

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.015

# 珠江口咸潮影响因素分析

孔 兰<sup>1,2,3</sup>, 陈晓宏<sup>1,2</sup>

- (1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
2. 华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

**摘要:**对珠江口平岗泵站和联石湾水闸两个代表站咸潮与流量、潮差、潮水位、海平面、气象等影响因素的响应规律采用集对分析和非参相关分析方法进行了研究, 结果表明: ①珠江口咸潮的主要影响因素为流量、最低潮位和海平面, 潮差、风级为次要影响因素; ②平岗泵站和联石湾水闸咸潮对各影响因素的敏感性具有差异性, 平岗泵站咸潮对流量更敏感, 联石湾水闸咸潮对海平面、最低潮位、潮差和最高潮位的敏感性大于平岗泵站; ③未来全球气候还将持续变暖, 珠江流域枯水径流变化复杂, 珠江口海平面上升速度在加快, 应加强珠江口咸潮变化机理的研究。

**关键词:** 珠江口; 咸潮; 海平面; 流量; 潮差; 潮水位; 风级

中图分类号: TV213 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)06-0094-04

## Analysis on the influence factors of saltwater in Pearl River Estuary

KONG Lan<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>

- (1. Research Center of Water Resources and Environment, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Key Laboratory of Water Recycle and Water Security of Guangdong Higher Education Institutes in Southern China, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Several saltwater influential factors including flow, tidal range, tidal level, sea level, climate, etc. at the two representative stations of Pinggang pump station and Lianshiwan station in Pearl River Estuary were researched, using set pair analysis and nonparametric correlation analysis methods. The results showed that: (1) In the Pearl River Estuary, the main influential factors to saltwater are flow, lowest tide level and the sea level. The tidal range and wind are secondary influential factors. (2) There are differences in the sensitivity of saltwater influential factors between Pinggang pumping station and Lianshiwan station. It is more sensitive to flow at Pinggang pumping station and more sensitive to sea level, the lowest tidal level, tidal range and the highest tidal level at Lianshiwan station. (3) The global climate continues warming, which makes low flow complex at the Pearl River Basin and sea level rising fast in the Pearl River Estuary. More research should be done on the changing mechanism of saltwater in Pearl River Estuary.

**Key words:** Pearl River Estuary; saltwater; sea level rise; flow; tidal range; tidal level; wind scale

咸潮一般是指沿海地区海水通过河流或其他渠道倒流进内陆区域后, 水中的盐分仍然达到或超过

250 mg/L 的自然灾害。珠江口是我国改革开放的前沿地带, 城市化程度较高。咸潮对珠江口地区城

基金项目: 国家自然科学基金(51479216, 51210013); 水利部公益性行业科研专项(201401013); 国家科技支撑计划(2012BAC21B0103)

作者简介: 孔兰(1973—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源与环境变异、水利水电规划、水生态文明建设等研究。E-mail: konglan2006@126.com

通信作者: 陈晓宏, 教授, 博士生导师。E-mail: eesexh@mail.sysu.edu.cn

市工业布局及其发展、生活用水和灌溉用水都具有重要影响<sup>[1-5]</sup>。《2012年中国海平面公报》分析结果显示:20世纪全球海平面平均上升1~2 mm/a。自1970年代以来,大洋增温和陆源冰川融化对全球海平面上升的贡献为70%~80%;自1990年代以来,极地冰盖融化的贡献率有所增加。《2013年中国海平面公报》海平面监测和分析结果表明:中国沿海海平面变化总体呈波动上升趋势;1980—2013年,中国沿海海平面上升速率为2.9 mm/a,高于全球平均水平。2013年,中国沿海海平面较常年高95 mm,较2012年低27 mm,为1980年以来的第二高位。1993—2011年期间,全球海平面上升速率为2.8~3.2 mm/a,同期中国近海海平面上升速率为3.7 mm/a。研究显示海平面上升会导致珠江口咸潮强度增加,咸潮上溯的强度过大、持续时间过长就会造成供水危机,形成“咸害”<sup>[6-10]</sup>。目前,鲜有学者利用集对分析、非参相关分析法进行珠江口咸潮影响因素分析,笔者采用集对分析、非参相关分析法对珠江口咸潮影响因素进行对比分析,识别咸潮与流量、潮水位、海平面、气象等影响因素的综合响应规律,旨在为保障珠江口地区的供水安全提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 集对分析

