

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.019

基于 REOF 的珠江三角洲河网区水位时空 变异特征分析

杭宜铖^{1,2,3}, 范敏韬^{1,2,3}, 刘智勇^{1,2,3}

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要:基于 1962—2016 年珠江三角洲河网区 12 个水文站的月平均水位资料,利用 Mann-Kendall 趋势检验法、旋转经验正交函数法(ROEF)等方法分析了该地区平均水位的时间演变趋势和空间分布特征。结果表明:水位呈显著上升趋势的月份主要集中在 1—3 月和 12 月,水位呈显著下降趋势的月份主要集中在 8—9 月;珠江三角洲河网区平均水位分布特征可划分为 4 个典型空间异常型,第一空间异常型表现为旱季水位呈上升趋势,雨季水位呈下降趋势,第二、三、四空间异常型均表现为旱季和雨季水位均为先上升再下降的趋势。

关键词:月平均水位;旋转经验正交函数法;Mann-Kendall 趋势检验;河网区;珠江三角洲

中图分类号:P332.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0139-08

Spatiotemporal variation of water level in Pearl River Delta network area based on REOF // HANG Yicheng^{1,2,3},
FAN Mintao^{1,2,3}, LIU Zhiyong^{1,2,3} (1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Water Resources and Environment Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Southern
Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Based on the monthly mean water level data of 12 hydrological stations in the Pearl River Delta network area from 1962 to 2016, the temporal evolution trend and spatial distribution characteristics of the monthly mean water level were analyzed using the Mann-Kendall trend test and the rotated empirical orthogonal function(ROEF). The results show that the water level showed a significantly increasing trend mainly in the period from January to March and in December and a significantly declining trend mainly in August and September. The distribution of the mean water level in the Pearl River Delta network area can be classified into four spatial modes. The water level in the first spatial mode increased in the dry season and decreased in the rainy season. The water level in the second, third, and fourth spatial modes increased first and then declined in both the dry season and rainy season.

Key words: monthly mean water level; rotated empirical orthogonal function; Mann-Kendall trend test; river network area; Pearl River Delta

国内外一些学者从不同角度对全球不同区域的水位进行了研究。Männikus 等^[1]研究了波罗的海东部的拉脱维亚海岸的平均水位、季节性水位和极端水位的变化,计算了不同时间段内不同水位出现的经验概率分布并使用标准的 Kolmogorov-Smirnov 检验作为显著性检验,根据每周和每月的水质研究了平均和极端水位的季节性变化并对趋势斜率进行了评估。Mudersbach 等^[2]研究了海平面的升高是

否显著影响德国库克斯港的水位变化,分析了不同百分位海平面时间序列的线性趋势并将其与全球平均海平面趋势进行比较,研究了第 99 个海平面百分位序列与长期记录的库克斯港的全球平均海平面之间的非线性趋势差异,最后分析了长期记录的库克斯港的潮汐成分和非潮汐残差(波动)的变化。

珠江三角洲位于广东省中南部、珠江下游,是由珠江水系的东江、西江、北江及其支流组成的复合型

基金项目:国家自然科学基金(51809294);珠江人才计划团队项目(2019ZT08G090);广东省自然科学基金(2020A1515010559)

作者简介:杭宜铖(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:hangych3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:刘智勇(1985—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liuzhiy25@mail.sysu.edu.cn

三角洲,是世界上水系最复杂的三角洲之一^[3]。珠江三角洲有着“三面环山、一面临海,三江汇合、八口分流”的独特地形地貌,河网区河道密集,河网密度达 $0.68 \sim 1.07 \text{ km/km}^2$ ^[4]。Zhang 等^[5]研究了珠江三角洲地区年最高水位和最低水位的时空变化规律,采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 法检验趋势和突变点,采用去趋势预置白方法(trend-free pre-whitening)消除数据的自相关性的影响,认为水位极值的变化趋势在不同地区表现出不同的特征,总体上珠江三角洲上游水位呈下降趋势,而中下游水位呈上升趋势。陈晓宏等^[3]认为珠江三角洲河网区水文特征变异主要是由人类活动造成的。陈晓宏等^[6]基于区域化变量理论和克里格方法分析珠江三角洲水位的空间特征,发现水位间的相关性与水系走向有关,丰水期存在 13.02 km 的相关半径,超过这个距离,水位变化的相关性较低。唐亦汉等^[7]分析了珠江三角洲的高水位集中期特征,得出了珠江三角洲入口及口门站点的高水位集中期比河网区站点的时间更长的结论。杨清书等^[8]通过计算得出珠江三角洲水位总体呈上升趋势,平均变化率为 3.1 mm/a 。蒋陈娟等^[9]应用功率谱分析和正、反傅氏变换方法对河网区月均水位序列的周期变化和趋势变化进行了研究,发现水位序列中包含 $0.2 \sim 11.7 \text{ a}$ 多尺度的显著周期波动,水位变化率从 $-3.8 \sim 3.7 \text{ mm/a}$ 不等,珠江三角洲河网区水位总体呈上升趋势。时翠等^[4]运用累积距平法、趋势分析法等对 1 月份和 7 月份的水位时间序列进行突变点分析,结果表明在 1974—1982 年和 1989—1995 年月平均高水位发生变异点集中现象,且小部分潮位站存在 2 个变异点,大多数仅存在 1 个。谢凌峰等^[10]研究了人类采沙对珠江三角洲河网区河性演变的影响,结果表明在人类大规模采沙影响下,河网区河床下切严重,来流量变化不大但来沙量大幅下降,同流量下水位下降明显。孔兰等^[11]利用 Spearman 相关分析对珠江三角洲 5 个代表站的水文年内变化规律进行研究,结果表明珠江口水位年内变化不均匀系数和集中度呈现由珠江口深处向近河口处减少的趋势。

