

# 珠江口磨刀门水道盐度变化与潮汐过程的相关性分析\*

章文<sup>1</sup>, 刘丙军<sup>1</sup>, 陈晓宏<sup>1</sup>, 辛彦博<sup>2</sup>, 严淑兰<sup>1</sup>

- (1. 中山大学地理科学与规划学院水资源与环境系//华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;  
2. 珠江水利委员会水文局, 广东 广州 510611)

**摘要:** 珠江河口区河网复杂, 受到径流、潮汐等多种自然因素及人类活动的共同影响, 咸潮上溯过程中盐度变化异常复杂。选取近10年枯水期磨刀门水道广昌站逐日盐度序列与三灶站同期潮位过程, 应用交叉小波分析方法, 研究了珠江河口区磨刀门水道盐度变化与潮汐过程的相关性。研究表明: 磨刀门水道盐度变化与潮汐过程在15 d的变化周期上存在显著相关关系, 位相差约为 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ , 即盐度变化提前于潮汐过程约2.5~3.75 d。

**关键词:** 磨刀门水道; 盐度变化; 潮汐过程; 时延相关性

中图分类号: P731.12 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2013)06-0011-06

## Correlations between Salinity and Tidal Process in Modaomen Waterway of the Pearl River Estuary

ZHANG Wen<sup>1</sup>, LIU Bingjun<sup>1</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1</sup>, XIN Yanbo<sup>2</sup>, YAN Shulan<sup>1</sup>

- (1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University//Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China;  
2. Hydrology Bureau of Pearl River Conservancy Commission, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** The Pearl River Estuary region is densely covered with rivers. Affected by runoff, tide and other natural factors and human activities, the salinity change process during salt water intrusion period is extremely complex. With the data of salinity from Guangchang Station and tidal range from Sanzao Station, the period features of salinity change and the correlation between tides and salinity change in Modaomen waterway were studied using wavelet analysis. The results show significant correlation between salinity change and tides in the cycle of 15 days. Phase difference is about  $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ , that means salinity changes ahead of tidal process about 2.5~3.75 days.

**Key words:** the Pearl River estuary; salinity changes; tidal process; delay correlation

珠江三角洲地区具有三江汇流、八门入海的复杂河网, 受上游淡水径流、河口区潮汐动力以及河口地形、风力风向、海平面变化、典型人类活动(河道采砂、水利工程调度)等多重因素影响, 河口区水动力条件存在多种不确定性, 盐度变化过程异常复杂。同一水道或同一断面的水体盐度, 会因

季节(上游来水多寡)、潮别(涨或落)、时程(潮汐涨退过程)、河道与口门地形变化、海平面上升及风向风力等因素影响而改变<sup>[1]</sup>。

近年来, 不少学者对咸潮上溯期河口盐度变化过程进行了大量研究, 并取得了诸多创新性成果<sup>[2-4]</sup>。在珠江河口区, 盐度变化研究进展主要集

\* 收稿日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909106, 51009156); 广东省科技计划资助项目(2011B030800008); 教育部青年教师培育基金资助项目(3161399)

作者简介: 章文(1989年生), 女, 研究方向: 水文水资源; 通讯作者: 刘丙军; E-mail: liubj@mail.sysu.edu.cn

中在盐度变化驱动机理与预报上。盐度变化驱动机理研究方面,多以单个测站分析为主,主要从上游径流、潮汐动力、河床演变、风浪或流速等方面研究各要素与咸潮上溯期盐度变化的关系。闻平等<sup>[5]</sup>运用径流-咸潮响应模型,以马口与三水流量为参照提出了磨刀门水道最小压咸流量;包芸等<sup>[6]</sup>认为造成磨刀门水道盐水强烈上溯的动力机制与枯季小潮期间特殊的潮汐动力状态有关;盐度变化预测研究主要以数学模拟为主,多采用经验模式。陈水森等<sup>[7]</sup>应用 Brockway 一维定常模式建立了磨刀门水道咸潮入侵的概化模型。

