珠江口咸潮入侵分析与经验模型
——以磨刀门水道为例

陈水森[1,2,3], 方立刚[2,3,4], 李宏丽[2,3], 张立新[1]

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 广州地理研究所, 广东省环境科学与技术公共实验室, 广东 广州 510070;
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 收集了 2004– 2006 年珠江口磨刀门水道咸潮发生时测站(1~ 7) 逐日定时观测的的含氯度、水位与流量数据, 分析了各监测站含氯度与水位的日变化与年变化, 导出了咸潮演变各过程中, 含氯度与径流、潮流、河口地形等的关系式, 建立了珠江口地区磨刀门水道咸潮入侵的经验模型。据此, 模拟了 2006 年 1 月 12 日的磨刀门地区的咸潮入侵态势, 经过和沿途各观测点验证发现与实测数据非常吻合。以含氯度等于 250 mg/ L(饮用水的含氯度最大值) 的点作为咸潮入侵的最远点, 用简化修改后的盐度模拟模型计算了磨刀门咸潮入侵最大距离, 并根据 2006 年 1 月 12~ 20 日的河口含氯度与最近的上游天河站的径流量实测数据计算出相应的咸潮入侵最大距离。研究表明, 在河流枯水期(珠江河口通常是 12 月至翌年 3 月), 只要获得当天河口的含氯度和上游测站的径流量数据, 就能利用此经验模型估算出河流各点的含氯度, 作出盐度模拟图, 并估算出相应的咸潮入侵最大距离。

关 键 词: 珠江口; 磨刀门水道; 咸潮入侵; 模拟
中图分类号: P342 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2007)05-0751-05

咸潮是沿海河口地区一种特有的季节性水文现象, 咸潮上溯是南粤大地水害的极端性灾害之一, 主要是由旱情引起的, 如 1993 年 3 月, 广州地区连续数月干旱, 珠江咸潮倒灌, 黄埔水厂、员村水厂和石溪水厂先后局部或全部停产。

回顾珠江口历年发生的咸潮灾害, 可以看出对于咸潮监测研究和模拟的重要性和迫切性, 目前国际上关于咸潮的研究大部分以实验室数字模拟为主[1~ 3], 最近也有一些研究涉及高光谱遥感预警和咸潮入侵模拟模型预测[4]。然而国内关于珠江口咸潮的研究还以传统实测、宏观分析[5,6]为主, 仅有少量模型模拟的方法[7,8]研究。本研究利用常规观测数据, 结合 ARC GIS 的空间分析、统计功能和珠江口的水系矢量图, 分析了珠江口地区最近几年咸潮的活动特点和规律, 模拟了咸潮入侵的活动过程, 并分析了咸潮入侵与河水流量、河口地形、河口盐度等的关系, 建立了珠江口磨刀门的咸潮入侵模拟模型。

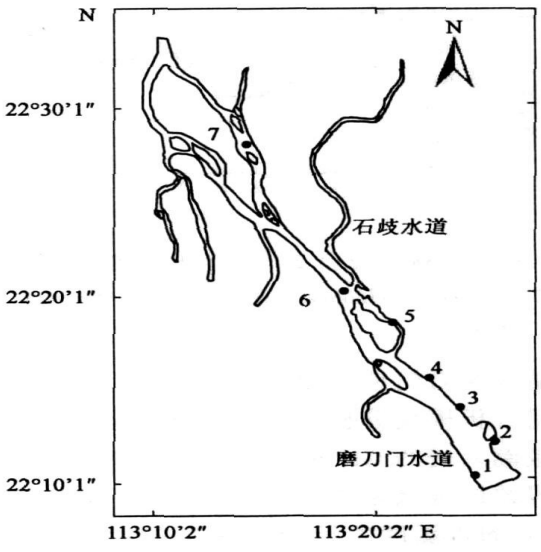

图 1 磨刀门水道上的测站 1~ 7 站位置图
Fig. 1 Modaomen watercourse showing stations 1 to 7

收稿日期: 2006-07-17; 修订日期: 2006-11-15
基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金资助项目 (SK050010); 广东省自然科学基金资助项目 (06020298); 广东省科技计划资助项目 (2005B33303005)
作者简介: 陈水森(1965–), 男, 江西高安人, 研究员, 博士, 主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: css@gdas.ac.cn