引入赵克勤提出的一种不确定性理论——集对分析(set pair analysis,简记为SPA)研究珠江口咸潮与各影响因素的相关关系。集对分析是一种处理不确定性系统的分析方法,具有确定性和不确定性结合、定性与定量相结合的特点,应用广泛<sup>[11-13]</sup>。集对分析是对系统作同异反定量刻画和研究的一种系统分析方法,其核心思想是先对不确定系统中的两个关联的集合构造集对,再对集对的特性作同一性、差异性和对立性分析,然后建立集对的同异反联系度。

所谓集对就是具有一定联系的两个集合A和集合B所组成的对子。对于给定的2个集合组成的集对H=(A,B),在具体问题背景下,对集对H的特性展开系统分析,可以找出两个集合共有的特性、对立的特性和既非共有又非对立的差异特性,并建立在该问题下的同异反联系度 $\mu_{A-B}$ ,其表达式为

$$\mu_{A-B} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中:S为集对H中两个集合共有的特性个数;F为集对H中两个集合差异的特性个数;P为集对H中两个集合对立的特性个数;N为集对H中两个集合的特性个数;S/N、F/N、P/N分别为两个集合在某一问题下的同一度、差异度、对立度;i为差异度系数,规定在[-1,1]区间内视不同情况取值;j为对立

度系数,规定j取值-1。令 $a=S/N$ , $b=F/N$ , $c=P/N$ ,则式(1)也可以简写为

$$\mu_{A-B} = a + bi + cj \quad (2)$$

显然,a、b、c都满足归一化条件: $a+b+c=1$ 。

在联系度中,a代表正相关关系;b代表既非正又非负的不确定的相关关系;c代表负相关关系。若 $a>c$ ,且 $a>b$ ,表示两变量存在正的相关关系;若 $c>a$ ,且 $c>b$ ,表示两变量存在负相关关系;若b最大,表示两变量间主要存在不确定相关关系,其中 $a>c$ 表示两变量还存在弱的正相关关系, $c>a$ 表示两变量还存在弱的负相关关系。利用集对分析的联系度能清晰地刻画两变量间的相关关系,并能根据a、b、c判断正、负相关性和不确定的相关性。联系度从微观层次上揭示出集合A和集合B的正、负相关和不确定相关情况,利于从宏观角度分析A和B的总体相关性。

集对分析采用标准化数据,区间划分时将集合划分成大、中、小3级,即 $(-\infty, E_x - 0.5s]$ 、 $(E_x - 0.5s, E_x + 0.5s)$ 、 $[E_x + 0.5s, +\infty)$ , $E_x, s$ 分别代表集合中各元素的均值和标准差。

### 1.2 非参相关分析法

本研究使用Kendall相关分析方法,Kendall tau-b是一种对两个有序变量或两个秩变量间关系程度的测度,属于非参测度,分析时考虑了结点(秩次相同的)影响。相关系数没有单位,其取值范围为[-1,1],绝对值越大,表明相关性越强,相关系数为正表示正相关,反之为负相关。计算公式为

$$\tau = \frac{\sum_{i < j} \text{sgn}(x_i - x_j) \text{sgn}(y_i - y_j)}{\sqrt{(T_0 - T_1)(T_0 - T_2)}} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \text{sgn}(z) = \begin{cases} 1 & z > 0 \\ 0 & z = 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases}$$

$$T_0 = n(n-2)/2$$

$$T_1 = \sum t_i(t_i - 1)/2$$

$$T_2 = \sum u_i(u_i - 1)/2$$

式中: $t_i$ 和 $u_i$ 分别为x和y的第i组结点的数目;n为观测量数。

两个或若干变量之间或两组变量之间的关系,有时也可以用相似性或不相似性来描述。相似性测度用大数值表示很相似,较小的数值表示相似性小。不相似性使用距离来描述,大值表示相差甚远。

## 2 计算与分析

珠江水经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门等8大口门注入南海(图1)。8大口门之冠的磨刀门为西江干流出口,年径流



图1 珠江口水系示意图

量占珠江入海径流总量的 28.3%, 是珠海、中山、澳门等城市和地区的主要供水水源地。在磨刀门水道为珠海、澳门等地区供水的取水口主要包括平岗泵站、联石湾水闸等, 平岗泵站和联石湾水闸距离磨刀门出海口分别约 40、20 km。本研究主要利用咸潮强度大、代表性强的 2009—2010 年枯水期逐日实测资料, 流量、潮位、潮差、海平面、咸度等资料来自于中华人民共和国水文年鉴珠江流域水文资料、水利部珠江水利委员会、广东省水文局、国家海洋局、水资源公报等, 其中咸度超标时间是指盐度达到或大于 250 mg/L 的小时数, 流量资料利用西江梧州、北江石角站逐日流量资料计算得到, 潮位、潮差、海平面利用三灶潮位站逐日资料计算。