河口区盐度变化具有多时间尺度变化特征。陈荣力等<sup>[8]</sup>研究表明,珠江河口区盐度变化与潮位变化过程密切相关;薛建强<sup>[9]</sup>指出磨刀门水道咸界运动落后于潮位变化,且不同周期的滞后情况有所不同。但目前研究尚未明确河口区盐度变化与潮汐过程在时间上的相位关系。基于此,本文利用交叉小波分析方法在分析时间序列共振周期及位相关系上的优势,利用近十年枯水期磨刀门水道广昌站逐日盐度序列与三灶站同期潮位过程资料,研究了磨刀门水道盐度变化和潮汐过程的相关性。

## 1 研究区背景与数据

磨刀门水道咸潮上溯期盐度变化的影响因子众多,潮汐过程是盐度变化的主要驱动因子。本文在前人研究基础上<sup>[10-11]</sup>,以咸潮上溯较为严重的年份(2003-2004、2006-2007、2007-2008、2008-2009、2009-2010、2010-2011年)作为分析对象,选用磨刀门水道广昌站枯水期盐度序列及同期三灶站潮差序列,研究磨刀门水道盐度变化与潮汐过程的相关性。

盐度观测站广昌泵站位于磨刀门水道下游河段,距离河口较近,能较好反映河口区潮汐过程对盐度变化的影响<sup>[12]</sup>;潮位观测站选用三灶站,三灶站位于北纬 22°02',东经 113°24',距离磨刀门 16 km 左右,是珠江河口区最重要验潮站之一,其潮位变化特征对研究珠江口潮位时间演变规律具有较好代表性<sup>[5]</sup>。磨刀门水道及广昌站、三灶站位置示意图见图 1。

## 2 交叉小波分析方法

传统的相关分析如 Pearson 相关分析、Spearman 秩相关分析、Kendall 相关分析等,在描述变量间的相互关系时对数据有一定要求,如变量需符合双正态分布、有序分类等,且难以在时频两

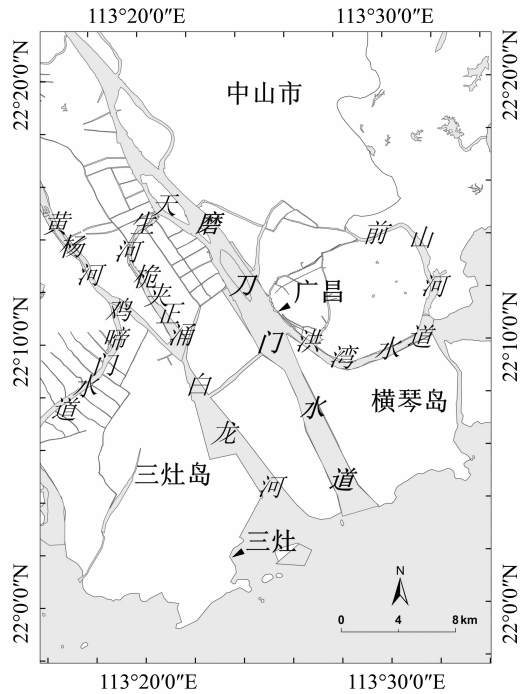


图 1 磨刀门水道示意图

Fig. 1 Location of Modaomen waterway

域表征不同信号间的相互关系及局部化特征。交叉小波变换可以克服常规的相关分析方法在线性相关条件下才适用的限制,从多时间尺度的角度研究揭示两相关变量在不同周期上的相关关系,以及要素之间同步性问题<sup>[13-15]</sup>。可见,交叉小波分析方法适宜于盐度变化与潮汐过程的时延相关特征和时频位相关系特征分析。

### 2.1 交叉小波变换 (XWT)

交叉小波变换是将小波变换与交叉谱分析相结合的信号分析技术,通过对两个时间序列的时频域进行多时间尺度分析,研究两时间序列的相互关系。假设  $W_n^X(s)$  和  $W_n^Y(s)$  分别是两个时间序列  $X$  和  $Y$  的小波变换,而其交叉小波谱可定义为:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s) \quad (1)$$

式(1)中,  $W_n^{Y*}(s)$  为  $W_n^Y(s)$  的共轭复数。对应交叉小波功率谱密度为  $|W_n^{XY}(s)|$ , 表示两个时间序列具有共同的能量值,其值越大,彼此相关越显著。

