

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.002

我国沿海城市洪潮组合风险分析

徐宗学^{1,2}, 任梅芳^{1,2}, 陈 浩^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:针对沿海城市防洪安全和经济可持续发展的问题,从气候变化和人类活动两个方面对沿海城市洪涝事件的成因进行了归纳。以深圳市为例,选取大沙河上游西沥水库站和深圳湾赤湾潮位站为代表站,基于 Copula 函数,对深圳市洪潮组合进行风险分析。结果表明,虽然降水和高潮位的双阈值组合风险率小于单域值组合风险率,但深圳市同时遭遇暴雨和高潮位时所造成的城市洪涝灾害更为严重,经济损失和人员伤亡更为巨大;在城市防洪防潮排涝规划、设计时需更加关注降水和潮位的双阈值组合风险率大小。

关键词:沿海城市;洪潮组合;城市洪涝;暴雨潮位;Copula 函数;深圳市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0010-05

Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities//XU Zongxue^{1,2}, REN Meifang^{1,2}, CHEN Hao^{1,2} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: Aiming at the problems of flood control safety and sustainable economic development in coastal cities, this paper summarizes the causes of flood events in coastal cities from two aspects of climate change and human activities. Taking Shenzhen as an example, Xili reservoir station in the upper reaches of Dashahe River and Chiwan tide station in Shenzhen Bay were selected as representative stations, and the risk analysis of flood tide combination in Shenzhen City was carried out based on Copula function. The results show that although the combined risk rate of precipitation and high tide level is lower than that of single field value, the urban flood disaster caused by rainstorm and high tide level in Shenzhen City is more serious, and the economic loss and casualties are more serious. In the planning and design of urban flood prevention and drainage, more attention should be paid to the combined risk rate of precipitation and tide level.

Key words: coastal cities; flood tide combination; urban flood; rainstorm tidal level; Copula function; Shenzhen City

1 研究背景

城市化是全世界范围内的普遍现象,预计到 2050 年,全球城镇人口数量占世界总人口的比例将达到 72%。增长的城镇人口主要来自发展中国家^[1],我国城市化发展也正迅速进行,1979—2013 年,我国城镇化率从 19.7% 增长至 53.7%。城市化的发展给城市水循环带来了显著的影响,与此同时,在变化环境下,全球极端气候事件(极端气温、极端降水等)的增多增强加剧了城市洪涝事件发生的频率和强度。

对城市洪涝事件形成原因的梳理是城市洪涝相关研究的基础和前提,目前,国内外学者开展了大量

的关于城市洪涝特征及其成因分析的研究^[2-9]。IPCC 第四次评估报告指出全球温室气体的急剧排放导致全球气候模式发生变化,而气候模式的变化给全球及区域水循环及水资源的可持续利用带来了巨大的挑战^[10-12]。气候变化对全球降雨、气温和蒸发过程都造成了影响,进一步影响土壤下渗、地表径流及地表与地下水的交互过程,从而对全球及区域水循环带来影响。而城市作为社会、文化、科技和技术的中心,聚集了更多的人口,在面对洪涝等自然灾害时更加敏感和脆弱^[13]。引发城市洪涝灾害最直接的因素是极端降水,而气候变化能够改变极端降水的模式,气候变化会增强极端降水的频次和强度已是不争的事实^[14]。人类活动是导致城市洪涝

事件频发的主要原因之一,例如,人类活动可能会加剧城市“热岛效应”。城市“热岛效应”是指城市区域大气和地表温度要高于周边郊区和农村地区^[15],目前引起了世界各地的广泛关注。城市区域的降水特征也可能受到城市“热岛效应”的影响,尤其是城市极端降水的模式,从而形成城市“雨岛效应”;另外,人类活动造成的城市下垫面改变也是城市洪涝发生的主要因素之一。同时,城市流域排水管理能力也是影响城市暴雨洪涝的重要因素之一,合理制定防洪、除涝、排水标准及做好城市排水管道的运维工作可以有效提升城市排水系统的排涝能力。

