

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.027

基于 pair-copula 结构的珠江三角洲河网区 水位空间依赖性分析

范敏韬^{1,2}, 谢宇莹³, 余贞燕^{2,4}, 余龙飞^{1,2}, 林凯荣^{1,2}, 刘智勇^{1,2}

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
3. 广东省水文局佛山水文分局, 广东 佛山 528010; 4. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东 广州 510275)

摘要:基于 1957—2016 年珠江三角洲河网区 15 个水文站月平均水位资料, 利用 pair-copula 结构构建水位空间依赖性模型生成样本数据, 并采用 F-madogram 方法定量评估不同时期、不同时间尺度和不同距离范围内珠江三角洲河网区的水位空间依赖性。结果表明: 珠江三角洲河网横向发育区域比东南 45° 方向发育区域水位空间依赖性弱; 夏季丰水期水位空间依赖性比冬季枯水期水位空间依赖性显著增强, 且季节尺度下水位空间依赖性比全年尺度下水位空间依赖性弱; 受人类活动影响, 在远距离情况下夏季丰水期 1987—2016 年的水位空间依赖性比 1957—1986 年显著增强; 在较小距离范围内年极小月水位 1987—2016 年的空间依赖性比 1957—1986 年显著减弱, 在远距离情况下年极大月水位 1987—2016 年的空间依赖性比 1957—1986 年显著增强。

关键词:空间依赖性; pair-copula 结构; F-madogram 函数; 水位; 珠江三角洲河网

中图分类号:P332.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0222-07

Analysis of spatial dependence of water level in river network area of Pearl River Delta based on pair-copula construction // FAN Mintao^{1,2}, XIE Yuying³, SHE Zhenyan^{2,4}, YU Longfei^{1,2}, LIN Kairong^{1,2}, LIU Zhiyong^{1,2} (1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Laboratory of Marine Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3. Foshan Branch of Guangdong Hydrology Bureau, Foshan 528010, China; 4. School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the monthly mean water level data of 15 hydrological stations in river network area of the Pearl River Delta from 1957 to 2016, a water level spatial dependence model was established using the pair-copula construction to generate samples, and the F-madogram method was used to quantitatively evaluate the spatial dependence of water level in river network area of the Pearl River Delta in different stages and distance ranges at different time scales. The results show that the spatial dependence of water level in the area with river network developing in the transverse direction is weaker than that in the 45° southeast direction in river network area of the Pearl River Delta, the spatial dependence of water level in wet season is significantly stronger than that in dry season, and the spatial dependence of water level at seasonal scale is weaker than that at annual scale. Due to the influence of human activities, the spatial dependence of water level in wet season from 1987 to 2016 was significantly enhanced compared with that in the period of 1957 to 1986 in a large distance range. In a small distance range, the spatial dependence of annual minimum monthly water level from 1987 to 2016 was significantly weaker than that in the period of 1957 to 1986, and the spatial dependence of annual maximum monthly water level from 1987 to 2016 was significantly enhanced compared with that in the period of 1957 to 1986.

Key words: spatial dependence; pair-copula construction; F-madogram function; water level; river network of Pearl River Delta

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001000); 国家自然科学基金(52179031); 珠江人才计划团队项目(2019ZT08G090); 广东省自然科学基金(2020A151010559)。

作者简介:范敏韬(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: fanmt5@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

随着气候变化和大规模人类活动的开展,降雨、水位、蒸发等水文要素的时空模式发生了改变,水资源形势愈发严峻。水文要素的空间分布特征及空间依赖关系已成为水循环与水资源演化规律研究中的重要内容之一^[1]。根据 Tobler 第一定律^[2],空间上越接近的两点性质越相似,Tobler 第一定律虽然存在一定的局限性,但在大多数情况下都是适用的^[3]。水位作为一种常见的水文变量,通常在空间上存在着不同程度的依赖性,随着距离增大,这种空间依赖性会衰减。开展空间依赖性研究对水文极值事件的区域风险评估、极端水文事件的空间变异性及演变规律的研究具有重要意义。近年来国内外学者已经开展该领域的研究和探讨,如 Plewa 等^[4]以年最高水位和月最高水位数据为基础,选用 Spearman 秩相关、线性回归方法和 Copula 相关分析法分析了波罗的海附近 6 个湖泊水位与波罗的海水位之间的相关性;Asadi 等^[5]研究表明,不同地点洪水的空间依赖性随着沿河网站点间的距离增加而减小;陈晓宏等^[6]基于区间化变量理论,揭示了珠江三角洲河网区水位的空间结构性以及水位关联性。目前,对于水位空间特征的研究更加关注于构建考虑空间依赖关系的模型、评估不同模型的模拟效果等方面,而空间依赖性并非是一成不变的,很多因素都会扰动其稳定性,尤其是在下垫面情况发生了较大变化的区域或流域,水文要素的空间结构往往会发生变异,相应的空间依赖结构也会发生变化。因此,评估空间依赖性及其变化有助于更加深入了解水文要素的空间格局及演变规律。

