



基于一维盐度模型的 珠江河网咸潮上溯距离分析

官明开¹, 蒋齐嘉², 徐龔文¹, 冯浩川¹, 吴尧¹, 胡煌昊¹

(1. 河海大学, 江苏南京 210098; 2. 四川农业大学, 四川雅安 625014)

摘要: 建立珠江三角洲河网整体一维水动力、盐度数值计算模型, 此模型涵盖了整个珠江三角洲河网区, 验证结果良好。在此模型基础上, 对2001年枯季和2005年枯季珠江三角洲咸潮上溯情况进行模拟计算, 模拟结果表明, 0.5‰盐度线在整个河网区域呈现出向右倾斜的“S”形, 2005年枯季咸潮平均上溯距离达到了32.4 km, 这几乎是2001年枯季的2倍。进一步利用模型模拟4种不同来水情况下的咸潮上溯距离的变化情况, 对4种来水流量下的咸潮上溯距离进行分析, 发现当上游来水平均流量减少将近0.5倍时, 下游8大门口处咸潮上溯平均距离将增加1倍左右。

关键词: 珠江三角洲河网; 一维盐度模型; 上游来水; 咸潮上溯距离

中图分类号: TV 148.4; U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0066-06

Saltwater intrusion lengths in the Pearl River networks based on one-dimension salinity model

GUAN Ming-kai¹, JIANG Qi-jia², XU Yan-wen¹, FENG Hao-chuan¹, WU Yao¹, HU Huang-hao¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: A one-dimension hydrodynamic-salinity mathematical calculation model of the Pearl River networks is established. This model covers the entire river region, and it is verified with good results. Based on this model, analysis of the characteristics of saltwater intrusion in the Pearl River Delta in dry seasons of 2001 and 2005 has been carried out. The result indicates that the simulated 0.5 parts per thousand salinity isohaline in the Pearl River networks displays a shape similar to “S” and slanting to the right. The saltwater intrusion lengths of 2005 intruded far upstream at an average length of 32.4 km, which is almost twice longer than that in 2001. Four representative upstream flows are also simulated to analysis the response of the saltwater intrusion lengths to discharges. The result implies that when upstream average flows reduce by 0.5 times, saltwater intrusion lengths at the eight outlets increase by nearly 1 time.

Keywords: Pearl River network; one-dimension salinity model; upstream flows; saltwater intrusion lengths

近年来, 随着经济社会的发展, 频繁的人类活动使得珠江三角洲的河床断面下切, 增加了河道纳潮容积, 潮汐通道变得更为顺畅, 这是珠江三角洲咸潮灾害加剧的原因之一^[1-3]。全球气候变化导致的海平面上升, 对河口三角洲地区的咸潮

灾害亦起到推波助澜的作用^[4-5]。咸潮上溯多发生在上游来水较少的枯水年份和枯水季节, 当上游来水流量减少时, 下游盐度值增大, 且测站盐度值与上游来水流量呈幂函数关系^[6]。上游径流量的变化会对盐度值及咸潮上溯距离产生比较大的

收稿日期: 2016-04-16

作者简介: 官明开(1991—), 男, 硕士研究生, 从事河口海岸水动力学研究。

影响, 但是并不改变河道咸潮上溯运动的半月周期规律^[7]。珠江三角洲河网密布, 径潮动力十分复杂, 在径潮动力作用下, 当上游流量增加时, 潮差小时咸水界下移距离要大于潮差大时的下移距离^[8]。

针对珠江三角洲咸潮上溯问题, 许多学者做了很多研究工作, 总结得出枯季径流的减少是咸潮上溯加剧的重要原因^[9-11]。本文通过建立珠江三角洲河网整体一维水动力、盐度数值计算模型, 对 2001 年枯季和 2005 年枯季珠江三角洲河网咸潮上溯距离进行分析, 并模拟上游不同来水流量对下游 8 大口门处咸潮上溯距离变化的影响。

1 一维水动力及盐度数值模型的建立

1.1 基本方程

模型的一维水动力模块采用隐式有限差分法来计算河道内及河口的非恒定流, 基本方程采用圣维南方程组^[12]; 盐度模块采用对流扩散方程, 该模块以水动力模块结果为基础, 由水动力模块提供水位、流量、断面面积和水力半径等。