我国幅员辽阔,不同区域水文气候要素变化差异较大,不同地区的城市洪涝特征和成因机制也存在较大的差别。研究表明,人类活动是我国北方河流多年平均径流减少的主要原因,气候变化为次要驱动因素,但气候变化的影响呈逐步加强的趋势^[16-18];而我国南方沿海城市由于其特殊的地理位置,不仅会遭受陆面暴雨洪涝的威胁,强台风和高潮位也会对沿海城市带来威胁。当沿海城市遭受强降雨时,常常无法预测下游潮水位,而当面临高潮位时,经常形成风、暴、潮“三碰头”的复杂成因自然灾害,与此同时,海平面的上升也加剧了沿海城市洪涝事件的发生频次和强度。因此,沿海城市的洪涝成因显得更加的复杂。

2 沿海城市洪涝致灾因子分析

沿海城市是我国人口密集、城市化程度较高的地区,是人口和经济发展的重点地区^[19],尤其是三角洲城市群地区,由于其特殊的地理位置和丰富的自然资源,已成为社会、经济和文化活动的重要组成部分。目前,世界约有 25% 的人口居住在沿海地区,而近几十年,世界约 85% 的三角洲地区都经历了严重的洪涝灾害^[20],对沿海城市的人民生命和财产安全造成严重的威胁。与内陆城市相比,沿海城市在洪涝灾害方面具有显著的特殊性和复杂性。由于处于水陆交互带,沿海城市经常同时遭受陆面暴雨洪水、海洋潮汐及强台风等共同作用^[21]。近年来,国内外学者对沿海城市暴雨和潮位的最优分布、联合重现期、组合概率等进行了大量的研究,如,Zheng 等^[22]以澳大利亚海岸线为例,采用 logistic 型二元超阈值模型分析了极端降水和潮位的相关性;刘曾美等^[23]通过构建暴雨和洪水位的联合分布函数,对珠江口洪涝遭遇的概率进行了定量的评估;Lian 等^[24]采用基于 Copula 函数对沿海城市潮位和降雨对洪水风险的联合概率和影响进行了分析研

究,表明强降水和潮位之间存在着正相关关系,证明潮水位是能够给洪水带来威胁的附加风险因素;Svensson 等^[25]采用统计学方法量化潮水位与强降雨之间的相关关系,以英国东部的降水和潮位为例,研究证实二者存在较强的关联性;武传号等^[26]以广州市为例,基于 Clayton Copula 函数定量计算了广州市极端降雨与潮位遭遇和致涝风险率;徐奎^[21]以福州市为研究区,采用 Copula 函数对不同降雨潮位组合下的联合风险概率进行分析。现阶段,针对沿海城市洪涝多维致灾因子关联特征及其遭遇组合方法等方面还有待于进一步的研究。

3 案例分析

3.1 研究区概况及数据来源

深圳市位于广东省南部,20 世纪 80 年代以来,深圳市从农村地区快速发展成为珠江三角洲经济最发达的城市之一,也是我国南部重要的工业城市。近年来,城市化的快速发展,使得深圳市不透水面积迅速增加,同时受气候变化影响,极端降雨强度和频次逐渐增大,加之海平面的上升,导致海水入侵和泄洪不畅,使得深圳市城市洪涝灾害频发。如 2014 年 5 月 11 日,深圳市日降水量高达 233 mm,而部分区域 6 h 降雨量峰值高达 310 mm^[27],造成了短历时强降雨暴雨洪涝事件,给深圳市人民生命和公共财产安全带来了严重的损失。基于此,本文以深圳市为例,开展深圳市大沙河流域雨潮组合风险分析,为深圳市防洪排涝规划的制定提供科技支撑。

深圳市陆域总面积为 1997.47 km²,地势呈东南高、西北低(图 1)。深圳市气候属亚热带海洋性气候,雨量丰沛但时空分布极不均匀,年均降雨量约为 1900 mm,主要集中在 4—9 月(约占到全年降水量的 85%)。暴雨洪涝灾害是深圳市主要的自然灾害之一,主要由夏季持续短历时强降雨所造成。