近年来全球气候变暖,加上人类对珠江三角洲的大规模开发,珠江三角洲的地形以及水文要素特征发生了剧烈的变化^[7-9]。陈晓宏等^[10]通过分析珠江三角洲河网区近年来人类活动和水文特征资料,发现该地区近年来水文与地貌特征发生了显著异变,且人类活动是造成该现象的主要原因。自 20 世纪 80 年代以来,针对珠江三角洲河网区的开发措施中以河道采砂、围耕筑闸、建设桥梁和河滩工程为主,这些活动都会对河道产生影响,进而引起水位特征的改变。朱金格等^[11]针对不同时期珠江三角洲河网区的水位流量进行数值模拟,结果表明河网区水位流量关系发生明显变化;张蔚等^[12-13]采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验和 Pettitt 突变检验分析了河网区 17 个站点的年际潮差变化趋势,认为人为活动极大地改变了潮差。众多关于珠江三角洲的水位变化趋势研究都得出了类似的结论^[14-15]。为了更加深入地研究珠江三角洲水位特征,也有学者研究了该区域水位在空间尺度上的变异性,如杨清

书等^[16]分析了珠江三角洲 20 个站点的水位变化趋势,并计算区域水位的平均变化趋势,发现该区域水位变化总体呈上升趋势,而局部呈现下降的趋势;蒋陈娟等^[17]研究表明,珠江三角洲河网区从上段到下段水位变化率逐渐增大,变化趋势发生逆转。

以往关于水位的研究,主要是从站点的角度分析水位变化趋势和频率特征、极端事件的概率和周期特征等^[6,10,17],而从空间上解析复杂河网区的水位空间依赖性并进行稳定性分析的研究还鲜有报道。河网区水位变异不仅发生在某个特定站点,通常在多个站点或者某段河道乃至整个河网区都可能发生。为了定量表征和模拟河网区的水位空间依赖性,研究站点之间水位空间依赖性在时间上的变异性,本文基于珠江三角洲河网区水位资料,利用 pair-copula 结构构建河网区水位空间依赖性模型,以 F-madogram 值作为空间依赖性度量,从时间、气候、地形等方面探究珠江三角洲河网区发生变化后的水位空间依赖性,以期对珠江三角洲防洪抗旱压咸措施的制定和灾害风险控制提供参考。

1 研究区概况及数据来源

珠江三角洲处于珠江下游,位于东经 $112^{\circ}45' \sim 113^{\circ}50'$ 、北纬 $21^{\circ}31' \sim 23^{\circ}10'$,属于较为典型的河网型三角洲(图 1)。弯曲交错的水系,加上“三面环山、一面临海,三江汇合、八口分流”的独特地形地貌,使得珠江三角洲的水文情况十分复杂^[18]。珠江三角洲河网区水位受径流、潮流、河段断面空间等几大因素协同影响,水位高低与上游来水和外海的潮水直接相关。人类开发使得珠江三角洲河网区的地质情况发生很大变化,加上全球气候变化的影响,水位特征也随之发生了不同程度的变异。

本文选取珠江三角洲河网区 15 个潮位站点 1957—2016 年月平均水位观测数据研究珠江三角洲河网区水位空间依赖性。潮位站分布如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 Copula 函数和 pair-copula 结构

Copula 函数起源于 Sklar 定理^[19],是模拟水文事件和捕捉其相关性的一种较为有效的方法,基于 Copula 函数的模型已广泛应用于水文频率分析、降水预测和干旱识别等领域^[19-20],并扩展到模拟极端水文事件的空间依赖性和捕捉这些事件的多元性质^[21-22],能够较好地空间建模,并应用于水文水资源多变量联合分布模拟^[23-24]。但是在高维多变量的建模中,普通的 Copula 函数往往不能直接运用,如 Archimedean copula 函数多数情况下只适用于