1 研究区域地理特征

珠江口的西部和珠江西江、北江相连, 位于广东省境内, 淡水从珠江八大口门注入南海。磨刀门水道位于珠江口的西南部, 水深 3~ 5 m, 形似一个倒立的漏斗, 北边窄而南边宽(图 1) 。磨刀门水道是珠江口最近几年咸潮活跃的典型河段。在 1992 年咸潮侵入大涌口水闸(图 1 中的测站 3) , 1995 年咸潮到达神湾港(测站 4 附近) , 1998 年影响到南镇水厂(测站 5) , 1999 年以后进一步影响到全禄水厂(测站 7) 及以上地区。这里已成为近年来广东咸潮影响最为严重的地区。

2 咸潮入侵分析

磨刀门水道的咸潮入侵主要受太平洋洋流、河口几何形状、气象条件和河流流量的影响。图 2 和图 3 展示了大涌口水闸含氯度 (由于盐度和含氯度成正比, 本文用含氯度代替盐度) 和水位的不均衡混合半日变化, 而珠江口和离岸水面的潮流都是混合半日潮[5]。而且从图 2 和图 3 还可以看出, 含氯度的日变化和水位的日变化一致。这表明磨刀门水道的盐度变化主要是受潮涌的影响, 当潮涌达到最大的时候, 盐度也随之达到最大值。图 4 是大涌口水闸 2005 年 2 月的含氯度月变化。很明显含氯度具有半月周期变化规律, 并且在 2 月 9 日 (农历正月初一) 和 2 月 23 日 (农历正月十五) 含氯度达到最大值, 这与潮流的月变化一致。

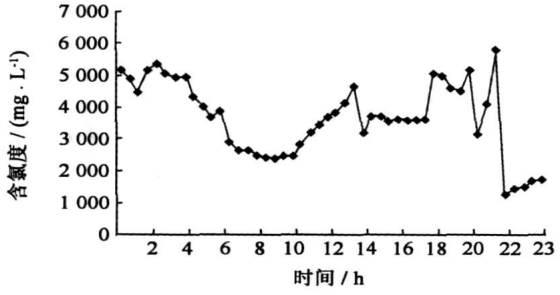

图 2 2006 年 2 月 27 日大涌口水闸的含氯度变化

Fig. 2 Change of chlorosity at Dayongkou floodgate on Feb. 27, 2006

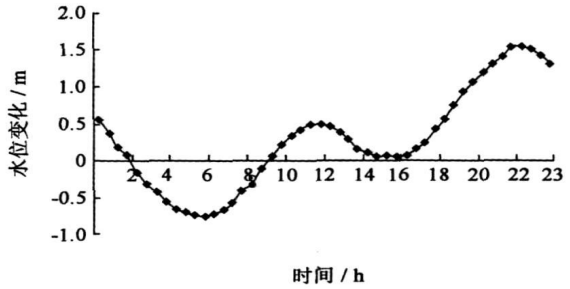

图 3 2006 年 2 月 27 日大涌口水闸的水位变化

Fig. 3 Variety of water level at Dayongkou floodgate on Feb. 27, 2006

结合磨刀门地区 2005 年 2 月的水系矢量图, 基于 GIS 的空间分析模块分析了咸潮入侵的强度、范围和历时, 并做了咸潮入侵的 GIS 模拟。通过分析发现, 2005 年 2 月咸潮入侵的最远点是测站 7 附近(图 1) , 2005 年 2 月份, 测站 1~ 6 的含氯度大于 250 mg/ L 的天数如图 5 所示, 随着离河口距离的增加, 咸潮影响的天数逐渐减少。不过测站 6 的咸潮入侵历时(d) 反而比下游的测站 5 多, 这可能是由于附近地形的影响(河流中沙洲对潮流的阻挡造成) , 也可能跟石歧水道的淡水注入有关。盐度随离河口距离的变化而变化(图 6) , 且随着离河口距离的增加盐度呈指数递减。根据 Savenije 的河口类型的划分方法[10], 磨刀门水系属于第一种类型: “衰退型”, 如图 6 所示。