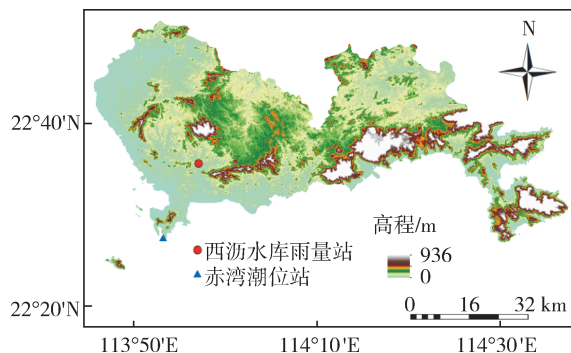


图 1 研究区高程及站点位置

Fig.1 Study area elevation and station location

本文选取 1965—2017 年深圳市大沙河上游西沥水库站逐日降水数据和深圳湾赤湾站逐日潮位数

据进行雨潮组合风险分析。由于深圳市水文资料年鉴制作过程中对于潮位数据选择的基准面不同,选取珠江基面以下 2.463 m 作为统一基准面进行处理。降水数据和潮位数据来源于深圳市水文资料年鉴。

3.2 研究方法

3.2.1 Copula 函数及边缘分布函数

Copula 函数是由 Sklar 提出的,作为联合分布函数及其边缘分布函数的连接函数。若随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的边缘分布函数为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$,联合分布函数为 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$,则存在唯一连接函数 C ,使得

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \tag{1}$$

水文学中大多采用 Archimedean Copula 函数对水文变量进行分析研究,常用的 Copula 函数有 3 种: Frank Copula 函数、Clayton Copula 函数及 Gumbel Copula 函数,其生成算子 φ 和参数 θ 如表 1 所示。边缘分布函数采用布尔(Burr)分布、伽马(Gamma)分布、广义极值(GEV)分布、对数正态(Lognormal)分布和韦伯(Weibull)分布 5 种较为常用的分布函数。采用 KS 检验、C_vM 检验、赤池信息准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)进行降水和潮位边缘分布函数及联合分布函数的拟合精度检验,从而选出最优边缘分布函数和 Copula 函数。

3.2.2 雨、潮组合概率模型

沿海地区城市洪涝灾害的发生主要受降水和潮位变化的影响,降水或潮位超过某一阈值或者同时超过某一阈值时,均会造成内涝。本文利用西沥水库雨量站年最大日降水量和赤湾潮位站相应的最高潮位,基于单阈值风险率模型和双阈值风险率模型来评估深圳市雨、潮遭遇风险率。如果西沥水库站年最大日降水量序列 R 的边缘分布为 $F_r(r)$,赤湾站对应的潮位序列 T 的边缘分布为 $F_t(t)$,联合分布函数为 $F_c(r, t)$,则双阈值风险率模型、单域值风险率模型分别为

$$P[(R > r) \cap (T > t)] = 1 - F_r(r) - F_t(t) + F_c(r, t) \tag{2}$$

$$P[(R > r) \cup (T > t)] = 1 - F_c(r, t) \tag{3}$$

表 1 3 种 Archimedean Copula 函数表达形式

Table 1 Expressions of the three types of the Archimedean Copula functions

Copula 函数	φ	表达式	θ
Gumbel	$\varphi_{\theta}(t) = (-\ln t)^{\theta}$	$C(\mu, \nu) = \exp\{-[(-\ln \mu)^{\theta} + (-\ln \nu)^{\theta}]^{1/\theta}\}$	$\theta \in [1, \infty)$
Clayton	$\varphi_{\theta}(t) = t^{-\theta} - 1$	$C(\mu, \nu) = (\mu^{-\theta} + \nu^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta \in (0, \infty)$
Frank	$\varphi_{\theta}(t) = -\ln\left(\frac{e^{-\theta t} - 1}{e^{-\theta} - 1}\right)$	$C(\mu, \nu) = -\frac{1}{\theta} \ln\left[1 + \frac{(e^{-\theta \mu} - 1)(e^{-\theta \nu} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right]$	$\theta \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$

3.3 结果与分析

3.3.1 边缘分布函数

分别对经验分布和 Burr、GEV、Gamma、Lognormal、Weibull 边缘分布函数进行估计,图 2 为降水序列和潮位序列 5 种累积分布函数。基于 KS 检验、C_vM 检验、AIC 准则和 BIC 准则,对边缘分布函数进行优选,表 2 和表 3 分别为降水序列和潮位序列拟合优度的统计量。由图 2、表 2、表 3 可以得出,Burr 分布和 Lognormal 分布对降水序列和潮位序列的拟合度最好,因此利用 Burr 分布和 Lognormal 分布进行雨、潮组合风险分析。