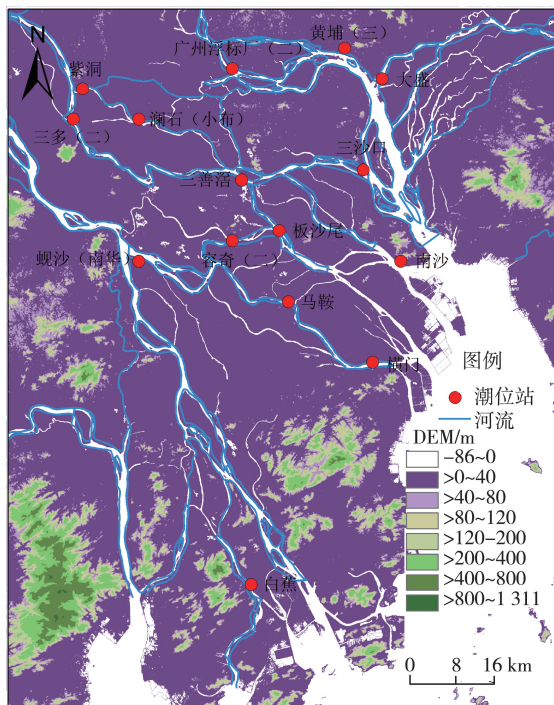


图1 研究区域及潮位站分布

Fig.1 Study area and tide station distribution

描述两个变量,无法准确描述多变量的相关结构^[25]。为了解决这一问题,Joe^[26]提出了 vine-copula 结构,将一个 n 维多元密度函数分解为 $n(n-1)/2$ 个二维 Copula 密度函数,通过双变量 Copula 函数的相互联结形成更高维的结构,即 pair-copula 结构。在维度较高时,pair-copula 结构的分解有多种方式,Bedford 等^[27]引入了被称为“藤”的图形来描述分解过程,其中两种最为简单的藤联结方式为 canonical vine (C-vine) 和 drawable vine (D-vine)。C-vine copula 分解更适用于分析多变量中存在主导作用变量的问题,而 D-vine copula 则更适用于变量之间相互独立的情况。考虑到本文计算的水位空间依赖关系是某一个站点与周边其他站点之间的属性,此时该站点起主导作用,故采用 C-vine 的联结方式。

2.2 基于 pair-copula 结构的空间依赖性模型构建

首先对 15 个站点的月平均水位数据拟合合适的边缘分布,本研究中采用正态分布 (Normal)、伽马分布 (Gamma) 分布、对数正态分布 (Lognormal) 和威布尔分布 (Weibull) 分布这 4 种常用的分布类型分别进行拟合,选取卡方统计量最小,且 p 值大于显著性水平 ($\alpha = 0.05$) 的分布作为最优边缘分布函数。完成边缘分布拟合后,采用多种 Copula 函数构建数据的联合依赖结构,基于 pair-copula 结构构建 15 维水位空间依赖性模型(以下简称 pair-copula 结构模型)。模型的预测性能可能会因模型结构、双

变量 Copula 函数和双变量参数的变化而有所不同。根据 Akaike 信息准则 (Akaike information criterion, AIC),可确定各变量对的最优拟合双变量 Copula 函数和 pair-copula 结构模型^[28],当 AIC 统计量最小时,认为该分层 vine-copula 结构的双变量 Copula 函数最优。采用的双变量 Coupla 函数有 Gaussian、student- t 、Gumbel、Joe 等。通过 pair-copula 结构模型可生成能够还原水位空间依赖性的样本数据,pair-copula 结构模型的构建通过 R 语言中的 vine-copula 包实现^[25]。

2.3 空间依赖性的 F-madogram 测定方法

Cooley 等^[29-30]构建的 F-madogram 函数被广泛用于评估变量的空间依赖关系。本文利用 F-madogram 值定量评估站点水位空间依赖性。通过 pair-copula 结构模型生成一定数量的水位样本数据,利用站点水位数据以及各站点之间的距离计算 F-madogram 值。F-madogram 值越大,两个站点水位空间依赖性越弱;F-madogram 值越小,两个站点水位空间依赖性越强。