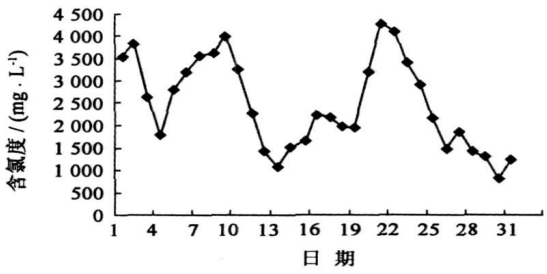

图 4 2005 年 2 月大涌口水闸的含氯度变化

Fig. 4 Variety of chlorosity at Dayongkou floodgate in Feb. 2005

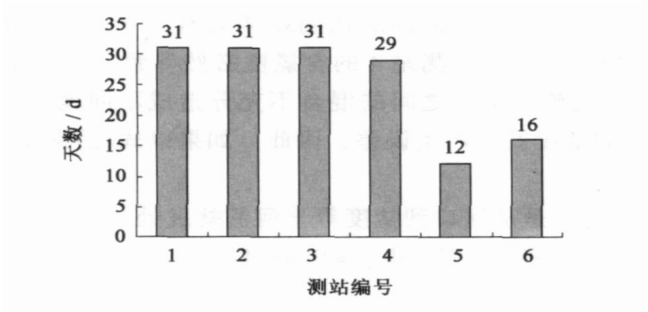

图 5　2005 年 2 月测站 1~ 6 的含氯度大于 250 mg/ L 的天数

Fig. 5　Number of days which is more than 250 mg/l of chlorosity at the stations No. 1 to No. 6, in February 2005

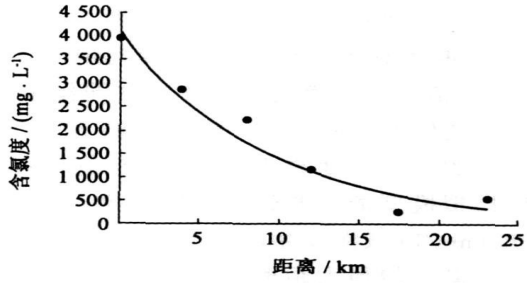

图 6　2005 年 2 月含氯度随着离河口距离的变化曲线

Fig. 6　The change of salinity against distance from the mouth in February 2005

3　咸潮入侵模拟

在枯水期，河流流量较小，而沿岸城镇对淡水的需求相对较大，当潮流达到最大时，咸潮入侵距离最远，且入侵的强度也达到最大。就气象因子而言，对咸潮入侵影响最大的是风速和风向。当风向与咸潮入侵方向一致或者相反时它将加速或者减弱咸潮的入侵。

对于部分混合的倒漏斗型河口，根据Savenije 等的研究[11]，随着离河口距离的增加河流的横断面积呈指数递减。因此，可写为

$$A = A_0 \exp(-\beta x) \tag{1}$$

本文的目的就是描述一种简单的模拟咸潮入侵的方法。对于部分混合的河口，由于河流径流的影响导致盐度随时间的改变比较小，因此常常忽略水平对流扩散方程的时间因子。盐度模拟方程可以用下式表示[12]：

$$\ln \frac{S}{S_0} = -\frac{Q}{\beta K_x A_0}[\exp(\beta x) - 1] \tag{2}$$

式中　S_0 为河口的盐度，mg/ L。在本文中图 1 中的测站 1 代表河口，其盐度是不稳定和随着潮流变化而变化的。A_0 为河口的横断面积，$(x = 0)$；β 为衰减系数或者说河口的收缩因子；K_x 为纵向混合系数；Q 为河流的径流量；X 为离河口的距离。式(2) 中涉及的参数 S_0、S、Q 和 A_0 均为日平均值。

根据式(2)，$\ln(S/S_0)$ 与 $\exp(\beta x)$ 的关系应该是线性的，直线的斜率为 $-Q/(\beta K_x A_0)$。Prandle 曾经描述过这种形式的关系[13,14]。K_x 为独立于 X 的系数，在本文中接近于常量。

在枯水期，河口的横断面积 A_0 经测量为 10 000 m^2，测站 2 处的横断面积为 7 386 m^2。衰减系数 β 根据式(1)计算值为 0.08 km^{-1}。有证据表明[11]，通常在离河口十几公里处有 β 的变形点，本研究结果(表 1 的测站 4) 也证实这一点。磨刀门水道的河流径流量在上游的天河站测得，并且纵向混合系数 K_x 也可以通过拟合直线的斜率计算 $K_x = -Q/(\beta A_0 \text{slope})$。这种方法的优势是 K_x 的估算结果考虑到所有的观测站的数据。