以往学者对珠江三角洲的水位研究,大多是分别分析水位的时间尺度和空间尺度的特征,但是从空间分型的角度来分析珠江三角洲水位演变趋势的研究还鲜有报道。本文通过空间分型识别出珠江三角洲河网区存在的各水位要素场,并采用旋转经验正交函数法(rotated empirical orthogonal function, REOF)分析其时间变异特征,以期为珠江三角洲不同地区的水情监测、防洪防涝措施的制定、水资源的

分配与调度提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

收集 1962—2016 年珠江三角洲河网区 12 个水文站的月平均水位数据,水文站分布如图 1 所示。所有站点的数据完整,通过三性审查。资料来源于广东省水文年鉴《珠江流域水文资料》和广东省水文局。

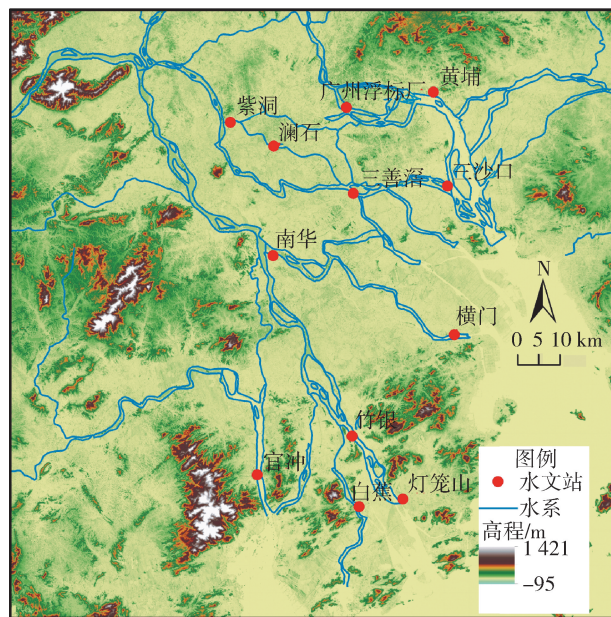


图 1 研究区域及水文站分布

Fig. 1 Study area and locations of hydrological stations

1.2 研究方法

1.2.1 REOF 分析

经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分解方法最初由 Pearson^[12]于 1901 年提出,该方法可将空间上随时间变化的要素场分解为正交的空间函数和时间函数两部分,用方差最大的几个时间函数与其对应的空间函数乘积,以此结果描述要素场的主要特征。Horel^[13]指出如果第一个 EOF 在其域上具有恒定的符号,则第二个 EOF 通常具有两个符号且零线穿过第一个 EOF 的最大值。这导致了域依赖性和非局部性问题^[12-15],由此产生的一系列问题使模型产生的结果变得难以解释^[16-18]。

为了解决这些问题,研究人员基于旋转的 EOF 的线性变化,提出了 REOF 的概念^[13,19-20]。REOF 分析是基于 EOF 分析,选取多个解释方差达到一定标准的特征向量进行正交旋转转换,旋转后的空间模态结构更加清晰,可以更好地体现地域差异,便于将水文要素一致的地区划分为同一区域。相比于 EOF 方法,REOF 在局部模态提取方面的准确性和有效性都有大幅提升,提取出来的空间模态具有更

好的物理意义^[21]。REOF 取样误差小,分离出的空间模态可以有效地体现要素场在空间分布上的相关性^[22],在反映局部变量之间关系和分布方面有着更明显的优势^[23],能更好地反映水位的时空分布特征。

珠江三角洲地区河网密布交错,同时又受到涨潮的影响,虽然每个水文站受到上游来水影响不一,但来自海相的潮汐影响比较一致,因而河网内的水文站具有一定的空间联系和连续性,比如都受到珠江三角洲河口的涨潮影响。基于这样的前提和假设引用 REOF 分析来探讨其空间模块。本文使用反距离插值法对该区域河道水位进行均匀插值,不考虑陆地区域,仅对河道内空间模态进行特征分析。