3 结果与分析

3.1 河网区站点水位间的相关关系

选用珠江三角洲地区 1957—2016 年 15 个潮位站的月平均水位数据,采用 Pearson 相关系数对两两站点间的水位进行相关性分析,绘制出各站点水位间的相关系数矩阵(图 2)。结果表明,Pearson 相关系数在 0.66~0.99 之间,各站点水位间存在较强的

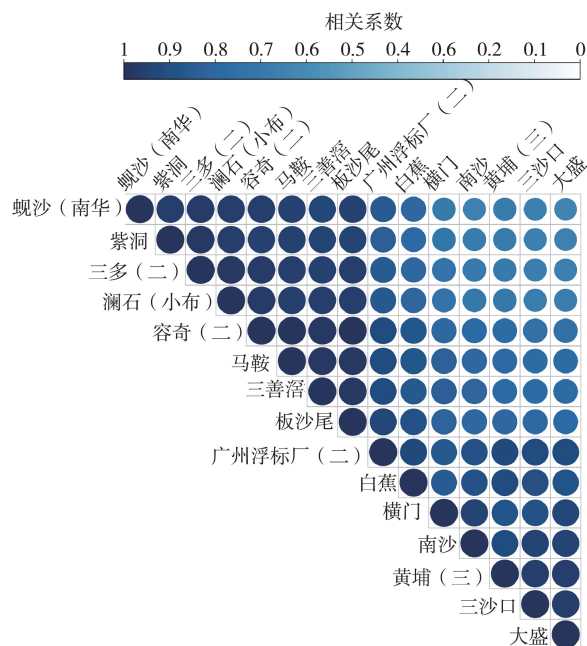


图2 珠江三角洲河网区各站点水位间相关系数矩阵

Fig.2 Correlation coefficient matrix of water level at different gauges in river network area of Pearl River Delta

相关性。从单个站点来看,与其他站点水位相关系数均值最高的站点为紫洞站,均值高达 0.90;相关系数均值最低的站点为广州浮标厂(二)站,均值为 0.80。出海口附近的站点水位与其他站点水位的相关系数均值普遍偏低,南沙、横门、白蕉站水位与其他站点水位的相关性系数均值分别为 0.81、0.83 和 0.82。

3.2 河网区水位空间依赖性

站点水位间的相关分析并不能精准描述水位间的空间依赖性,因此进一步构建 pair-copula 结构模型,探究水位空间依赖性的稳定性。

利用 pair-copula 结构模型生成与原始数据长度相同的水位样本数据,分别计算原始数据与模拟样本的 F-madogram 值,绘制两组数据散点图进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,样本值基本能够覆盖观测值,通过 student-*t* 检验发现两组数据差异并不显著(*p* 值为 0.998),pair-copula 结构模型生成的样本计算结果与原始数据计算结果吻合程度较好,说明模型整体模拟效果较好。图 3 表明,随着站点间距离增大,实测和模拟数据计算的 F-madogram 值有逐渐增大的趋势,各站点水位空间依赖性逐渐减弱。

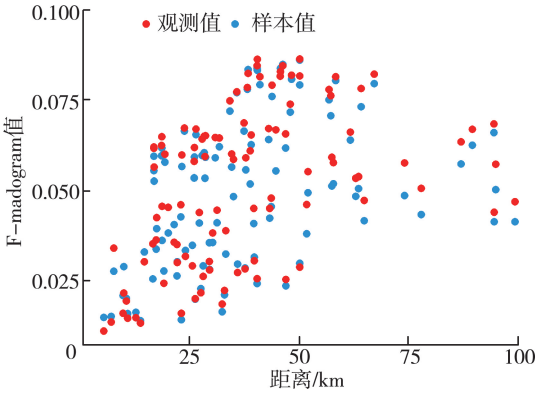


图3 pair-copula 结构模型模拟的样本值和观测值的 F-madogram 值

Fig.3 F-madogram values of observations and samples simulated by pair-copula construction model

3.3 河网区水位空间依赖性影响因素分析

3.3.1 河网发育方向对空间依赖性的影响

除了站点间的距离,地理条件也会对站点水位空间依赖性造成较大的影响,使其不稳定。基于研究区域地理特征和多年平均水位递减方向与水系方向一致性的空间分布特征^[31],将所有站点分为两个半区,紫洞、三多(二)、澜石(小布)、广州浮标厂(二)、黄埔(三)、三善滘、大盛以及三沙口站为河网区北半区,其余站点为南半区。北半区为河网区上部和腹地,这部分河流整体上横向发育;南半区对应河网区中部与下部,河流多为东南 45° 方向发育。