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

对流扩散方程:

$$\frac{\partial (AS)}{\partial t} + \frac{\partial (QS)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial S}{\partial x} \right) = -AKS + S_2 q \quad (3)$$

式中: Q 为过流断面流量 (m^3/s); A 为过流断面面积 (m^2); q 为旁侧入流单宽流量 (m^3/s); g 为重力加速度 (m/s^2); h 为水位 (m); C 为谢才系数; R 为水力半径; α 为动量分布系数; S 为断面盐度; t 为时间坐标; x 为空间坐标; D 为扩散系数 (m^2/s); K 为线性衰减系数 (h^{-1}); S_2 为源 (汇) 的盐度。

1.2 模型的建立

1.2.1 模型范围

模型网格步长在 100~1 000 m 不等, 模型主

要采用 1999 年实测地形数据, 部分河道由于缺失实测地形数据, 采用的是 20 世纪 80 年代的测图数据。模型上游控制边界分别取在石咀 (潭江)、梧州 (西江)、石角 (北江)、老鸦岗 (流溪河) 和博罗 (东江); 模型下边界设定在珠江三角洲下游 8 大口门处: 黄冲、西炮台、黄金、灯笼山、横门、冯马庙、南沙、大虎, 模型范围见图 1。

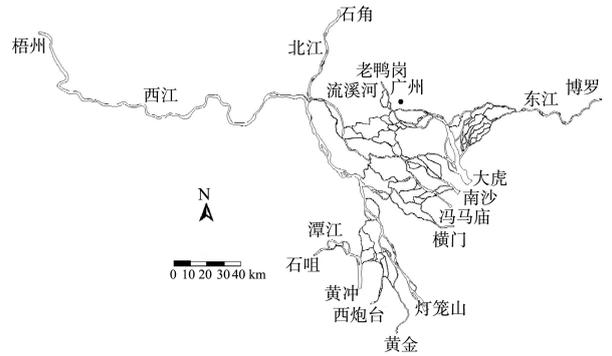


图 1 模型范围

1.2.2 模型参数

模型中用曼宁系数来描述糙率, 珠江河网曼宁系数全局值取 0.02, 具体局部取值见表 1。

表 1 珠江河网主要水道曼宁系数变化值

河道	糙率 n	河道	糙率 n
西江 (高要—百顷头)	0.020~0.028	北江干流 (石角—三水)	0.026~0.045
磨刀门水道	0.016~0.022	东平水道	0.022~0.026
潭江水道	0.020~0.024	顺德水道	0.015~0.025
涯门水道	0.018~0.023	潭州水道	0.025~0.030
虎跳门水道	0.021~0.026	陈村水道	0.020~0.025
鸡啼门水道	0.018~0.025	横门水道	0.018~0.025
容桂水道	0.020~0.030	洪奇沥水道	0.015~0.025
小榄水道	0.020~0.025	蕉门水道	0.020~0.023
鸡鸭水道	0.022~0.026	沙湾水道	0.023~0.025
博罗—石龙	0.025~0.045	倒运海水道	0.025~0.035
东江北干流	0.016~0.036	大汾北水道	0.026~0.032
东莞水道	0.025~0.035	洪屋涡水道	0.018~0.026
中堂水道	0.025~0.035	麻涌水道	0.015~0.025

该模型盐度模块全局扩散系数取 150 m^2/s , 而东江网格更大些, 因此东江狮子洋附近的局部扩散系数取值比西、北江局部的扩散系数大, 为 400~800 m^2/s 。为避免盐度扩散过快, 在河网的上游部分河段设置衰减系数, 大致取 0.05~0.1 d^{-1} 。

1.2.3 边界条件

水动力上边界采用的是石咀、梧州、石角、老鸦岗、博罗的实测流量数据，下边界采用的是实测水位数据。盐度模块的上边界石咀、老鸦岗采用的是实测盐度数据，梧州、石角、博罗的盐度取值为0，下边界均采用的是实测盐度数据。以上边界数据采用的均为2001-02-07T14:00—2001-02-16T10:00、2005-01-18T09:00—2005-02-05T08:00的实测数据。