1.2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 非参数秩次检验法通常用于评估水文气象时间序列(如流量、温度、降水等)的趋势和突变检验^[24]。与参数统计检验相比,非参数检验被认为更适合于水文气象时间序列中经常遇到的非正态分布的数据和缺失数据,且不受少数异常值干扰。关于 Mann-Kendall 检验中统计值 S 与标准化检验统计值 Z_{MK} 的计算方法详见文献^[24]。

Z_{MK} 是一个服从正态分布的统计量,反映了时间序列数据的变化趋势。本文中,若 $Z_{MK} > 0$,表明平均水位数据随着时间的推移呈上升趋势;若 $Z_{MK} < 0$,则表明平均水位数据随着时间的推移呈下降趋势。当 $|Z_{MK}| \geq 1.96$ 时,表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验,即通过了置信度为 95% 的显著性检验。

1.2.3 多项式曲线拟合

数据拟合是一种重要的数据处理办法,被广泛应用于水文资料的整编中。数据拟合中最常用的方法是多项式曲线拟合。多项式曲线拟合有许多方法,数据量较少时适合使用最小二乘法^[25],其主要原理是保证拟合值和原数据的差的平方和为最小。对方程式求偏导后,使用高斯消元法求得拟合系数,确定拟合系数后得出拟合方程。本文对 REOF 分析结果所得的时间序列数据进行二项式拟合,可以看出整个研究时段中参数变化趋势的突变。

2 结果与分析

2.1 平均水位空间分布特征

从多年平均水位的空间分布来看,珠江流域下游站点的平均水位由西到东、由北向南递减(表 1)。整体递减方向与水系的方向相同,其中东西方向的递减更明显。水位高值区位于研究区域上游,包括紫洞、南华和澜石 3 个站点,平均水位都在 0.5 m 以

上,其中紫洞站的多年平均水位最高,达到了 0.8 m。水位低值区位于东江下游接近入海口处,包括三沙口和黄埔两个站点,平均水位均小于零,其中黄埔的平均水位值最低,达到 -0.03 m。旱季和雨季水文站的平均水位与多年平均水位的空间分布及空间变化大致相同。同一个站点旱季和雨季的平均水位差值与该站点的平均水位呈正相关,其中位于高值区的紫洞和南华 2 个站点旱季雨季平均水位差距明显,差值达 0.9 m 以上,说明其受上游来水和降雨影响较大。

表 1 珠江三角洲水文站平均水位

Table 1 Mean water level of hydrological stations in Pearl River Delta area

水文站	平均水位/m		
	旱季	雨季	全年
白蕉	0.01	0.16	0.09
官冲	-0.02	0.05	0.01
广州浮标厂	-0.03	0.14	0.05
横门	0.01	0.15	0.08
黄埔	-0.08	0.02	-0.03
澜石	0.19	0.89	0.54
南华	0.34	1.24	0.79
灯笼山	0.01	0.12	0.07
三善濠	0.11	0.54	0.32
三沙口	-0.06	0.02	-0.02
紫洞	0.32	1.28	0.80
竹银	0.10	0.39	0.25

2.2 REOF 分区

对珠江三角洲河网区 12 个水文站 1962—2016 年月平均水位进行 REOF 分析,结果显示前 4 个空间模态的方差贡献率依次为 23.59%、18.23%、10.44% 和 8.89%。由此可知,第一空间模态集中了珠江三角洲河网区水位要素最主要的信息,前 4 个空间模态累计方差贡献率为 61.17%,基本可以代表珠江三角洲河网区水位要素的时空变化特征。将 4 个空间模态所对应的时间序列进行月统计及旱季雨季划分,并在旱季和雨季 2 种时间序列下讨论各个空间模态的时空特征(图 2)。

由图 2(a)可知,第一空间模态正值中心位于研究区域南部,以白蕉、竹银 2 个水文站为主,其中白蕉站的载荷向量正值最高,达到 0.91,定义为第一空间异常型,结合图 3、图 4 对应的时间序列图,第一空间异常型的旱季平均水位时空分布特征为:1962—2016 年站点平均水位有上升趋势。在 1962—1964 年、1980—1984 年 2 个时间段,水位的平均年际变化率最大。平均水位最低值出现在 2005 年,最高值出现在 1983 年。第一空间异常型的雨季平均水位时空分布特征为:1962—2016 年站点的平均水位有下降趋势。1991 年之前,水位的平