分别对两个区域水位建模,生成水位样本数据,计算 F-madogram 值,绘制两个区域的 F-madogram 值箱线图(图 4)。结果显示北半区的 F-madogram 值比南半区略大,即南半区水位空间依赖性更强。珠江三角洲河网区的面积小,气候因子在空间上差异不大,地势较为平坦,地形对水位空间依赖性造成的影响不明显,而水系发育走向对水位空间依赖性存在一定的影响。北半区水位空间依赖性比南半区稍弱这一现象符合前人研究中得出的结论,即在珠三角河网区东南 45° 方向上,沿南北方向发育的河道,其水位空间相关性比较强;而在河网区西南 45° 方向上,沿东西方向发育的河道,其水位空间相关性弱^[6],对应着珠江三角洲河网区水位的条状分布,这一现象可能由环境条件的垂直差异和水平差异所致。

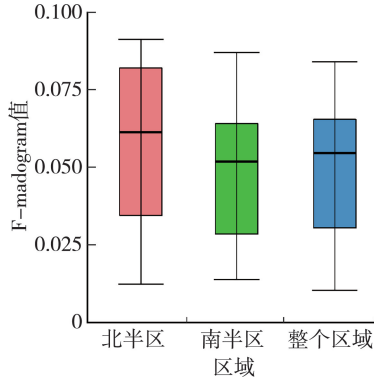


图4 不同区域水位模拟值的 F-madogram 值箱线图
Fig.4 Boxplots for F-madogram value of simulated water level in different regions

3.3.2 季节对空间依赖性的影响

水位作为一种水文要素,存在季节差异性。本研究择取夏季丰水期(6 月、7 月、8 月)与冬季枯水期(12 月、1 月、2 月)的月平均数据,基于 pair-copula 结构模型和 F-madogram 测定方法进一步探究珠江三角洲河网区在夏季丰水期和冬季枯水期水位空间依赖性的稳定性。

图 5 为 pair-copula 结构模型模拟的不同时间尺度下水位的 F-madogram 值箱线图(图中 *、* *、* * *、* * * * 分别表示两者差异通过 0.05、0.01、0.001、0.000 1 显著性水平的 student-*t* 检验,下同)。根据站点间距离划分为 3 个距离范围(0 ~ 25 km、> 25 ~ 50 km、> 50 km),从图 5 可以看出,不同距离范围内夏季丰水期和冬季枯水期 F-madogram 值相较全年有显著增大,表明季节尺度下水位空间依赖性比全年尺度下水位空间依赖性弱,Rupa 等^[32]研究也发现了相似的规律。此外,不同距离范围内冬季枯水期 F-madogram 值都显著高于夏季丰水期。

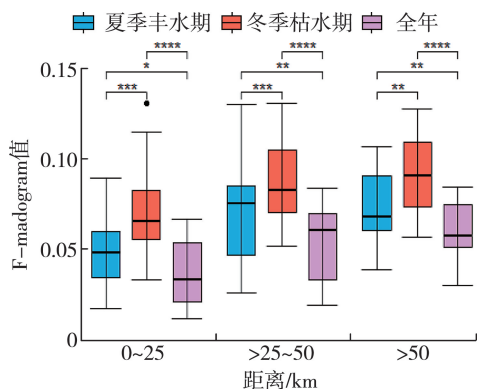


图5 不同时间尺度下水位模拟值的 F-madogram 值箱线图
Fig. 5 Boxplots for F-madogram value of simulated water levels at different time scales

3.3.3 人类活动对空间依赖性的影响

20 世纪 80 年代人工挖沙、筑闸以及海平面上升等,给珠江三角洲河网区的水文特征带来了较大影响,选取珠江三角洲河网区人类活动较为频繁、河道情况前后变化比较大的 1986 年作为时间节点,将时间序列划分为 1957—1986 年(阶段 1)、1987—2016 年(阶段 2)两个阶段进行水位空间依赖性分析,以探究人类活动对河网区水位空间依赖关系的影响。图 6 为 pair-copula 结构模型模拟的不同阶段