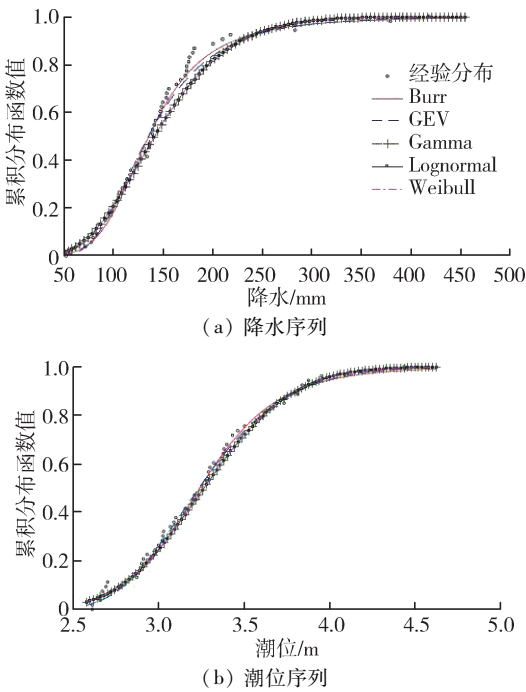


图 2 降水序列与潮位序列 5 种累积分布函数
Fig.2 Five cumulative distribution functions
of precipitation series and tide series

3.3.2 Copula 函数优选

采用 Frank、Clayton 及 Gumbel Copula 函数进行 Copula 函数的优选,表 4 为 3 组 Copula 函数相关参数和检验值。参数 θ 和 Kendall 秩相关系数 τ 均大于 0,说明深圳市降水和潮位呈正相关关系,其中 Clayton Copula 函数的检验统计值最小,表明 Clayton Copula 函数能够更好地拟合深圳市的雨、潮联合分布。

表2 降水序列拟合优度统计量

Table 2 Statistics of precipitation series fitting goodness

边缘分布函数	拟合优度统计量			
	KS	C _v M	AIC	BIC
Burr	0.075	0.059	576.116	581.932
Gamma	0.094	0.079	577.178	584.994
GEV	0.128	0.171	581.454	586.664
Lognormal	0.108	0.108	576.734	581.944
Weibull	0.173	0.388	593.594	598.804

表3 潮位序列拟合优度统计量

Table 3 Statistics of tidal level series fitting goodness

边缘分布函数	拟合优度统计量			
	KS	C _v M	AIC	BIC
Burr	0.052	0.041	59.449	67.265
Gamma	0.062	0.035	57.044	64.859
GEV	0.065	0.052	56.542	61.752
Lognormal	0.049	0.033	55.911	61.121
Weibull	0.121	0.210	67.090	72.301

表4 Copula 函数相关参数和检验统计值

Table 4 Statistics parameters and test statistics of the Copula functions

联合分布函数	θ	τ	检验统计值			
			KS	C _v M	AIC	BIC
Gumbel	1.076	0.070	0.076	0.043	-40.462	-38.492
Clayton	0.389	0.163	0.014	0.027	-46.720	-44.750
Frank	1.251	0.137	0.058	0.029	-46.302	-44.331

通过对降水序列和潮位序列边缘分布函数的分析,深圳市雨潮遭遇联合分布的 Clayton Copula 函数可以表达为

$$F_c(r, t) = (F_r^{-0.3886} + F_t^{-0.3886} - 1)^{-1/0.3886} \quad (4)$$

式中: F_r 为西沥水库雨量站 1965—2017 年最大日降水量的 Burr 分布函数; F_t 为赤湾潮位站相应最高潮位的 Lognormal 分布函数。

基于降水序列和潮位序列的边缘分布函数及 Clayton Copula 函数,不同重现期下雨潮联合分布函数统计值如表 5 所示,可见,深圳市降水和潮位的联合分布函数值从 0.652 增加到 0.980。

表5 不同重现期下降水和潮位的 Clayton Copula 函数联合分布函数值

Table 5 Joint distribution function of Clayton Copula function of precipitation and tide level in different return periods