2 模型的率定验证

根据现有实测资料选取了2001年枯季(27个水位站、24个流量站、4个盐度站)和2005年枯季(43个水位站、43个流量站、35个盐度站)进行模型的率定和验证。

利用Allen^[13]在2007年使用过的误差分析方法来评估此模型的计算精度，公式如下：

$$SS = 1 - \frac{\sum (X_{mol} - X_{obs})^2}{\sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (4)$$

式中：SS为模型精度检测参数； X_{mol} 为模型计算值； X_{obs} 为实测值； \bar{X}_{obs} 为观测值的平均值。判别模型计算结果好与差的标准为： $SS > 0.65$ 为极好， $0.5 \leq SS \leq 0.65$ 为很好， $0.2 \leq SS < 0.5$ 为好， $SS < 0.2$ 为差。

此模型模拟出的2001年和2005年的水位、流量和盐度检测参数按照公式(4)计算列表(表2、3)。

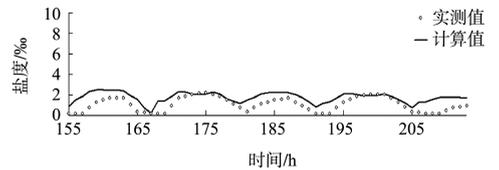
表2 2001年计算结果检测参数

站点	水位/m	流量/(m³/s)	盐度/%	站点	水位/m	流量/(m³/s)	盐度/%
高要	—	0.96	—	三善左	0.96	0.97	—
马口	0.91	0.89	—	三善右	0.96	0.99	—
三水	0.93	0.85	—	三围	0.97	0.71	—
天河	0.95	0.92	—	三沙口	0.98	0.8	—
百顷	0.95	—	—	梧州	0.99	0.88	—
竹洲头	0.97	0.59	—	黄沙沥	1	0.94	—
石仔沙	0.97	0.93	—	上横	0.99	0.66	—
南华	0.97	0.9	—	下横	1	0.58	—
容奇	0.98	0.17	—	大盛	0.96	0.88	0.22
小榄	0.98	0.88	—	麻涌	0.97	0.89	0.25
黄埔	0.98	—	—	漳澎	0.96	0.97	0.32
浮标厂	0.88	—	—	泗盛围	0.95	0.97	0.52
大石	0.93	0.89	—	石龙	0.89	—	—
沙洛围	0.89	0.94	—	睦洲口	0.98	0.22	—

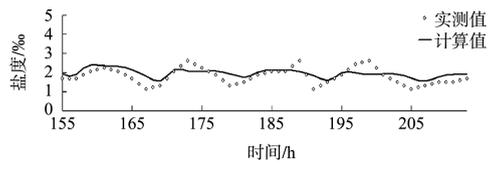
表3 2005年计算结果检测参数

站点	水位/m	流量/(m³/s)	盐度/%	站点	水位/m	流量/(m³/s)	盐度/%
高要	0.918	0.770	—	黄埔右	0.973	0.473	0.618
马口	0.903	0.866	—	浮标厂	0.936	0.980	0.393
三水	0.949	0.882	—	大石	0.915	0.923	0.568
岗根	0.932	0.544	—	沙洛围	0.899	0.901	0.525
天河	0.909	0.932	—	霞石	0.945	0.967	—
北街水闸	0.949	-0.030	-3.772	三善左	0.951	0.969	-3.251
百顷	0.412	0.090	-111.267	三善右	0.965	0.980	0.258
大熬	0.977	0.953	0.123	三围	0.942	0.833	0.247
虎坑	0.984	0.812	0.697	沙湾水厂	0.957	0.384	0.557
睦洲口	0.973	0.579	-308.495	三沙口	0.408	0.878	0.652
竹洲头	0.987	0.745	0.226	大陇滘	0.980	0.907	0.806
竹银	0.988	0.932	0.473	乌珠	0.993	0.876	0.221
西河口	0.994	0.887	0.612	黄沙沥	0.985	0.944	0.655
紫洞	0.951	0.132	—	上横	0.986	0.478	0.848
澜石	0.745	0.853	—	下横	0.991	0.188	0.759
石仔沙	0.908	0.939	—	亭角	0.981	0.973	-0.495
南华	0.883	0.930	—	大盛	0.936	0.794	0.650
容奇	0.972	0.971	无穷	麻涌	0.965	0.899	0.462
小榄	0.944	0.877	0.894	漳澎	0.940	0.977	0.821
南头	0.964	0.907	-671.180	泗盛围	0.912	0.975	0.741
海尾	0.971	0.951	-57.759	双水	—	—	0.592
飞蛾	0.981	0.860	—	十三顷	—	—	0.467
黄埔	0.983	0.876	0.433	竹排沙	—	—	0.627