水位的 F-madogram 值箱线图(图中没有 * 的情况表示两者差异不显著,下同)。从图 6 中可以看出,两个阶段模拟水位全年 F-madogram 值变化并不显著,水位空间依赖性相差不大;当站点间距离大于 50 km 时,阶段 2 夏季丰水期水位空间依赖性较阶段 1 显著提高,其他两个距离范围则无明显差异;两个阶段冬季枯水期在不同距离范围内水位空间依赖性均无明显差异。

总体上水位空间依赖性在时间上的差异并不明显,为了进一步研究两个阶段空间依赖性的变化情况,采用年极值月水位对两个阶段水位空间依赖性进行分析。图 7(a)表明,在站点间距离较小(0 ~ 50 km)的情况下,年极小月水位在阶段 2 的空间依赖性相比阶段 1 显著减弱;图 7(b)表明,在站点间距离大于 25 km 的情况下,年极大月水位在阶段 2 的空间依赖性相比阶段 1 有所增强,在远距离(> 50 km)的情况下这一现象尤为显著,说明远距离情况下阶段 2 各站点间极端高水位的空间依赖性较强,当一个站点水位高涨,其他站点也可能出现同样的现象,洪涝风险可能会加大。

珠江三角洲地区河流短时间汇流出海的水量受

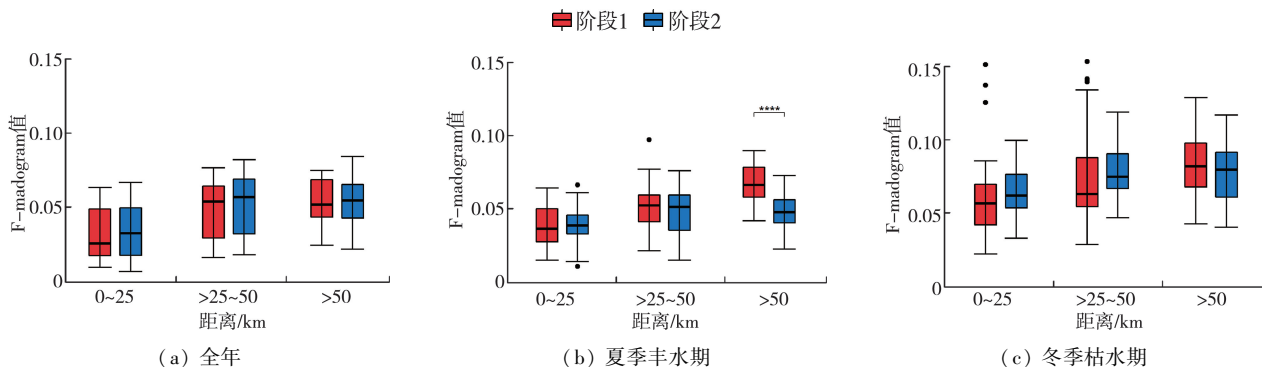


图6 不同阶段水位模拟值的 F-madogram 值箱线图

Fig. 6 Boxplots for F-madogram value of simulated water levels in different stages

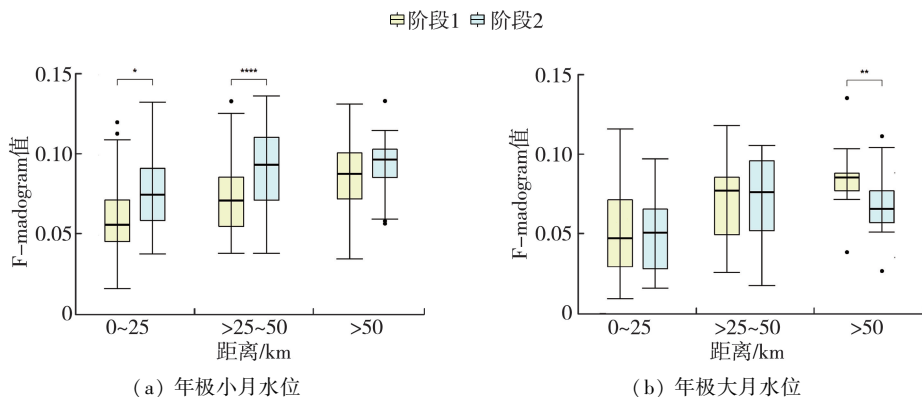


图7 不同阶段年最小月水位和最大月水位模拟值的 F-madogram 值箱线图

Fig. 7 Boxplots for F-madogram value of annual minimum monthly water level and annual maximum monthly water level in different stages