因此，根据式(2)，可对 2006 年 1 月 12 日磨刀门河口的咸潮入侵进行模拟。考虑到磨刀门河道只有 5 个测站的数据，为了纵向混合系数 K_x 模拟结果更准确，本研究采用循环验证法，即每次采用 4 个点的数据用于 K_x 的模拟，然后基于模拟的 K_x 值推导出另一个测站的含氯度值，依次循环。表 1 是每次循环验证模拟的 K_x 值和依据 K_x 值推导出的含氯度。从表 1 可以看出模拟的效果较好，但测站 4 的模拟值与实测

表 1　2006 年 1 月 12 日循环验证模拟的 K_x 值和依据 K_x 值推导出的含氯度与实测值的比较

Table 1　Comparison of calculated salinity with measured salinity by cross validation on January 12, 2006

测站	斜率	混合系数 k_x/($m^2 \cdot L^{-1}$)	实测值 /(mg·L^{-1})	模拟值 /(mg·L^{-1})	相对误差 %
2	- 0.61	1.73	5250	5069	3.7
3	- 0.60	1.75	3919	3724	5.2
4	- 0.58	1.81	3469	2492	39
5	- 0.58	1.81	1082	1100	1.6
6	- 0.59	1.78	315	288	9.4

值差别较大。这种差异可能是由以下两个原因造成的，首先，正如上面提到的在测站 4 处有一个 β 的变形点(测站 4 的横断面积不符合式(1)的变化规律)，所以用不变的 β 值来估算测站 4 的含氯度必然导致一定的偏差。其次由于 K_x 值取决于潮流和径流的共同作用，在 1 d 中由于径流、潮流之间的混合不充分造成不同地方的 K_x 值会有一定的偏差，所以以一个恒定的 K_x 来计算所有站点的盐度就会产生误差。因此，如果以式(2)来模拟各站点一个月的平均盐度的话，那么模拟值将会更接近真实值。

盐度模拟模型最主要就是模拟咸潮入侵的最大距离 L，通常是从河口到盐度等于河流盐度处，本文取含氯度等于 250 mg/L(咸潮发生的临界值)处作为咸潮入侵的最远点。将 S= 250 和 β= 0.08 代入式(2)，对方程进行变换得出咸潮入侵最大距离为

$$L = 12.5\ln\left(1 - \frac{800k_x \ln 250/S_0}{Q}\right) \tag{3}$$

式中 L 为离河口的距离，其余参数同上式。

根据式(2)和式(3)，对 2006 年 1 月 12~ 20 日的磨刀门水道的盐度以及每天的最大入侵距离进行模拟，对于每天的 K_x 估算结果如表 2 所示，混合系数 K_x 的范围为 1.78~ 2.62 m^2/s，平均值为 2.15 m^2/s。

表 2 2006 年 1 月混合系数 k_x 和咸潮入侵距离 L 表

Table 2 Values of k_x and saltwater intrusion length in Jan., 2006

日 期	河口含氯度 S_0/(mg·L^{-1})	径流量 Q/(m^3·s^{-1})	斜 率	R^2	混合系数 k_x/(m^2·s^{-1})	咸潮入侵距离 L/km
2006-01-12	6260	838	-0.59	0.99	1.78	23
2006-01-14	3787	1010	-0.67	0.96	1.88	20
2006-01-15	3551	1120	-0.73	0.80	1.92	19
2006-01-16	2750	1320	-0.63	0.89	2.62	20
2006-01-17	2630	1500	-0.76	0.89	2.47	18
2006-01-19	2970	1230	-0.79	0.87	1.95	18
2006-01-20	1830	1590	-0.82	0.81	2.42	15
平均值	3400	1230		0.89	2.15	19

这样，只要获得河口的含氯度和上游某测站的径流量，通过式(2)和式(3)就可以模拟出逐日河流的盐度值和咸潮入侵的最大距离。依据它可以快速、简单的估算出咸潮的入侵范围。因此，磨刀门水道的咸潮发生、发展和减弱的复杂动态过程就可以根据上述方程在 GIS 软件中进行模拟。这为咸潮入侵发生后的快速反应提供了决策依据，以便尽早部署相应的预防措施，将灾害减到最小。

