本文研究拟定的 3 种

流量分配方式中,平水年洪季的0.25‰含氯度等值线(咸界)达到蕉门的南沙附近;流量均化时的咸界下移至蕉门的凫洲水道附近;枯水年时咸界上溯到虎门和蕉门口门以内. 可见上游流量的分配对咸界有较大影响.

综上,不同因素对咸潮变化的影响也不同. 以佛山水道为例,河床挖深和枯水流量等因素引起的咸界上溯距离分别为4.2 和15.1 km,而海平面上升和E、SE、NE、N 向风作用下咸界则下移,其他水道也有类似的变化规律. 可见上游流量变化是影响咸界最主要的因素.

4 结 语

随着河床的挖深,河道纳潮量增加,潮界上移,导致咸界上移,还可导致河道分流比发生变化,使部分河道潮界和咸界下移;河床挖深,广州水道主要水厂及沿程站点的咸潮超标时间逐渐增加,最高和最低含氯度值有所增加;由于各河道径潮动力的差异,受咸潮影响程度也不同. 海平面抬升0.05 ~0.10m 对广州水道咸潮超标时间的影响不大. 4 种风况中,SE 向风使各水道的咸界下移距离较小,说明SE 向风对咸潮有一定的推动作用;各水道的咸界变化规律与其潮界变化规律一致. 上游不同典型年流量分配方式,年内流量均化使得广州水道相对平水年枯季涨潮量减少,净泄量增加,咸界均下移;枯季广州市区水厂以及沙湾水道的中下段含氯度超标累计时间及各月的含氯度最大连续超标时间都较长,尤其是枯水年和各工况流量较小的1 月份. 这4 种因素中,年内流量分配方式对咸界的影响最明显,其次是地形和风况的变化,海平面抬升对咸潮影响相对较小.

参 考 文 献:

[1] 辛文杰, 莫思平, 应 强. 广州港深水出海航道回淤规律与维护方式研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
[2] 蒋星科, 李 越, 卢素兰. 广州市咸潮影响分析报告[R]. 广州: 珠江水利科学研究院, 2006.
[3] 黄镇国, 陈特固, 范锦春, 等. 广东海平面变化及其影响与对策[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000.
[4] 陆永军, 贾良文, 莫思平, 等. 广东省主要水道低水位趋势研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.
[5] 吴超羽, 贾良文, 任 杰, 等. 磨刀门枯季水文泥沙观测报告[R]. 广州: 中山大学近岸海洋研究中心, 2003.
[6] 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.

第 13 届 国 际 水 会 议

时 间: 2008 年9 月1 日 ~ 4 日
地 点: 法国蒙彼利埃
会议主题:全球性变化与水资源
联 系 人: Organizing Secretariat, Association VERSeau Développement, Domaine de Lavalette-859 rue Jean-Francois Breton, 34093, Montpellier, Cedex 5-France
电 话: + 33 46761 2948
传 真: + 33 46752 2829
E-mail: wwc2008@ msem. univ-montp2. fr
网 址: www. worldwatercongress2008. org