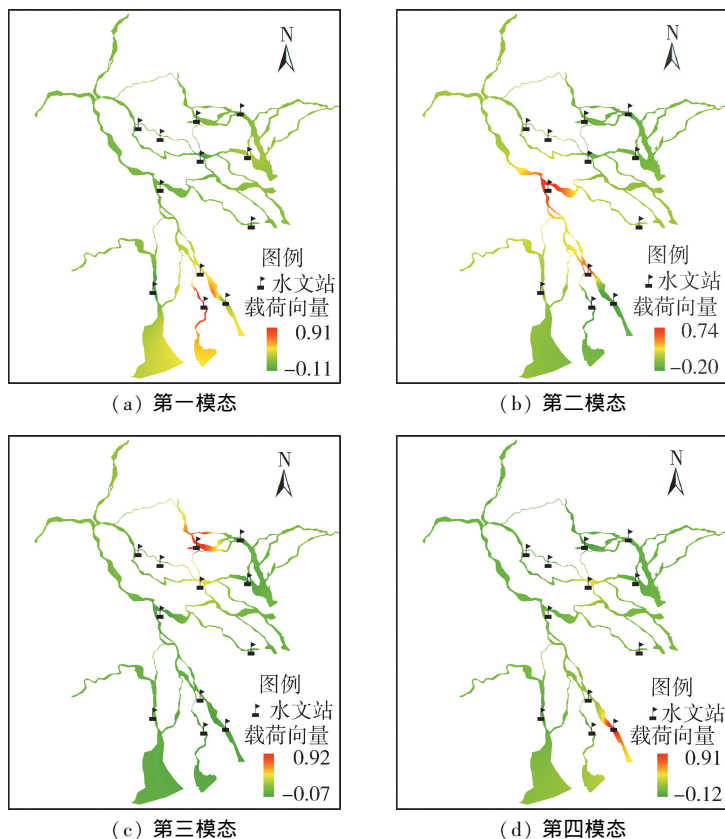


图2 珠江三角洲河网区前4个主要旋转载荷向量的空间模式

Fig.2 Spatial patterns of first four major rotated loading vectors in river network area of Pearl River Delta region

均年际变化率较小,1991年之后年际变化率较大。在1962—1964年、1971—1974年、1991—2003年3个时间段,水位的平均年际变化率最大。雨季平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1994年。

由图2(b)可知,第二空间模态的正值中心位于研究区域中部,以南华、竹银两个水文站为主,其中南华站的载荷向量正值最高,达到0.74,定义为第二空间异常型。结合图3、图4对应的时间序列图,第二空间异常型的旱季平均水位时空变化特征为:1962—2016年正值中心区站点的水位变化趋势为先上升再下降,转折点位于2003—2005年之间。1984年之前,水位的平均年际变化率较大,1984年之后平均年际变化率较小。1980—1984年,水位的平均年际变化率最大。平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1983年。第二空间异常型的雨季平均水位时空分布特征为:1962—2016年正值中心区站点的水位变化趋势为先上升再下降,在1962—1964年、1967—1974年、1991—2003年3个时间段,水位的平均年际变化率较大,1974—1991年水位的平均年际变化率较小。平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1973年。

由图2(c)可知,第三空间模态的正值中心位于研究区域的北部,以广州浮标厂、三善濠站为主,其中广州浮标厂的载荷向量正值最高,达到0.92,定

义为第三空间异常型。结合图3、图4对应的时间序列图,第三空间异常型的旱季平均水位时空变化特征为:1962—2016年正值中心区站点的水位变化趋势为先上升再下降,转折点位于1991—1993年之间。在1969—1973年、1982—1984年2个时间段,水位的平均年际变化率较大。平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1983年。第三空间异常型的雨季平均水位时空分布特征为:1962—2016年站点的水位变化趋势为先上升再下降,在1962—1964年、1991—2003年这2个时间段,水位的平均年际变化率较大,1974—1991年水位的平均年际变化率较小。平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1994年。

由图2(d)可知,第四空间模态的正值中心位于研究区域东南部,北江下游接近入海口处,以灯笼山站为主,载荷向量正值最高,达到0.91,定义为第四空间异常型。结合图3对应的时间序列图,第四空间异常型的旱季平均水位时空变化特征为:在1962—2016年时间区间正值中心区站点的水位变化趋势为先上升再下降,转折点位于1991—1993年之间。1980—1984年,水位的平均年际变化率较大,1985—1995年平均水位的年际变化率较小。平均水位最低值出现在1963年,最高值出现在1983年。第四空间异常型的雨季平均水位时空变化特征