区间降雨的影响较小,上游来水量也未发生明显变化^[10],水位空间依赖关系在时间上的差异可能是由人类活动造成的。1957—1986 年与 1987—2016 年两个时期的分割点正处于珠江三角洲城市建设的鼎盛期,大规模河道挖沙使得三角洲的河床急剧下切,改变了河道冲淤的规律。采砂活动在空间上分布不均匀,改变了水位空间分布特征,整个区域的低水位空间依赖性也可能因此发生变化。此外,90 年代初期开展的珠江流域航道整治工程直接作用于河床表面,影响河床演变进程,并恶化河床的下切。流域上游各水库大坝等水利设施的建设通过拦蓄大量泥沙减少了珠江三角洲的来沙量,河床下切后无法及时补充回淤,河道断面面积不断增大。河道垂向冲深使年最低水位明显下降,1987—2016 年部分站点连续刷新历史最低水位,年最低水位的特征发生巨变,其空间依赖性也可能随之改变。围垦活动和码头桥梁等建设改变了珠江三角洲地区水道的分流比,珠江河口的潮汐动力也受到间接影响,加上各种因素诱导的珠江河口海平面上升,导致部分河口站点高潮水位抬升,水位特征变得更加复杂。上述人类活动使珠江三角洲地区的水位特征发生了重大变异,对该地区水位空间依赖性产生影响。

4 结 论

a. Pearson 相关分析表明,珠江三角洲河网区 15 个潮位站的月平均水位相关性较好,其中出海口附近的站点与其他站点相关系数的均值相对较小。

b. 构建的 pair-copula 结构模型能较好地捕捉水位空间依赖性,随着站点间距离的增加,水位空间依赖性减弱。

c. 河网的发育方向影响水位空间依赖性,河网横向发育区域比东南 45°方向发育区域水位空间依赖性弱;水位空间依赖性存在季节差异,夏季丰水期水位空间依赖性比冬季枯水期显著增强,且随着站点距离的增加,差异变小,季节尺度下水位空间依赖性比全年尺度下水位空间依赖性弱。

d. 在人类活动和珠江河口海平面上升的影响下,1957—1986 年与 1987—2016 年两个阶段珠江三角洲河网区水位空间依赖性发生了较大变化,夏季丰水期 1987—2016 年的水位空间依赖性相较于 1957—1986 年在距离超过 50 km 的情况下显著增强;在站点间距离较小(0~50 km)的情况下,年极小月水位 1987—2016 年的空间依赖性相比 1957—1986 年显著减弱,在站点间距离较远(>50 km)的情况下,年极大月水位 1987—2016 年的空间依赖性

相比 1957—1986 年显著增强。

参考文献:

- [1] 宁吉才,刘高焕,刘庆生,等.水文响应单元空间离散化及 SWAT 模型改进[J].水科学进展,2012,23(1):14-20. (NING Jicai, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, et al. Spatial discretization of hydrological response units and improved SWAT model[J]. Advances in Water Science, 2012,23(1):14-20. (in Chinese))
- [2] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46: 234-240.
- [3] TOBLER W. On the first law of geography: a reply[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(2): 304-310.
- [4] PLEWA K, PERZ A, WRZESINSKI D, et al. Probabilistic assessment of correlations of water levels in polish coastal lakes with sea water level with the application of Archimedean Copulas[J]. Water, 2019, 11(6): 1292.
- [5] ASADI P, DAVISON A C, ENGELKE S. Extremes on river networks[J]. The Annals of Applied Statistics, 2015, 9(4): 2023-2050.
- [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] 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))
- [8] 杨易,贺涛.近年珠江三角洲洪季余水位和潮差的演变特征研究[J].中国农村水利水电,2021(7):19-23. (YANG Yi, HE Tao. Research on the evolution of residual water level and tidal range of flood season in the Pearl River Delta in recent years[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 19-23. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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,2002,57(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, 57(4): 429-436. (in Chinese))