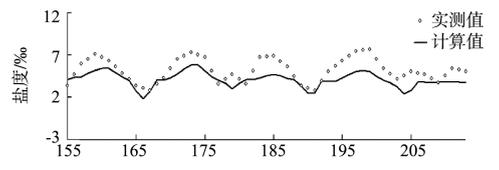
从表2、3可以看出，水位、流量计算精度良好，盐度趋势基本吻合，说明该模型可以较好地模拟珠江三角洲水动力和盐度变化过程。由于本模型水位、流量和盐度验证图较多，本文只展示部分测点盐度验证(图2、3)。



a) 大盛



b) 麻涌



c) 泗盛围

注：“—”表示缺乏实测资料，无法进行验证。

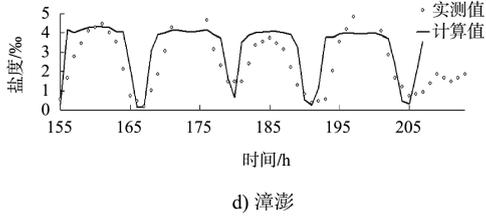
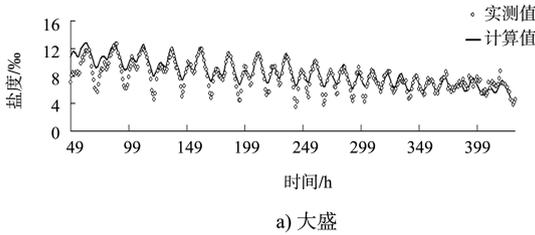
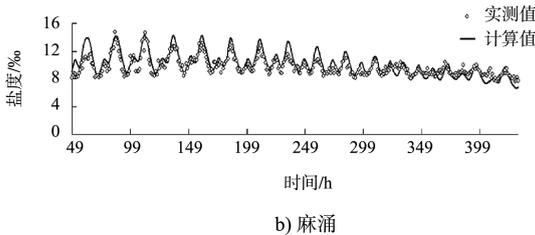


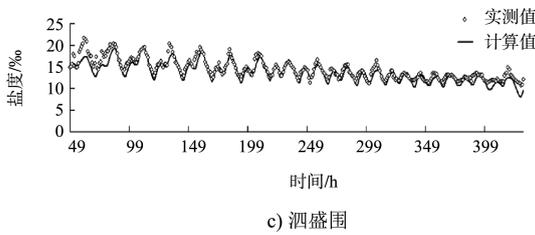
图 2 2001 年枯季盐度验证



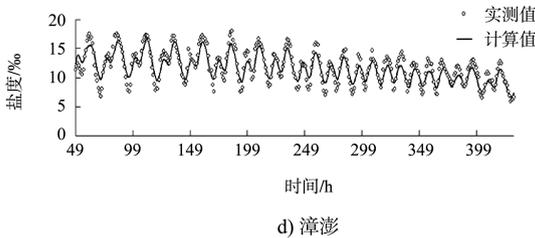
a) 大盛



b) 麻涌



c) 泗盛围



d) 漳澎

图 3 2005 年枯季部分站点盐度验证

3 咸潮上溯分析

3.1 2001 年与 2005 年咸潮上溯分析

根据模型对 2001 年和 2005 年咸潮上溯的计算结果, 绘制出 2 a 的咸水界(0.5‰盐度线), 见图 4。从图 4 可以看出, 无论 2001 年还是 2005 年, 模拟出的 5‰盐度线在整个河网区均呈现出向右倾斜的“S”形。上溯距离最长的位置出现在虎门, 达到了 78.6 km(表 4)。