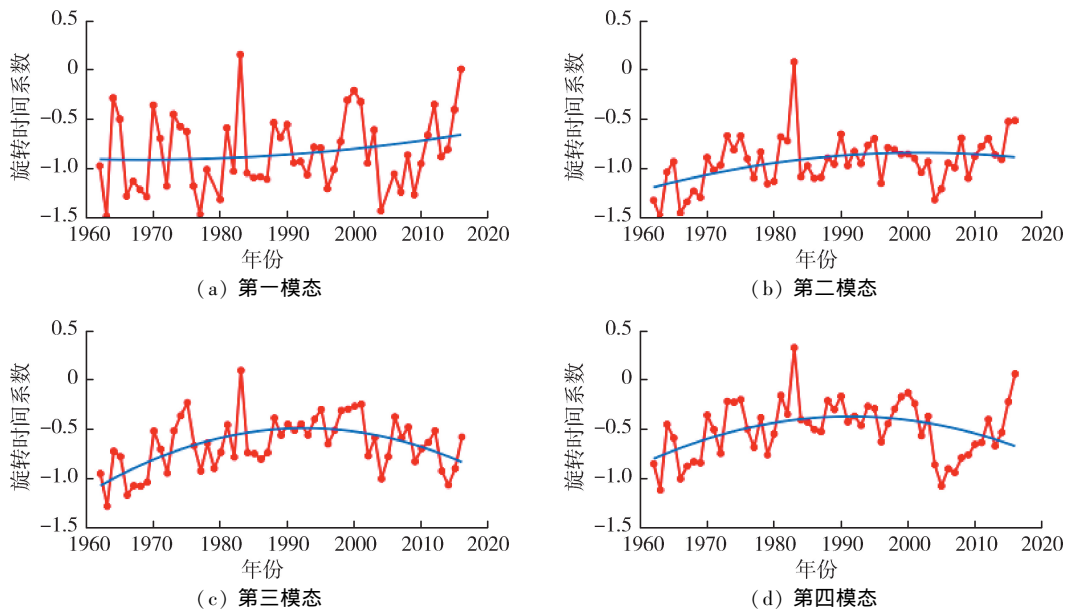


图3 前4个主要旋转载荷向量对应的旱季主成分序列

Fig.3 Principal components of first four major rotated loading vectors for dry season

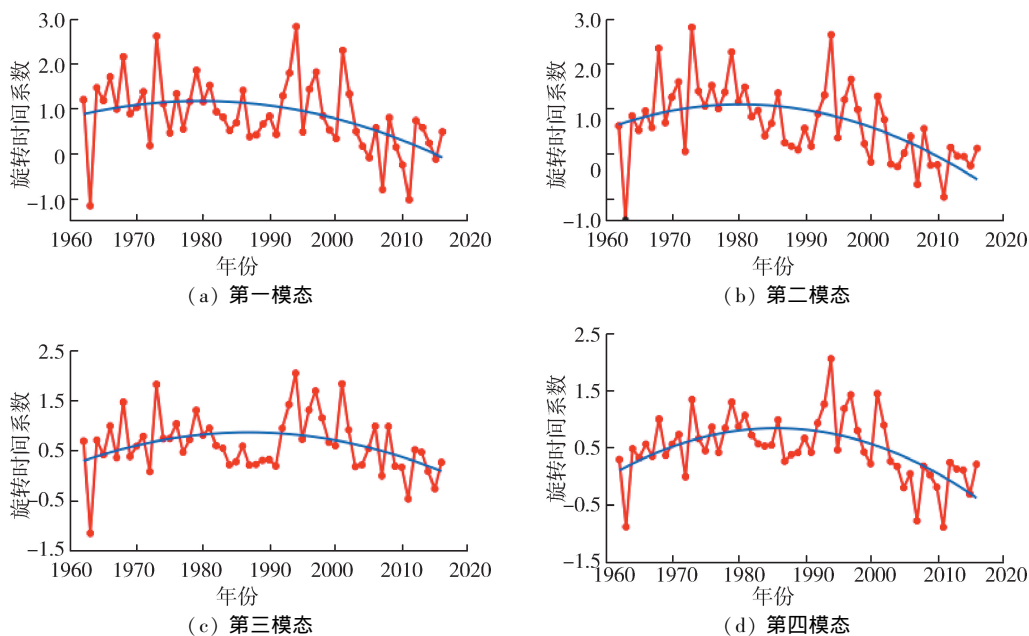


图4 前4个主要旋转载荷向量对应的雨季主成分序列

Fig.4 Principal components of first four major rotated loading vectors for rainy season

为:1962—2016 年时间区间正值中心区站点的水位变化趋势为先上升再下降,转折点位于1986—1988 年之间。在1962—1964 年、1991—2003 年这2 个时间段,水位的平均年际变化率较大,1974—1991 年水位的平均年际变化率较小。平均水位最低值出现在1963 年,最高值出现在1994 年。

2.3 水位变化趋势的时空分布

图5 给出了1962—2016 年珠江三角洲河网区12 个站点各月的平均水位序列的 Mann-Kendall 趋势检验结果,图中各站点按照纬度从高到低排列。研究区域内呈现水位降低趋势的月份主要集中在8—9 月,其中有5 个站点的水位在8—9 月有显著

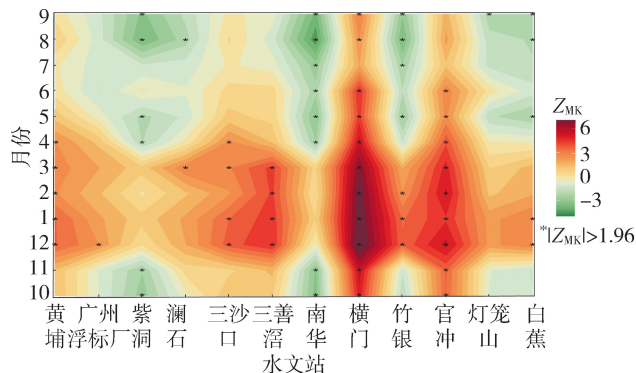


图5 各水文站水位 Mann-Kendall 趋势值分布

Fig.5 Distribution of Mann-Kendall trend value of water level at each hydrological station