降水重现期/a	函数值				
	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
5	0.652	0.726	0.763	0.785	0.793
10	0.726	0.813	0.857	0.883	0.891
20	0.763	0.857	0.903	0.931	0.941
50	0.785	0.882	0.931	0.961	0.971
100	0.793	0.891	0.941	0.970	0.980

3.3.3 雨潮组合风险分析

表 6 和表 7 分别为不同重现期下降水和潮位的双阈值风险率和单阈值风险率。可以看出,降雨重现期为 5 a、10 a、20 a、50 a 和 100 a 的情况下,降水和潮位的双阈值风险率为 0.000 1~0.051 5,单阈值风险率为 0.019 9~0.348 5,可见降水和潮位的双阈值风险率远小于单阈值风险率。随着重现期的增大,降水和潮位的双阈值组合风险率和单阈值组合风险率虽然都在减小,但二者之间的差距在不断增大。虽然降水和潮位的双阈值风险率比较小,但是在沿海地区两者的遭遇会严重加剧城市内涝的程度,加大生命和财产的损失,而原来不造成城市内涝的降水或潮位,在二者遭遇时也有可能造成内涝,因此为了保证沿海地区城市安全,在防洪潮规划、设计时应更加关注双阈值风险率的大小。

表6 不同重现期下降水和潮位遭遇双阈值风险率

Table 6 Double threshold risk rate of the precipitation and the tidal level in different return year periods

降水重现期/a	风险率				
	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
5	0.051	0.026	0.013 0	0.005 0	0.003 0
10	0.026	0.013	0.007 0	0.003 0	0.001 0
20	0.013	0.007	0.003 0	0.001 0	0.000 7
50	0.005	0.002	0.001 0	0.000 6	0.000 3
100	0.003	0.001	0.000 7	0.000 3	0.000 1

表7 不同重现期下降水和潮位遭遇单阈值风险率

Table 7 Single threshold risk rate of the precipitation and the tidal level in different return year periods

降水重现期/a	风险率				
	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
5	0.348	0.274	0.237	0.215	0.207
10	0.274	0.187	0.143	0.117	0.109
20	0.237	0.143	0.096	0.069	0.059
50	0.215	0.117	0.069	0.039	0.029
100	0.207	0.109	0.059	0.029	0.019

4 结 语

气候变化和城市化等多种综合因素的作用导致城市洪涝问题越来越突出,在陆面暴雨、强台风和高潮位共同存在时,沿海城市的致灾风险更大,承灾体的暴露性更加明显,灾害脆弱性更加显著。选取深圳市大沙河上游西沥水库站和深圳湾赤湾潮位站为代表站,基于 Copula 函数,对深圳市雨潮组合进行风险分析,研究结果表明虽然降水和潮位的双阈值组合风险率小于单阈值组合风险率,但是滨海城市同时遭遇暴雨和高潮位时所造成的城市洪涝灾害更为严重,经济损失和人员伤亡更为巨大,因此,在城

市防洪防潮排涝规划、设计时需更加关注降水和潮位的双阈值组合风险率大小。

参考文献:

[1] United Nations. World population prospects: the 2009 revision[R]. New York:United Nations,2012.

[2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and cause analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[3] 刘建芬,王慧敏,张行南. 城市化背景下城区洪涝灾害频发的原因及对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2012,14(1):73-75. (LIU Jianfen,WANG Huimin,ZHANG Xingnan. Causes and strategies of urban flooding in the context of urbanization [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 14 (1):73-75. (in Chinese))

[4] 王伟武,汪琴,林晖,等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题,2015(10):24-28. (WANG Weiwu,WANG Qin,LIN Hui,et al. Advances and prospects in urban waterlogging in China [J]. Urban Problems,2015 (10):24-28. (in Chinese))

[5] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang,et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))

[6] 王通. 城市规划视角下的中国城市雨水内涝问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.

[7] 周宏,刘俊,高成,等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. 灾害学,2018,33(3):147-151. (ZHOU Hong,LIU Jun,GAO Cheng,et al. Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33 (3): 147-151. (in Chinese))

[8] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护,2017,33(2):13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):13-15. (in Chinese))

[9] 陈建刚,张书函,王海潮,等. 北京城区内涝积滞水成因分析与对策建议[J]. 水利水电技术,2015,46(6):34-36. (CHEN Jiangang,ZHANG Shuhan,WANG Haichao,et al. Analysis on causation of urban waterlogging in Beijing and its countermeasures and suggestions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46

(6):34-36. (in Chinese))

[10] IPCC. The fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,2007[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2007.