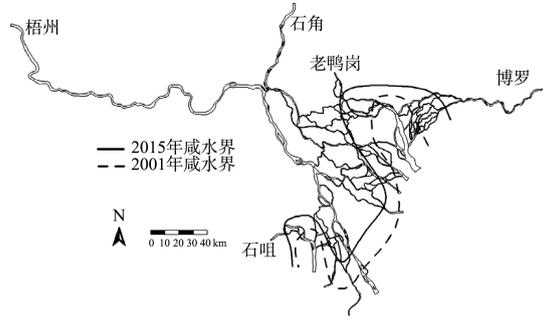


图 4 2001 年和 2005 年咸水界对比(0.5‰盐度线)

表 4 咸潮上溯距离(0.5‰盐度线)变化 km

站点	2001 年枯季	2005 年枯季	增加距离
虎门	57.2	78.6	21.4
蕉门	12.7	38.8	26.1
洪奇门	2.3	8.9	6.6
横门	5.0	10.5	5.5
磨刀门	17.9	27.1	9.2
鸡啼门	25.0	35.4	10.4
虎跳门	5.0	18.2	13.2
崖门	23.4	41.4	18.0
平均	18.6	32.4	13.8

从表 4 可知, 2005 年枯季与 2001 年枯季相比, 咸潮上溯距离在 8 个口门附近均出现不同程度的增加, 平均增加 13.8 km, 平均上溯距离为 2001 年枯季的将近 2 倍。蕉门在 2005 年枯季上溯距离达到了 38.8 km, 这是 2001 年枯季的 3 倍多; 洪奇门、横门、虎跳门在 2005 年枯季上溯距离分别是 2001 年枯季上溯距离的 3.9 倍、2.1 倍、3.6 倍。造成这个差异变化的一个重要原因是珠江三角洲在 2005 年发生了罕见的旱灾, 致使上游来水量大幅减少。2005 年枯季梧州、石角、博罗处的径流量分别为 1360、312、360 m³/s, 而这 3 个站点 2001 年同期流量则分别为 2300、768、336 m³/s, 上游流量的减少对咸潮上溯距离产生明显的影响。

虎门、蕉门以及崖门处的上溯距离相对其它口门要长, 这是因为虎门、蕉门出口处的伶仃洋和崖门出口处的黄茅海均呈内尖外宽的喇叭形(图 5), 且出口朝向与外海潮汐流向相向, 这使得外海潮汐在进入该区域后内聚作用增强, 潮汐动力增强, 山潮比较其它口门处要小。从表 5 可以看到, 虎门、蕉门、崖门处山潮比较其他口门要小很多, 尤其虎门和崖门, 分别为 0.26、0.31,

说明潮汐动力强烈,径流动力相对较弱,这是该区域咸潮上溯距离更远的一个重要原因。

由表4可以看出,口外同为黄茅海的虎跳门,咸潮上溯距离相对崖门要明显短很多。这是因为虎跳门出口朝向与外海潮汐流向几乎呈直角,受外海潮汐影响较小,山潮比较大,达到了3.54(表5),这说明外海潮汐对咸潮上溯距离有一定的影响。

表5 8大口门处年均山潮比

口门	涨潮量/ ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	落潮量/ ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	净世量/ ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	山潮比
虎门	2 288	2 891	603	0.26
蕉门	325	890	565	1.74
洪奇门	97	306	209	2.15
横门	133	498	365	2.74
磨刀门	160	1 083	923	5.77
鸡啼门	67	264	197	2.94
虎跳门	57	259	202	3.54
崖门	636	832	196	0.31

同样潮汐动力较弱的横门、洪奇门、磨刀门,上溯距离呈现出不同大小,磨刀门处的上溯距离要明显比横门、洪奇门处远。这是由于磨刀门作为西江的主要泄流通道,山潮比很大(达到了5.77,见表5),受径流主导;而横门、洪奇门处河道相对较小,这两个口门不是西、北江的主要泄流通道,即上游来流量的减小会使作为主要泄流通道的磨刀门流量产生明显的减小,而非主要泄流通道的横门和洪奇门所受影响相对会小。下面将通过4种不同上游流量组合,来验证上游径流量对咸潮上溯距离的影响。