- [11] 朱金格,包芸,胡维平,等.近50年来珠江网区水动力对地形的响应[J].中山大学学报(自然科学版),2010,49(4):129-133.(ZHU Jin'ge,BAO Yun,HU Weiping,et al. Impact of channel evolution on hydrodynamics in the Pearl River Delta in the last 50 years[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2010,49(4):129-133.(in Chinese))
- [12] 张蔚,严以新,郑金海,等.珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J].水科学进展,2010,21(1):77-83.(ZHANG Wei,YAN Yixin,ZHENG Jinhai,et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta[J]. Advances in Water Science,2010,21(1):77-83.(in Chinese))
- [13] ZHANG Wei,RUAN Xiaohong,ZHENG Jinhai,et al. Long-term change in tidal dynamics and its cause in the Pearl River Delta, China[J]. Geomorphology,2010,120(3/4):209-223.
- [14] 刘霞.珠江三角洲水文特性变异及原因浅析[J].水利规划与设计,2004(4):9-13.(LIU Xia. Cause analysis of the variation of hydrological features of the Pearl River Delta[J]. Water Resources Planning and Design,2004(4):9-13.(in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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]. Tropic Oceanology,1998,17(2):9-14.(in Chinese))
- [17] 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,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]. Acta Oceanologica Sinica,2012,34(1):46-56.(in Chinese))
- [18] 刘幼萍.珠江三角洲河网区变化环境下的河床演变趋势和水文极端事件[J].水文,2020,40(3):71-75.(LIU Youping. Tendency of fluvial process and hydrologic extreme events in river network of Pearl River Delta under changing environment[J]. Journal of China Hydrology,2020,40(3):71-75.(in Chinese))
- [19] SKLARA. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. Publications de l'Institut Statistique de l'Université de Paris,1959,8:229-231.
- [20] CHENG Linyin,HOERLING M,LIU Zhiyong,et al. Physical understanding of human-induced changes in U.S. hot droughts using equilibrium climate simulations [J]. Journal of Climate,2019,32(14):4431-4443.
- [21] LIU Zhiyong,TÖRNROS T,MENZEL L. A probabilistic prediction network for hydrological drought identification and environmental flow assessment[J]. Water Resources Research,2016,52(8):6243-6262.
- [22] BÁRDOSSY A. Copula-based geostatistical models for groundwater quality parameters[J]. Water Resources Research,2006,42(11):W11416.
- [23] BRUNNER M I,FURRER R,FAVRE A C. Modeling the spatial dependence of floods using the fisher copula[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2019,23(1):107-124.
- [24] BEVACQUA E,MARAUN D,HAFF I H,et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy)[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(6):2701-2723.
- [25] AAS K,CZADO C,FRIGESSI A,et al. Pair-copula constructions of multiple dependence[J]. Insurance: Mathematics and Economics,2009,44(2):182-198.
- [26] JOE H. Families of m -variate distributions with given margins and $m(m-1)/2$ bivariate dependence parameters[J]. IMS Lecture Notes Monograph Series,1996,28:120-141.
- [27] BEDFORD T,COOKE R M. Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence,2001,32(1/2/3/4):245-268.
- [28] LIU Zhiyong,XIE Yuying,CHENG Linyin,et al. Stability of spatial dependence structure of extreme precipitation and the concurrent risk over a nested basin[J]. Journal of Hydrology,2021,602:126766.
- [29] COOLEY D,NAVEAU P,PONCET P. Variograms for spatial max-stable random fields[M]//BERTAIL P,SOULIER P,DOUKHAN P,et al. Dependence in Probability and Statistics. New York: Springer,2006:373-390.
- [30] ABU-AWWAD A,MAUME-DESCHAMPS V,RIBEREAU P. Semiparametric estimation for space-time max-stable processes: an F-madogram-based approach[J]. Statistical Inference for Stochastic Processes,2021,24(2):241-276.
- [31] 杭宜铖,范敏韬,刘智勇.基于REOF的珠江三角洲河网区水位时空变异特征分析[J].水资源保护,2022,38(2):139-146.(HANG Yicheng,FAN Mintao,LIU Zhiyong. Spatiotemporal variation of water level in Pearl River Delta network area based on REOF[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):139-146.(in Chinese))
- [32] RUPA R C,MUJUMDAR P P. Dependence structure of urban precipitation extremes[J]. Advances in Water Resources,2018,121:206-218.

(收稿日期:2022-05-07 编辑:施业)