利用集对分析理论分析计算, 得到平岗泵站咸度超标时数和各影响因子的联系度表达式如下:

表1 Kendall 相关系数

	平岗泵站咸度超标时数	联石湾水闸咸度超标时数	流量	潮差	最小潮位	最大潮位	海平面	风级
平岗泵站咸度超标时数	1							
联石湾水闸咸度超标时数	0.604 **	1						
流量	-0.441 **	-0.435 **	1					
潮差	-0.092	-0.175 **	0.234 **	1				
最小潮位	0.189 **	0.314 **	-0.256 **	-0.626 **	1			
最大潮位	0.044	0.031	0.111 *	0.622 **	-0.240 **	1		
海平面	0.201 **	0.324 **	-0.146 **	-0.082	0.431 **	0.278 **	1	
风级	0.110 *	0.008	-0.045	0.021	0.046	0.093	0.158 **	1

注: \* 表示 0.01 < P < 0.05; \*\* 表示 P < 0.01。

$$\begin{cases} \mu_{11} = 0.26 + 0.43i + 0.31j \\ \mu_{12} = 0.36 + 0.50i + 0.14j \\ \mu_{13} = 0.30 + 0.38i + 0.32j \\ \mu_{14} = 0.30 + 0.52i + 0.19j \\ \mu_{15} = 0.32 + 0.49i + 0.19j \\ \mu_{16} = 0.32 + 0.46i + 0.17j \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\mu_{11} \sim \mu_{16}$  分别为平岗泵站咸度超标时数与流量、海平面、潮差、最低潮位、最高潮位、风级的联系度。

由于  $b$  最大, 说明差异度最大, 表示两变量间主要存在不确定相关关系, 说明平岗咸潮与所选 6 个影响因子都呈不确定关系; 咸潮与流量、咸潮与潮差关系式中  $c > a$ , 说明差异度大于同一度, 表示有弱的负相关关系; 咸潮与海平面、风级、最低潮位、最高潮位关系式中  $a > c$ , 说明同一度大于对立度, 表示有弱的正相关关系。

联石湾水闸咸度超标时数和各影响因子的联系度如下:

$$\begin{cases} \mu_{21} = 0.21 + 0.51i + 0.28j \\ \mu_{22} = 0.46 + 0.45i + 0.09j \\ \mu_{23} = 0.25 + 0.46i + 0.29j \\ \mu_{24} = 0.40 + 0.44i + 0.17j \\ \mu_{25} = 0.34 + 0.48i + 0.18j \\ \mu_{26} = 0.41 + 0.44i + 0.15j \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mu_{21} \sim \mu_{26}$  分别为联石湾水闸咸度超标时数与流量、海平面、潮差、最低潮位、最高潮位、风级等的联系度。

联石湾咸潮与海平面同一度  $a = 0.46$ ,  $a > b$ ,  $a > c$ , 说明呈正相关关系; 联石湾咸潮与流量、潮差、最低潮位、最高潮位、风级等影响因素呈不确定关系, 其中联石湾咸潮与流量和潮差呈弱的负相关关系, 联石湾咸潮与风级、最低潮位和最高潮位呈弱的正相关关系。

对珠江口枯水期咸潮强度与主要影响因素非参相关分析结果见表 1。由表 1 可见: 平岗泵站、联石

湾水闸咸度超标时数与流量呈高度负相关,信度为99%,与潮差也呈负相关关系;平岗泵站、联石湾水闸咸度超标时数与最小潮位、海平面、最大潮位、风级都呈正相关关系;对平岗泵站、联石湾水闸咸度超标时数影响最大的为流量,其次为最低潮位和海平面、再次为风级。三灶最低潮位对平岗泵站超标时数的影响大于海平面的影响,而联石湾水闸超标时数受海平面的影响略大于三灶最低潮位。因此,咸潮的主要影响因素为流量、三灶最低潮位和海平面,珠江河口风级与咸潮相关性较小,为次要影响因素,研究也表明,非参相关分析与集对分析两种方法分析结果是基本一致的。