通过与红噪音标准谱的比较可对交叉小波功率谱进行检验。假设两个时间序列  $X$  和  $Y$  的红噪音谱为  $P_k^X$  和  $P_k^Y$ , 则其交叉小波分布为:

$$\frac{|W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)|}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{Z_V(p)}{v} \sqrt{P_k^X P_k^Y} \quad (2)$$

式(2)中,  $\sigma_X$  和  $\sigma_Y$  分别为两个序列的标准差,  $Z_V(p)$  是关于  $p$  的置信度,  $v$  为 Morlet 小波变换的

自由度，如在显著水平为  $\alpha = 0.05$  时， $Z_V(0.95) = 3.99$ 。若通过显著性 0.05 的红噪音检验，即认为两序列有较好的相关性，否则相关性不显著。

### 2.2 交叉小波位相

时间序列  $X$  和  $Y$  在时频域中的局部相对位相关系可用  $W_n^{XY}(s)$  的复角来描述。计算两个时间序列各尺度成分间的位相差，需要估计位相差的均值和置信区间。在影响锥曲线内（置信度 = 95%），其位相角可以定量描述两者的位相关系。设有  $n$  个角度  $a_i$  ( $i=1, \dots, n$ )，平均角的计算公式为：

$$\bar{a} = \arg(\bar{x}, \bar{y}); \bar{x} = \sum_{i=2}^n \cos(a_i);$$

$$\bar{y} = \sum_{i=2}^n \sin(a_i) \quad (3)$$

通过位相差箭头方向可以判断 2 个时间序列各尺度成分间的时滞相关性。

### 2.3 小波相干谱 (WTC)

两时间序列的小波相干谱计算公式为：

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1} |W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_n^Y(s)|^2)} \quad (4)$$

式 (4) 中， $S(W) = S_{scale}(S_{time}(W_n(s)))$  是平滑器，其中， $S_{scale}$  表示沿着小波伸缩尺度轴平滑， $S_{time}$  表示沿着小波时间平移轴平滑。Morlet 小波的平滑器表达式如下：

$$S_{time}(W) |_s = (W_n(s) \times c_1^{-2/(2s^2)}) |_s \quad (5)$$

$$S_{scale}(W) |_n = \{W_n(s) \times c_2 \prod (0.6s)\} |_n \quad (6)$$

式 (6) 中， $\prod$  为一矩阵函数， $c_1$  和  $c_2$  为标准化常数，0.6 为经验尺度。

交叉小波变换可以揭示两个时间序列共同的高能量区以及位相关系，小波相干谱则可以用来度量两个时间序列在时频空间上的局部相关程度，即使对应交叉小波功率谱中的低能量值区，在小波相干谱中也有可能很显著。

## 3 结果分析

选用广昌站近年来枯水期盐度序列及同期三灶站潮差序列进行交叉小波变换，研究广昌站盐度变化和与三灶站潮汐过程的相关性特征，结果见图 2（交叉小波功率谱）和图 3（小波相干谱图）。