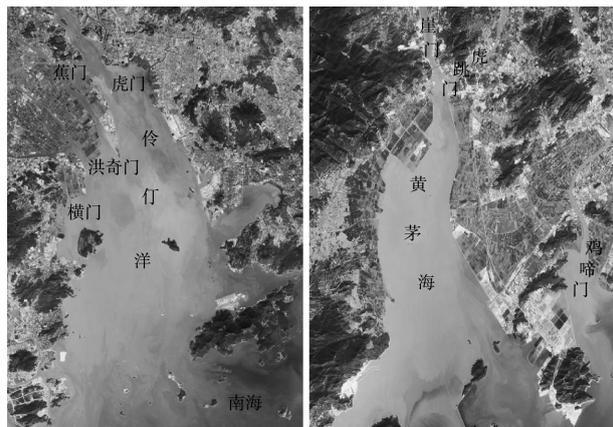


图5 伶仃洋与黄茅海卫星地形

3.2 咸潮上溯距离对不同上游来水流量的响应

利用已建的模型,选择4种代表性的工况分别计算,分析不同上游来水对咸潮上溯距离的影响,所采用的上游来流量组合见表6。

表6 来水工况组合(口门处采用枯季实测潮型)

站点	工况1	工况2	工况3	工况4
	平均流量/ (m^3/s)	整治流量/ (m^3/s)	枯水流量/ (m^3/s)	设计流量/ (m^3/s)
石咀	380	300	200	100
梧州	7 068	3 000	2 000	1 500
石角	1372	900	500	200
老鸦岗	720	500	400	300
博罗	830	544	300	120
平均	2 074	1 049	680	444

8大口门在4种不同工况下的上溯距离见表7。由表7可知,上游流量越小,8大口门咸潮上溯距离越大。在平均流量下,由于上游的来流量较大,除虎门、蕉门、鸡啼门、崖门咸潮上溯距离大于10 km外,其他各口门上溯距离较小,均在7 km以内。整治流量下,上游各站点流量较平均流量有所减少,尤其梧州和石角的流量有较大程度的减少,下游咸潮上溯距离有所增加,其中以蕉门增加的距离最大,较平均流量下增加了13.6 km,其次是鸡啼门,较平均流量增加了13.1 km,其他口门较平均流量增加的距离为5~10 km。在枯水流量及设计流量条件下,上游流量均有不同程度的减小,咸潮上溯距离变化趋势与前面基本一致,只是上溯距离大小有所不同。从整治流量到枯水流量,口门咸潮上溯距离增加了5.5~20.9 km;从枯水流量到设计流量,口门咸潮上溯距离增加了5.7~22.7 km。虎门、鸡啼门、虎跳门上溯距离变化最明显,说明这几个口门受上游径流量影响更大。

表7 8大口门咸潮上溯距离对比 km

口门	平均流量	整治流量	枯水流量	设计流量
虎门	41.3	48.4	69.3	75.0
蕉门	12.1	25.7	36.2	43.4
洪奇门	1.6	8.2	19.5	33.2
横门	1.3	10.3	21.0	27.2
磨刀门	6.1	14.7	24.9	43.9
鸡啼门	10.2	23.3	29.8	51.3
虎跳门	1.6	7.0	12.5	35.2
崖门	13.5	19.4	31.4	43.4
平均	11.0	19.6	30.6	44.1

在平均流量条件下, 上游 5 个站点流量的平均值为 $2\ 074\ \text{m}^3/\text{s}$, 整治流量条件下上游 5 各站点流量的平均值则为 $1\ 048.8\ \text{m}^3/\text{s}$ 。从平均流量到整治流量, 上游站点流量的平均值减少了 0.5 倍, 而与之对应的下游八大口门咸潮上溯平均距离由 11 km 增加到 19.6 km, 增加了 0.8 倍; 从整治流量到设计流量, 上游站点流量的平均值减少了 0.57 倍, 与之对应的下游 8 大口门咸潮上溯平均距离由 19.6 km 增加到 44.1 km, 增加了 1.25 倍。由此可知, 上游来水流量对下游 8 大口门咸潮上溯距离有着很大的影响, 当上游平均来水流量减少将近 0.5 倍, 下游 8 大口门咸潮上溯平均距离将增加 1 倍左右。