的下降趋势。呈现水位升高趋势的月份主要集中在1—3月和12月,超过一半的站点水位在这几个月有显著的上升趋势。在旱季(1—3月和10—12月),各月份站点的水位变化趋势以上升为主,其中大部分站点的月平均水位上升趋势显著;在雨季(4—9月),各月份站点水位的趋势变化中上升和下降趋势相对均匀分布,小部分站点的月平均水位呈显著的上升或下降趋势。由图6可得各站点全年、

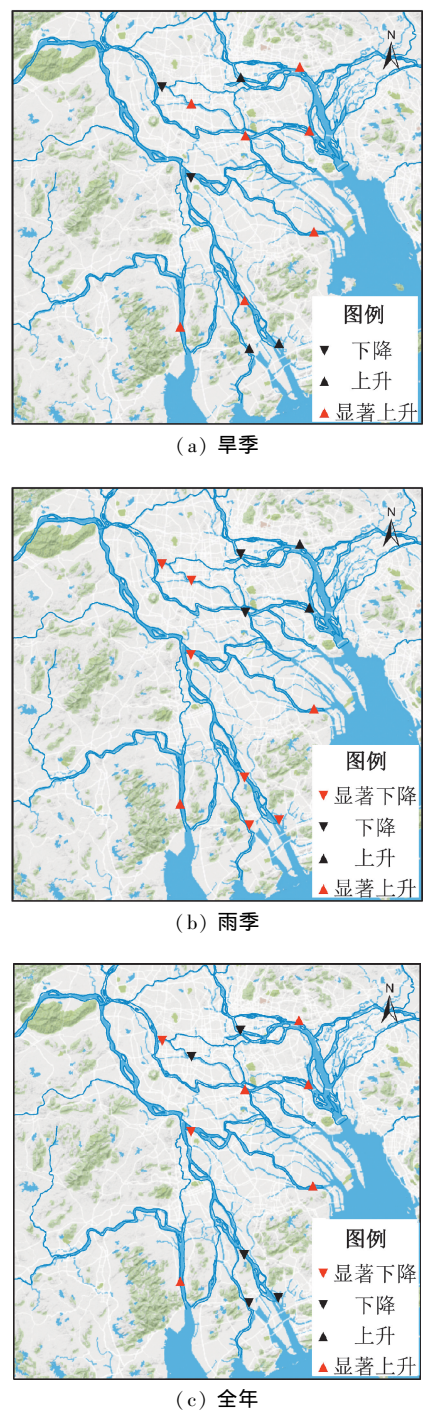


图6 各水文站旱季、雨季和全年平均水位变化趋势
Fig. 6 Variation trend of average water level in dry season and rainy season and annual average water level at each hydrological station

旱季和雨季平均水位趋势变化的空间分布。在旱季,10个站点的水位有上升趋势,仅有2个站点有下降趋势,其中研究区域的中部、东部,西江和东江下游接近入海口处的7个站点水位上升趋势显著,有下降趋势的站点位于研究区域西北部,且下降趋势不显著。在雨季,有4个站点水位有上升趋势,8个站点水位有下降趋势,水位有上升趋势的站点主要位于研究区域的最东部,东江与西江入海口处,水位有显著下降趋势的6个站点位于北江支流下游和研究区域西北部。全年来看,有5个站点水位有上升趋势,且上升趋势显著;7个站点水位有下降趋势,水位有显著上升趋势的站点主要位于研究区域的最东部,东江与西江入海口处。水位有显著下降趋势的2个站点位于研究区域西北部。下降趋势的出现可能是因为近年来人类大规模采砂,造成珠江三角洲河网区河道明显下切,且部分河道疏浚也加剧了河床的下切,水位随之大幅下降^[26]。而表现为上升趋势的站点全部靠近河口,受全球海平面上升的影响较大^[27],加上这些地区人类采砂规模相对较小,前者产生的影响比后者大,河道总体呈淤积状态,水位上升。全年来看,水位呈上升趋势的站点分布与旱季的类似,主要位于东江和西江的下游接近入海口处,且大部分站点的上升趋势显著。水位呈下降趋势的站点位于北江下游接近入海口处和研究区域西北部。大部分站点旱季与雨季的水位变化趋势基本一致。但澜石站和竹银站旱季水位有显著上升趋势,雨季水位有显著下降趋势。白蕉站和灯笼山站旱季水位有上升趋势,雨季水位有显著下降趋势。这类异常现象可能是人类活动与全球海平面上升共同作用,且人类活动在空间分布上具有不均匀性导致的^[11]。