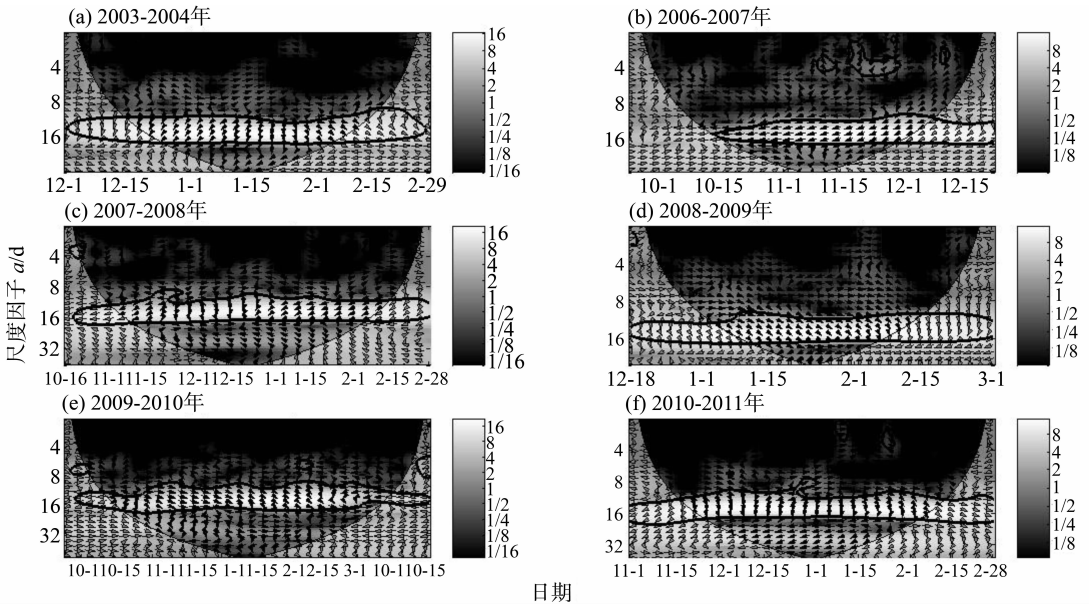


图 2 广昌站盐度与三灶站潮差的交叉小波功率谱 (XWT)

Fig. 2 The cross-wavelet power for the salinity sequence and the tidal range (XWT)

1) 磨刀门水道盐度变化与潮汐过程具有较好的时延相关性。各年份枯水期盐度序列与潮差序列的交叉小波功率谱 (XWT) (图 2 和表 1) 在时频域上显示出相似的特征，即在  $15 \pm 2$  d 的时间尺度上，广昌站盐度过程与三灶站潮差过程出现了显著的高能量区，且通过显著水平为 0.05 的红噪音检

验，表明两者在 15 d 左右的周期尺度上显著相关。盐度与潮差的相关关系较为稳定，一致表现为盐度变化超前于潮差变化，超前位相约为  $60^\circ \sim 120^\circ$  不等，说明盐度变化超前于潮差变化  $1/6 \sim 1/3$  个周期 (2.5 ~ 5 d)。这与闻平等<sup>[5]</sup>的研究结果，即在咸潮入侵的半月周期潮相变化中，磨刀门水道含氯

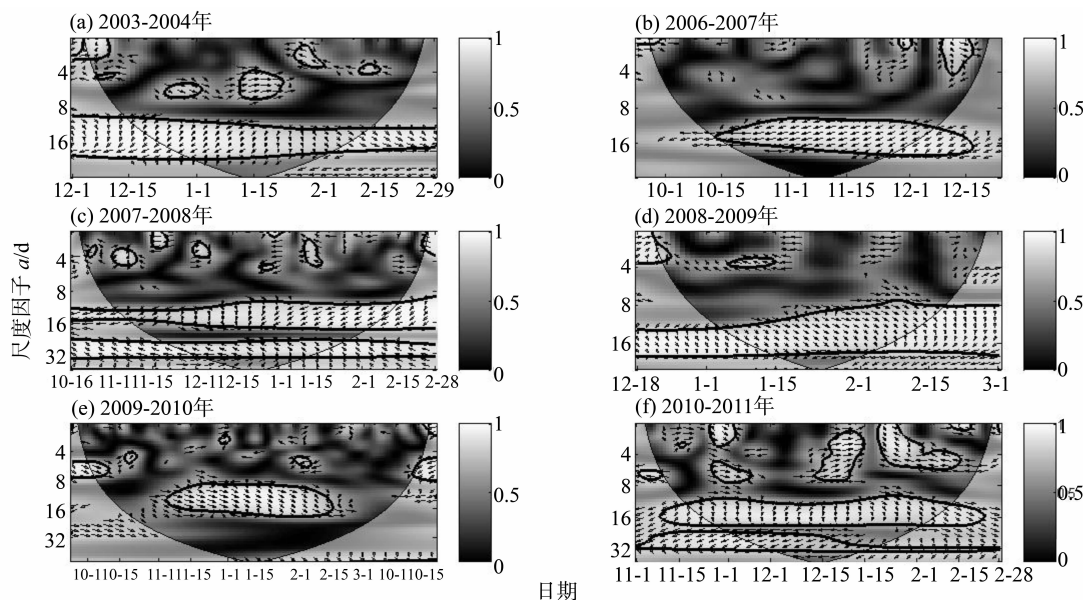


图 3 广昌站盐度与三灶站潮差的小波相干谱 (WTC)