4 结 论

本研究以磨刀门水道为例，结合磨刀门地区的含氯度、流量、水位等观测数据分析了该水道咸潮活动的规律和咸潮入侵的强度、历时和影响范围。根据 Savenije 的河口类型的划分方法，分析了磨刀门水道这种一维稳定倒漏斗型河口的盐度模拟方法，同时以河口动态盐度推导和发展了盐度模拟模型，并根据生活饮用水标准对盐度模拟模型进行变换推导出磨刀门水道咸潮入侵最大距离的计算公式。以 2006 年 1 月 12 日的实测数据模拟了磨刀门水道盐度分布，交叉验证表明与实测数据非常吻合(排除异常点，平均相对误差 4.98%)。另外，也根据咸潮入侵最大距离公式对 2006 年 1 月 12~ 20 日的咸潮入侵最大距离进行了模拟(如表 2 所示)。因此根据式(2)和式(3)结合 GIS 可以进行河道盐度分布和盐度入侵距离的模拟，快速高效的计算河流各点的盐度和咸潮入侵距离，为珠江口咸潮入侵发生后的快速反应提供了决策依据，弥补咸潮常规监测的不足。

致谢：感谢中山水利信息网 http://www.zswater.gov.cn/ 为本研究提供的咸潮实测数据，感谢中山市水利局康穗明、梁剑喜等的协助和支持。

参考文献:

[1] Ippen A T, Harleman D R F. One dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries[R]. Mississippi: Technical Bulletin No. 5, Committee on Tidal Hydraulics. Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1961.

[2] Rigter B P. Minimum length of salt intrusion in estuaries[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1973, 99: 1475- 1496.

[3] Gillibrand P A. Calculating exchange times in a Scottish fjord using a two-dimensional laterally integrated numerical model[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53: 437- 449.

[4] Binding C E, Bowers D E. Measuring the salinity of the Clyde Sea from remotely sensed ocean colour. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 605- 611.

[5] Qingwen Mao, Ping Shi, *et al*. Tides and tidal currents in the PRE[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 1797- 1808.

[6] 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.

[7] 李素琼, 敖大光. 海平面上升与珠江口咸潮入侵变化[J]. 人民珠江, 2000, 6: 42- 44.

[8] 闻　平, 杨晓灵. 珠海市乾务水厂取水泵站选址的比较分析[J]. 人民珠江, 2005, 3: 41- 43.

[9] Savenije H H G. Rapid Assessment Techniques for Salt intrusion in Alluvial Estuaries[R]. TU Delft: PHD thesis, 1992.

[10] Savenije H H G. A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries[J]. Journal of Hydrology, 1986, 85: 87- 109.

[11] Rachel Brockway, David Bowers, *et al*. A note on salt intrusion in funnel-shaped estuaries: Application to the Incomati estuary, Mozambique. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2006, 66: 1- 5.

[12] Prandle D. Salinity intrusion in estuaries[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11: 1311- 1324.

[13] Paulson R W. The longitudinal diffusion coefficient in the Delaware River estuary as determined from a steady-state model[J]. Water Resources Research, 1969, 5: 59- 67.

Saltwater intrusion analysis and experiential model for Pearl River estuary, south China: A case study in Modaomen watercourse

CHEN Shui-sen[1,2,3], FANG Li-gang[2,3,4], LI Hong-li[2,3], ZHANG Li-xin[1]

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100875, *China*; 2. *Public Lab. of Environment Science and Technology of Guangdong Province, Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou* 510070, *China*; 3. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*; 4. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: Chlorosity, water level and river runoff from each saltwater intrusion observation station are collected in recent years (2004- 2006) in Modaomen watercourse of Pear River Estary, south China, when the saltwater intrusion occurs. The daily and monthly change of chlorosity and water level at the observation stations are analyzed. The correlations among salinity, runoff, estuarine chlorosity and the geometry of estuary are analyzed synthetically, and the model formula between salinity and other hydrological factors (runoff, geometry of estuary and K_x) are deduced. Then, the simulation model for saltwater intrusion length from river mouth in Modaomen watercourse is established. Finally, the simulation values of the saltwater intrusion of Modaomen watercourse on January 12, 2006 are calculated based on the model and are very close to the observed values of field. Thus, the maximum length (chlorine: 250 mg/L, upper limit of drinking water) of the saltwater intrusion is calculated based on the modified model parameters of salinity. So, in the dry season (usually last December to next March), the model can provide decision making for quick reaction to saltwater intrusion event, and the corresponding measures can be early adopted and the disaster of saltwater intrusion is able to be expected and reduced to the minimization.

Key words: Pearl River estuary; Modaomen watercourse; saltwater intrusion; simulation