3 结 论

a. 珠江三角洲河网区12个水文站的月平均水位高值区位于研究区域上游,低值区位于东江下游接近入海口处。站点的平均水位由西向东、由北向南递减。整体递减方向与水系的方向相同,其中东西方向的递减更明显。

b. 对珠江三角洲河网区的12个水文站的月平均水位的REOF分析表明,前4个空间模式方差贡献率达61.17%,可以基本表现出该区域的水位时空变化特征。其中第一模态是珠江三角洲河网区水位变化的主要特征,方差贡献率达到了23.59%。4个空间模态对应4个空间异常型,分别对应研究区域的南部、中部、北部和东南部。分区结果体现了较强的地域特征,涵盖了整个珠江三角洲河网区的大

部分区域。各空间异常型在旱季和雨季表现的水位变化趋势有所区别,具体为第一空间异常型表现为旱季有水位上升的趋势,雨季有水位下降的趋势。第二、三、四空间异常型均表现为旱季和雨季水位有先上升再下降的趋势。

c. Mann-Kendall 趋势分析结果表明,水位呈显著上升趋势的月份主要集中1—3月以及12月。水位呈显著下降趋势的月份主要集中在8—9月。水位呈上升趋势的月份占主导。从空间上来看,位于西江与东江下游区域的站点平均水位主要呈上升趋势,位于研究区域西北部和北江下游的站点,平均水位主要呈下降趋势。

参考文献:

- [1] MÄNNIKUS R, SOOMERE T, VIŠKA M. Variations in the mean, seasonal and extreme water level on the Latvian coast, the eastern Baltic Sea, during 1961-2018 [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 245: 106827.
- [2] MUDERSBACH C, WAHL T, HAIGH I D, et al. Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes [J]. Continental Shelf Research, 2013, 65: 111-120.
- [3] 陈晓宏, 陈永勤. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因[J]. 地理学报, 2002 (4): 429-436. (CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin. Hydrological change and its causes in the river network of the Pearl River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2002 (4): 429-436. (in Chinese))
- [4] 时翠, 陈晓宏, 张强. 近几十年来珠江三角洲1月和7月水位变异分析[J]. 热带地理, 2012, 32 (3): 233-240. (SHI Cui, CHEN Xiaohong, ZHANG Qiang. Change-points of water levels in the Pearl River Delta in January and July for the last decades [J]. Tropical Geography, 2012, 32 (3): 233-240. (in Chinese))
- [5] ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China [J]. Global and Planetary Change, 2009, 69 (1): 35-47.
- [6] 陈晓宏, 张蕾, 时钟. 珠江三角洲河网区水位特征空间变异性研究[J]. 水利学报, 2004 (10): 36-42. (CHEN Xiaohong, ZHANG Lei, SHI Zhong. Study on spatial variability of water levels in river net of Pearl River Delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (10): 36-42. (in Chinese))
- [7] 唐亦汉, 陈晓宏, 邓攀攀. 气候变化下珠江三角洲网河区洪潮耦合高水位的集中期特征及变异规律[J]. 水文, 2017, 37 (3): 42-47. (TANG Yihan, CHEN Xiaohong, DENG Panpan. High water level seasonality under

- influence of changing climate driven flood-tide coupling mechanism: a case study of Pearl River Delta [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37 (3): 42-47. (in Chinese))
- [8] 杨清书, 罗章仁, 张修杰. 珠江三角洲近几十年水位变化趋势研究[J]. 热带海洋, 1998, 17 (2): 9-14. (YANG Qingshu, LUO Zhangren, ZHANG Xiujie. Secular trend of water level change in Zhujiang River Delta in recent decades [J]. Journal of Tropical Oceanography, 1998, 17 (2): 9-14. (in Chinese))
- [9] 蒋陈娟, 杨清书, 戴志军, 等. 近几十年来珠江三角洲网河水水位时空变化及原因初探[J]. 海洋学报 (中文版), 2012, 34 (1): 46-56. (JIANG Chenjuan, YANG Qingshu, DAI Zhijun, et al. Spatial and temporal characteristics of water level change and its causes in the Zhujiang Delta in recent decades [J]. Journal of Oceanography (Chinese Version), 2012, 34 (1): 46-56. (in Chinese))
- [10] 谢凌峰, 申其国, 徐治中. 20 世纪 80 年代以来珠江三角洲网河区河性演变[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (4): 10-13. (XIE Lingfeng, SHEN Qiguo, XU Zhizhong. Evolution of river characteristics in river network of Pearl River Delta since 1980s [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (4): 10-13. (in Chinese))
- [11] 孔兰, 陈晓宏. 珠江口潮水位年内变化特征识别[J]. 水资源保护, 2013, 29 (2): 6-9 (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Recognition of characteristics of inner-annual variation of water levels in Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (2): 6-9. (in Chinese))
- [12] PEARSON K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. Philosophical Magazine Series 6, 1901, 2 (11): 559-572.
- [13] HOREL J D. A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern Hemisphere 500 mb height field [J]. Monthly Weather Review, 1981, 109 (10): 2080-2092.
- [14] RICHMAN M B. Review article rotation of principal components [J]. Journal of Climatology, 1986, 6 (3): 293-335.
- [15] RICHMAN M B. Rotation of principal components: a reply [J]. Journal of Climateology, 1987, 7 (5): 511-520.
- [16] DIETMAR D, MOJIB L. A cautionary note on the interpretation of EOFs [J]. Journal of Climate, 2002, 15 (2): 216-225.
- [17] JOLLIFFE I T, TRENDAFILOV N T, UDDIN M. A modified principal component technique based on the LASSO [J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2003, 12 (3): 531-547.
- [18] AMBAUM M, HOSKINS B J, STEPHENSON D B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? [J]. Journal of