Fig. 3 The wavelet coherence spectrum between the salinity sequence and the tidal range (WTC)

图中锥形细黑实线所包围区域为不受边界效应影响; 粗黑实线内为通过显著水平为 0.05 的红噪音检验; 灰度表示相关程度的高低

表 1 潮差、径流量、盐度及位相关系

Table 1 The tidal range, runoff, salinity and the phase angle

年份	日期	上游径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	潮差/m	盐度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	位相关系/ $(^\circ)$
2003 - 2004	1215 - 0116	2 414	1.75	5 364	90
	0113 - 0212	2 220	1.72	6 648	60
2006 - 2007	1101 - 0101	3 450	1.75	3 457	150
	0102 - 0205	2 804	1.83	4 319	100
2007 - 2008	1104 - 0101	2 983	1.77	5 098	90
	0102 - 0214	3 551	1.76	4 412	120
2008 - 2009	0102 - 0214	3 449	1.74	3 438	60
2009 - 2010	1101 - 0101	2 634	1.77	5 382	45
	0102 - 0218	3 965	1.73	2 913	60
2010 - 2011	1101 - 1229	3 374	1.72	2 105	90

度日最大值并不出现在潮差最大值日, 而是提前 3 ~ 5 d 左右的结论一致。总体上看, 15 d 周期在时域的能量分布较均匀, 在大潮期周围较为显著, 在小潮期附近能量有所减弱。说明潮汐作用强时潮汐过程与盐度变化相关性更为显著。

盐度变化之所以提前于潮差变化与河口地区的盐度输运环流有关。在小潮期向大潮期转换期间, 潮差每日都在明显增大, 此时磨刀门口门外海水盐度也比其他时期要高。也就是说, 在小潮期转大潮期时, 水平盐度往往会较大, 使得盐度向上输运更明显, 导致盐度变化提前于潮差变化。以 2009 - 2010 年为例, 对比水平盐度梯度与潮差变化 (图 4) 可知, 三灶站盐度最大值出现在 11 月 15 日及

12 月 1 日 (5 055 和 6 616 mg/L), 相应的, 水平盐度梯度的最大值也出现在这两天 (797 和 966 mg/L), 而三灶站潮差最大值分别出现在 11 月 19 日及 12 月 4 日 (223 和 267 cm), 即盐度变化提前于潮差变化 3 d 左右。

分析各年份交叉小波功率谱, 盐度变化与潮差过程的时滞关系各不相同, 具体情况见表 1。2003 - 2004、2010 - 2011 年枯水期, 盐度变化和潮汐过程的交叉小波功率谱在 15 d 的周期上表现出高能量, 两者位相角为  $60^\circ \sim 90^\circ$ ; 2006 - 2007 年枯水期, 两者位相关系为  $100^\circ \sim 150^\circ$ ; 2007 - 2008 年枯水期, 两者位相关系为  $90^\circ \sim 120^\circ$ ; 2008 - 2009、2009 - 2010 年枯水期, 两者位相关系为  $60^\circ$ 。可

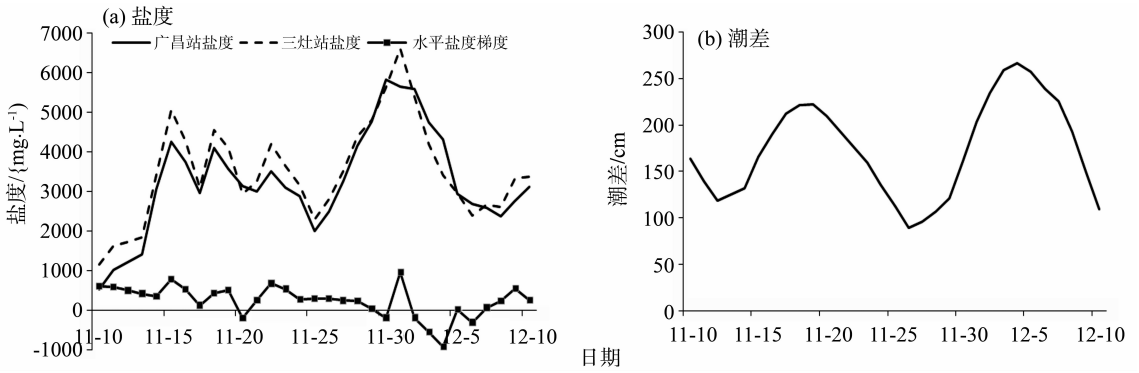


图 4 水平盐度梯度与三灶站潮差的关系

Fig. 4 Relationship between the horizontal gradient of salinity and tidal range in the MW