从图 6 可以看出, 在枯水流量和设计流量下, 咸水界在外海潮汐动力作用下通过狮子洋直逼广州, 这将对珠江三角洲城市圈的正常用水产生很大的影响。通过图 6 咸水界在不同流量条件下上溯距离的变化, 可见咸水界的变化对上游来流量的响应还是比较明显的, 尤其是枯季的干旱气候对于珠江三角洲咸潮灾害的爆发起到推波助澜的作用。

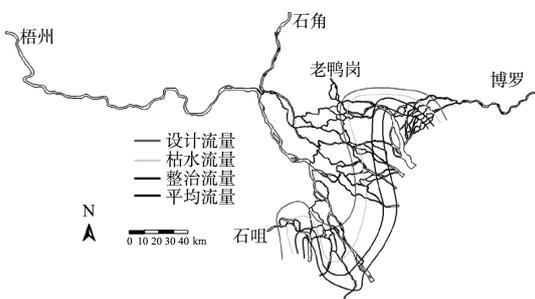


图 6 不同流量级下咸水界(0.5‰盐度线)

4 结论

1) 无论 2001 年枯季还是 2005 年枯季, 模型模拟出的 0.5‰盐度线在珠江三角洲河网均呈现出向右倾斜的“S”形。2005 年枯季 8 大口门咸潮平均上溯距离达到了 32.4 km, 这几乎是 2001 年枯季的 2 倍。2005 年枯季发生在珠江三角洲的罕见旱灾, 使河网上游来水流量大幅减少, 这是造成咸潮上溯距离较 2001 年枯季大幅增大的重要原因。受外海强烈的潮汐动力影响, 咸潮上溯最远距离出现在虎门, 分别达到了 57.2、78.6 km, 咸

水界直逼广州, 对部分城市用水造成很大困扰。

2) 在 4 种不同上游来水流量组合下, 下游 8 大口门处咸潮上溯距离也呈现出相应的变化。当上游来水流量减少时, 下游 8 大口门处咸潮上溯距离增加, 上游来水平均流量减少将近 0.5 倍时, 下游 8 大口门处咸潮上溯平均距离将增加 1 倍左右, 上游来水流量对下游咸潮上溯距离有着很大的影响。

参考文献:

- [1] 张蔚, 严以新, 诸裕良, 等. 人工采沙及航道整治对珠江三角洲水流动力条件的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1 098-1 104.
- [2] 韩志远, 田向平, 刘峰. 珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J]. 海洋学研究, 2010, 28(2): 52-59.
- [3] 罗宪林, 季荣耀, 杨利兵. 珠江三角洲咸潮灾害主因分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 146-148.
- [4] 李素琼, 敖大光. 海平面上升与珠江口咸潮变化[J]. 人民珠江, 2000, 21(6): 42-44.
- [5] 孔兰, 陈晓宏, 杜建, 等. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1 097-1 104.
- [6] 卢陈, 刘晓平, 陈荣力. 径流-潮汐相互作用与咸潮上溯距离试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2014(5): 282-287.
- [7] 刘杰斌, 包芸, 黄宇铭. 丰、枯水年磨刀门水道盐水上溯运动规律对比[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1 098-1 103.
- [8] 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, 26(2): 21-23.
- [9] 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.
- [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.
- [11] 何慎术, 钱海强. 磨刀门水道咸潮入侵规律及影响因素初步分析[J]. 人民珠江, 2008, 29(3): 18.
- [12] Cunge J A, Holly F M, Verwey A. Practical aspects of computational river hydraulics [M]. London: Pitman Advanced Pub Program, 1980.
- [13] Allen J, Somerfield P, Gilbert F. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 64(1): 3-14.