- Climate, 2001, 14(16): 3495-3507.
- [19] CHEN Xinhua, DUNKERTON T J. Orthogonal rotation of spatial patterns derived from singular value decomposition analysis[J]. Journal of Climate, 1995, 8(11): 2631-2643.
- [20] RICHMAN M B. Obliquely rotated principal components: an improved meteorological map typing technique[J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(10): 1145-1159.
- [21] 曹鸿兴. 评新书《现代气候统计诊断与预测技术》[J]. 应用气象学报, 2000(1): 128. (CAO Hongxing. Review of modern statistical climate diagnosis and prediction technology[J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2000(1): 128. (in Chinese))
- [22] 刘晓琼, 孙曦亮, 刘彦随, 等. 基于 REOF-EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J]. 地理研究, 2020, 39(5): 1215-1232. (LIU Xiaoqiong, SUN Xiliang, LIU Yansui, et al. Spatial division of climate change and its evolution characteristics in Southwest China based on REOF-EEMD[J]. Geographic Research, 2020, 39(5): 1215-1232. (in Chinese))
- [23] 董恒鑫, 张子璐, 张芯瑜, 等. 1961—2017 年长江中下游冬季降雪气候特征及其变化分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 38(2): 12-17. (DONG Hengxin, ZHANG Zilu, ZHANG Xinyu, et al. Analysis of climate characteristics and changes of winter snowfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2017[J]. Journal of Yangtze River Scientific Institute, 2020, 38(2): 12-17. (in Chinese))
- [24] 赵军凯, 李立现, 李九发, 等. 人类活动对鄱阳湖水位变化的影响[J]. 水文, 2020, 40(4): 53-60. (ZHAO Junkai, LI Lixian, LI Jiufa, et al. Response of stage variation of the Poyang Lake to human activities[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(4): 53-60. (in Chinese))
- [25] 吴赣昌. 概率论与数理统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009.
- [26] 陆永军, 季荣耀, 王志力, 等. 珠江三角洲网河区低水位时空变化规律[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 800-809. (LU Yongjun, JI Rongyao, WANG Zhili, et al. Spatial-temporal variation of low water level in the channel network system of the Pearl River Delta[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(6): 800-809. (in Chinese))
- [27] 孔兰, 陈晓宏, 陈栋为, 等. 珠江三角洲水位演变分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2642-2646. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, CHEN Dongwei, et al. Analysis on evolution of water level in Pearl River Delta, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2642-2646. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-12-29 编辑: 俞云利)

(上接第 118 页)

- [24] 黄鑫鑫, 许新宜, 王韶伟, 等. 我国污水资源化存在的问题与对策[J]. 中国水利, 2012(增刊 1): 73-75. (HUANG Xinxin, XU Xinyi, WANG Shaowei, et al. Problems and countermeasures of sewage recycling in my country[J]. China Water Resources, 2012(Sup 1): 73-75. (in Chinese))
- [25] 李昆, 魏源送, 王健行, 等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1635-1653. (LI Kun, WEI Yuansong, WANG Jianxing, et al. Water reclamation: standards comparison and cost analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(7): 1635-1653.
- [26] 范育鹏, 陈卫平. 北京市再生水利用生态环境效益评估[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 4003-4008. (FAN Yupeng, CHEN Weiping. Assessment of ecological environment benefits of reclaimed water reuse in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 4003-4008. (in Chinese))
- [27] DUONG K, SAPHORES J D M. Obstacles to wastewater reuse: an overview[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2015, 2(3): 199-214.
- [28] 王茜, 邹环, 王红瑞, 等. 再生水利用对土壤和地下水的的影响研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 104-113. (WANG Qian, XUN Huan, WANG Hongrui, et al. Review about effects of reclaimed water usage on soil and groundwater[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 104-113. (in Chinese))
- [29] 胡洪营, 石磊, 许春华, 等. 区域水资源介循环利用模式: 概念·结构·特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 839-847. (HU Hongying, SHI Lei, XU Chunhua, et al. Water meta-cycle for regional water sustainable management: concept, system structure and advantages[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 839-847. (in Chinese))
- [30] 郑德凤, 张雨, 魏秋蕊, 等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 24-32. (ZHENG Defeng, ZHANG Yu, WEI Qiurui, et al. Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 24-32. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-12-17 编辑: 施业)