见，咸潮上溯过程中，对应潮差越大的年份，对应的盐度与潮差之间的位相角越大，即盐度变化提前于潮差变化越多。如 2006 - 2007 及 2007 - 2008 年的咸潮上溯问题比较严重（潮差分别为 1.75 和 1.75 m），相应其位相角也越大，超过了 2003 - 2004、2008 - 2009 及 2010 - 2011 年（潮差分别为 1.71、1.67 和 1.69 m）的位相角。对比上游同期径流过程（三水与马口合计流量），位相角的变化与上游同期径流量的变化亦存在一定对应关系，即当上游径流量由大到小变化时，位相角也表现出由大到小变化的规律。如 2003 - 2004 及 2006 - 2007 年枯水期，上游同期径流量变化情况均为由大到小，与之相对应，交叉谱的位相角也由大到小变化；2007 - 2008、2009 - 2010 年枯水期的情况则相反，上游同期径流量与位相角变化规律均为由小到大。可见，径流对盐度变化存在逆向驱动作用，即上游径流过程变大时，河口区站点盐度变小，盐度变化提

前于潮汐过程的时间越长；反之，上游径流过程减小，河口区站点盐度增大，盐度变化提前于潮汐过程的时间则越短。这与刘杰斌等<sup>[3]</sup>研究成果一致，即上游径流的大小会影响盐水上溯速度和距离。

2) 磨刀门水道盐度变化与潮汐过程在 15 d 的周期尺度上时延相关性较强。分析广昌站盐度与三灶站潮差的小波相干谱（WTC）（图 3），与交叉小波功率谱对应，以 15 d 为周期变化的高能量区表现明显，表明在 15 d 左右的周期尺度上，盐度序列与潮差序列有较强的时延相关性。为进一步说明盐度变化具有 15d 的周期特征，采用 Morlet 小波作为基函数进行小波变换，研究磨刀门水道河口区的盐度变化周期特征，结果见图 5。可以看出，磨刀门水道盐度变化具有与潮汐过程相似的周期变化特征，即盐度变化存在多时间周期特征，其中主要周期成分为 14.8 d（对于 Morlet 小波，周期  $T$  约为尺度因子  $a$  的 1.22 倍），这与闻平等<sup>[5]</sup>的研究