因此,咸潮活动与径流、潮汐、海平面、天气等因素密切相关。有学者研究<sup>[14-15]</sup>发现,影响河口区咸潮的诸多因素中,流量是主要的甚至是决定性的因素,咸潮与流量呈负相关关系,在全球气候变暖的大背景下我国极端天气气候事件增多、增强,2009—2010年枯水期珠江流域遭遇历史罕见的降雨稀少、河道径流锐减形势,加剧了咸潮危害<sup>[16-20]</sup>。由于海平面上升,潮差增大,咸潮上溯距离也加大。所以,海平面上升也是2009—2010年枯水期强咸潮形成的重要原因<sup>[21-22]</sup>。

### 3 结论

a. 珠江口咸潮与径流、潮差呈负相关关系,与海平面、最低潮位、最高潮位和风呈正相关关系。珠江口咸潮的主要影响因素为流量、最低潮位和海平面,珠江河口潮差、风级与咸潮相关性较小,为次要影响因素。

b. 平岗泵站和联石湾水闸咸潮对各影响因素的敏感性存在差异。平岗泵站与流量相关性更好,说明对流量更敏感,联石湾水闸与海平面、最低潮位、潮差和最高潮位的敏感性大于平岗泵站,亦说明靠近河口区的联石湾水闸受潮汐影响更大。

c. 未来全球气候还将持续变暖,珠江流域枯水径流出现的概率及枯水严重程度如何,需要进一步加强在更长时间序列上珠江流域枯水出现规律及原因的研究。珠江口海平面上升速度在加快,应探讨海平面上升对咸潮影响的规律。磨刀门水道的咸潮变化还受其他因素的影响,如地面沉降、河口延伸、波浪叠加、河道地形、联围筑闸等因素,咸潮活动机理复杂,还有待于深入研究。

### 参考文献:

[1] PRESS F. What I would advise a head of state about global change[J]. *Earth Quest*,1989,3(2):1-2.

[2] GOOR M A,ZITMAN T J,WANG Z B. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets[J]. *Marine Geology*,2003,202:211-227.

[3] VALVERDE H R,TREMBANIS A C,PILKEY O H. Summary of beach nourishment episodes on the U. S. East Coast barrier islands[J]. *J Coastal Res*,1999:15,1100-1118.

[4] 孔兰,陈晓宏,刘斌,等. 咸潮影响下磨刀门水道取淡时机初探[J]. *水资源保护*,2011,27(6):24-27. (KONG Lan,CHEN Xiaohong,LIU Bin,et al. A preliminary study on taking water time under the influence of saltwater intrusion in the Modaomen channel[J]. *Water Resources Protection*,2011,27(6):24-27. (in Chinese))

[5] 刘斌,孔兰,刘丽诗. 基于主成分分析的磨刀门水道咸潮影响因素研究[J]. *人民珠江*,2012,33(6):24-26. (LIU Bin,KONG Lan,LIU Lishi. Study on the influential factors of saltwater intrusion in the Modaomen channel based on the analysis of principal components[J]. *Pearl River*,2012,33(6):24-26. (in Chinese))

[6] HAQUE C E. Atmospheric hazards preparedness in Bangladesh:a study of warning,adjustments and recovery from the April 1991 cyclone[J]. *Natural Hazards*,1997,16:181-202.

[7] FLATHER R A. A storm surge prediction model for the Northern Bay of Bengal with application to the cyclone disaster in April 1991[J]. *Journal of Physical Oceanography*,1994:24,:172-190.

[8] AZAM M H,SAMAD M A,KABIR M. Effect of cyclone tract and landfall angle on the magnitude of storm surges along the coast of Bangladesh in the northern Bay of Bengal[J]. *Coastal Engineering Journal*,2004,46(3):269-290.

[9] UNNIKRISHNAN A S,KUMAR K R,FERNANDES S E, et al. Sea level changes along the Indian Coast:observation and projections[J]. *Current Science*,2006,90(3):362-368.

[10] MATTHEW J P.COOPERR M D.BEEVERS M O. The potential impacts of sea level rise on the coastal region of New Jersey, USA[J]. *Climatic Change*,2008,90(4):475-492.