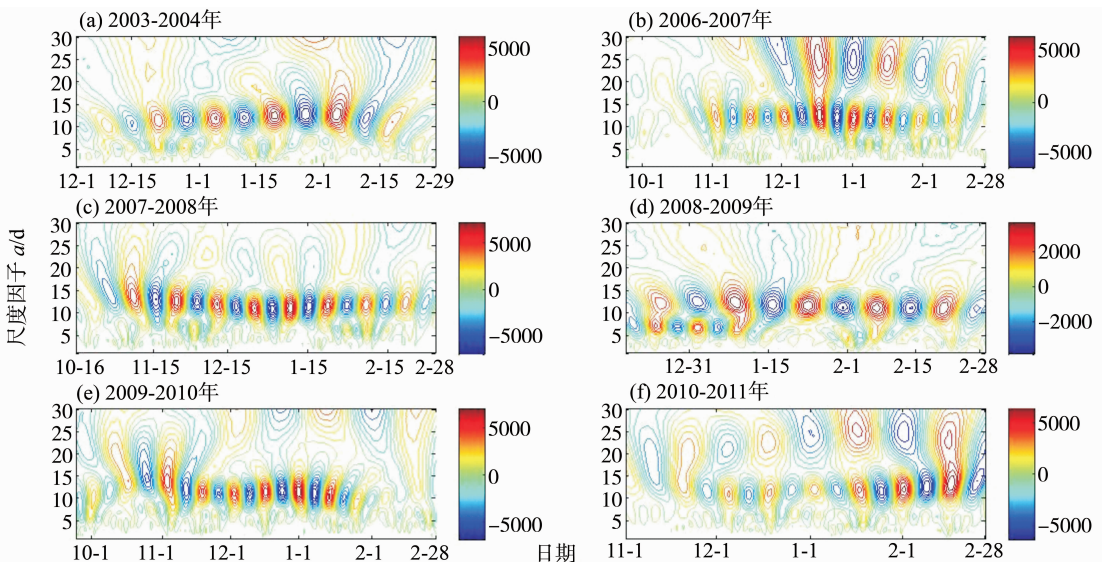


图 5 枯水期广昌站盐度序列小波系数图

Fig. 5 The isograms of the wavelet transform coefficients of the salinity sequence in Guangchang Station

成果一致,即磨刀门水道氯化物含量与潮汐半月周期有关,具有与潮汐过程相同的半月周期变化特征。

## 4 结 论

受上游淡水径流、河口区潮汐动力、河口地形、风力风向、海平面变化、河道采砂、水利工程调度等多重因素影响,河口区盐度变化过程异常复杂。论文选用近 10 年来珠江河口区磨刀门水道盐度与三灶站枯水期同期潮差数据,运用交叉小波分析方法,研究了咸潮上溯期磨刀门水道盐度周期特征及其与潮汐过程的相关性,得出如下结论:

1) 磨刀门水道盐度变化具有与潮汐过程相同的多时间尺度周期变化特征,主要周期成分为 14.8 d;

2) 盐度变化与潮汐过程密切相关,两者在 15 d 左右的周期尺度上显著相关,盐度变化超前于潮差变化 2.5 ~ 3.75 d,且潮汐作用越强,其相关性越显著。

3) 径流对盐度变化存在逆向驱动作用,河口区盐度变化规律与上游同期径流量的变化存在一定正相关关系,即径流量由大到小变化,河口区盐度由小变大,盐度变化提前于潮汐过程的时间也表现为由大到小变化的规律。

河口区盐度变化具有较强不确定性与复杂性,本文仅分析了珠江河口区磨刀门水道盐度变化与潮汐过程的相关性,其他影响因素如上游径流、风向、河口地形等对河口区水道盐度变化的影响仍待进一步研究和完善。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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):1098-1103.
- [3] BROCKWAY R, BOWERS D, HOGUANE A, et al. A note on salt intrusion in funnel-shaped estuaries: Application to the Incomati estuary, Mozambique[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2006, 66:1-5.
- [4] XU Hongzhou, LIN Jing, WANG Dongxiao. Numerical study on salinity stratification in the Pamlico River Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2008,80:74-84.
- [5] 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.
- [6] 包芸,刘杰斌,任杰等. 磨刀门水道盐度强烈上溯规律和动力机制研究[J]. 中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2009,39(10):1527-1534.
- [7] 陈水森,方立刚,李宏丽等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型——以磨刀门水道为例[J]. 水科学进展,2007,18(5):751-755.
- [8] 陈荣力,刘诚,高时友. 磨刀门水道枯季咸潮上溯规律分析[J]. 水动力学研究与进展,2011,26(3):312-317.
- [9] 薛建强. 磨刀门水道咸潮运动规律初步分析[J]. 广西水利水电,2012(2):26-27.
- [10] 孔兰,陈晓宏,闻平等. 2009/2010 年枯水期珠江口磨刀门水道强咸潮分析[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1858-1864.
- [11] 尹小玲,张红武,方红卫. 枯季磨刀门水道咸潮活动与压咸控制分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2008,23(5):554-559.
- [12] 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.
- [13] 王文圣,熊华康,丁晶. 日流量预测的小波网络模型初步探讨[J]. 水科学进展,2004,15(4):382-386.
- [14] 余丹丹,张韧,洪梅,等. 基于交叉小波相干的西太平洋副高与东亚夏季季风系统的关联性分析[J]. 南京气象学院学报,2007,30(6):755-769.
- [15] TORRENCE, CHRISTOPHER, GILBERT P. COMPO. A Practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 61-78.