[11] 赵克勤,宣爱理. 集对论:一种新的不确定性理论方法与应用[J]. *系统工程*,1996,14(1):18-23. (ZHAO Keqin,XUAN Aili. Set pair theory:a new theory method of non-define and its applications[J]. *System Engineering*,2009,64(3):270-277. (in Chinese))

[12] 赵克勤. 集对分析中联系数与不确定量[J]. *大自然探索*,1997,16(2):91. (ZHAO Keqin. Climate change:connection number and uncertainty of set pair analysis[J]. *Exploration of Nature*,1997,16(2):91. (in Chinese)) (下转第134页)

- environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera[J]. *Journal of Paleolimnology*,2005,33: 265-282.
- [40] VERB R G, VIS M L. Comparison of benthic diatom assemblages from streams draining abandoned and reclaimed coal mines and nonimpacted sites[J]. *Journal of the North American Benthological Society*,2000,19: 274-288.
- [41] HAMSHER S E, VERB R G, VIS M L. Analysis of acid mine drainage impacted streams using a periphyton index [J]. *Journal of Freshwater Ecology*,2004,19: 313-324.
- [42] PAN Y D, HILL B H, HUSBY P H, et al. Relationships between environmental variables and benthic diatomassemblages in California central valley streams (USA)[J]. *Hydrobiologia*,2006,561: 119-130.
- [43] HÅKANSSON H, REGNÉLL J. Diatom succession related to land use during the last 6000 years: a study of a small eutrophic lake in southern Sweden [J]. *Journal of Paleolimnology*,1993,8: 49-69.
- [44] KATHLEEN R, MELANIE V, BRIAN F C. Diatom habitats, species diversity and water-depth inference models across surface-sediment transects in Worth Lake, northwest Ontario, Canada [J]. *J Paleolimnol*,2010,44: 1009-1024.
- [45] JOHAN A W, NATALIE B, ROLAND I H, et al. Epiphytic diatoms as flood indicators [J]. *J Paleolimnol*,2010,44: 25-42.
- [46] 蔡德所,黎佛林,文宏展. 广西金鸡滩库区水深梯度下的硅藻生态特征研究[J]. *三峡大学学报:自然科学版*,2014,36(2): 1-5. (CAI Desuo, LI Folin, WEN Hongzhan. Ecological characteristics of diatoms under water depth gradients in Jinjitan Reservoir Area [J] *J of China Three Gorges University: Natural Sciences*,2014,36(2):1-5. (in Chinese))
- [47] 黎佛林,蔡德所,文宏展,等. 不同水动力条件下的河流硅藻群落分布机理研究[J]. *水资源与水工程学报*,2014,25(1): 205-209. (LI Folin, CAI Desuo, WEN Hongzhan, et al. Study on distribution mechanism of riverine diatoms community in different hydrodynamic conditions [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*,2014,25(1):205-209. (in Chinese))

(收稿日期:2014-06-28 编辑:方宇彤)

(上接第97页)

- [13] 谢平,陈晓宏,王兆礼,等. 东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析[J]. *地理学报*,2009,64(3): 270-277. (XIE Ping, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. Comparison of actual evapotranspiration and pan evaporation [J]. *Acta Geographic Sinica*,2009,64(3): 270-277. (in Chinese))
- [14] 沈焕庭,茅志昌,朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京:海洋出版社,2003.
- [15] 闻平. 珠江三角洲咸潮入侵机理研究[D]. 广州:中山大学,2006.
- [16] 许小峰,王守荣,任国玉,等. 气候变化应对战略研究 [M]. 北京:气象出版社,2006:24-27.
- [17] 秦大河. 气候变化:区域应对与防灾减灾[M]. 北京:科学出版社,2009:1-46.
- [18] 秦大河,罗勇,陈振林,等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. *气候变化研究进展*,2007,3(6): 311-314. (QIN Dahe, LUO Yong, CHEN Zhenlin, et al. Latest advances in climate change sciences; interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report [J]. *Advances in Climate Change Research*,2007,3(6):311-314. (in Chinese))
- [19] 陈志恺. 全球变暖对水资源的影响[J]. *中国水利*,2007(8):1-3. (CHEN Zhikai. The impact of globe warming to water resources [J]. *China Water Resources*,2007(8): 1-3. (in Chinese))
- [20] 王素萍,段海霞,冯建英. 2009/2010年冬季全国干旱状况及其影响与成因[J]. *干旱气象*,2010,28(1): 107-112. (WANG Suping, DUAN Haixia, FENG Jianying. The whole Chinese drought and its impact and causes during 2009—2010 winter [J]. *Journal of Arid Meteorology*,2010,28(1):107-112. (in Chinese))
- [21] 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): 1858-1865. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, WEN Ping, et al. Analysis on severe saltwater intrusion of the Pearl River Estuary in dry season during 2009—2010 [J]. *Journal of Natural Resources*,2011,26(11): 1858-1865. (in Chinese))
- [22] 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): 1097-1104. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion based on mathematical model [J]. *Journal of Natural Resources*,2010,25(7):1097-1103. (in Chinese))

(收稿日期:2015-06-02 编辑:徐娟)