[11] KINGSTON D G,TAYLOR R G. Sources of uncertainty on climate change impacts on river discharge and groundwater in a headwater catchment of the Upper Nile Basin [J]. Hydrology & Earth System Encees, 2010, 14 (7): 1297-1308.

[12] 曹士圯,胡庆芳,蒋思佳,等. 1995—2016 年深圳市用水量变化与节水潜力分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):76-81. (CAO Shiyi,HU Qingfang,JIANG Sijia,et al. Analysis of water consumption change from 1995 to 2016 and water saving potential in Shenzhen City [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 76-81. (in Chinese))

[13] ROSENZWEIG C, KAROLY D, VICARELLI M, et al. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change[J]. Nature,2008,453:353.

[14] IPCC. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva:IPCC,2014:151.

[15] ZHAO Lei,LEE Xuhui,SMITH Ronald B,et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. Nature,2014,511:216-219.

[16] 王国庆,张建云,鲍振鑫,等. 人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(6):113-118. (WANG Guoqing,ZHANG Jianyun,BAO Zhenxin,et al. Change in runoff within the lan river basin due to climate change and human activities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (6): 113-118. (in Chinese))

[17] JIANG S H, REN L L, YONG B, et al. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe Basin in northern China using three different methods [J]. Hydrological Processes, 2011, 25: 2491-2505.

[18] LI B Q, LIANG Z M, ZHANG J Y, et al. Attribution analysis of runoff decline in a semiarid region of the Loess Plateau, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131 (1/2): 845-855.

[19] 许红师. 沿海城市多维致灾洪涝风险分析与灾防决策模型研究[D]. 天津:天津大学,2018.

[20] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities [J]. Nature Geoscience,2009,2:681-686.

[21] 徐奎. 沿海城市暴雨潮位关联特性及洪涝风险分期控制研究[D]. 天津:天津大学,2014.

(下转第 27 页)

- [10] 邓铭江. 新疆水资源战略问题探析[J]. 中国水利, 2009 (17): 23-27. (DENG Mingjiang. Studies on water resources strategy in Xinjiang [J]. China Water Resources, 2009(17): 23-27. (in Chinese))
- [11] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007 (3): 380-386. (DENG Mingjiang. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007(3): 380-386. (in Chinese))
- [12] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [13] 何流. 伊犁河流域水资源开发利用现状分析及对策[J]. 陕西水利, 2019(7): 49-51. (HE Liu. Analysis and Countermeasures on the present situation of water resources development and utilization in Yili River Basin [J]. Shaanxi Water Resources, 2019 (7): 49-51. (in Chinese))
- [14] 腊孟珂, 周洋, 朱汉辰, 等. 动力降尺度 CMIP5 的 2006—2035 新疆夏季降水变化[J]. 气象科学, 2019, 39 (3): 413-420. (LA Mengke, ZHOU Yang, ZHU Hanchen, et al. On the precipitation changes over Xinjiang in summers from 2006 to 2035 through the dynamical downscaling of CMIP5 model results [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39 (3): 413-420. (in Chinese))
- [15] 于晓晶, 李淑娟, 赵勇, 等. CMIP5 模式对未来 30 a 新疆夏季降水的预估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 53-62. (YU Xiaojing, LI Shujuan, ZHAO Yong, et al. Projected summer precipitation over Xinjiang by multi-CMIP5 models in the next 30 years [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 53-62. (in Chinese))
- [16] 黄德春, 孙敏敏. 新疆水贫困与城市化的协调关系研究[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 30-34. (HUANG Dechun, SUN Minmin. Study of coordination between water poverty and urbanization in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 30-34. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-27 编辑: 彭桃英)

(上接第 14 页)

- [22] ZHENG F, WESTRA S, Sisson S A. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone [J]. Journal of Hydrology, 2013, 505: 172-187.
- [23] 刘曾美, 吴俊校, 陈子荣. 感潮地区暴雨和潮水位遭遇组合的涝灾风险[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43 (2): 166-169. (LIU Zengmei, WU Junxiao, CHEN Zisheng. Waterlogging risk based on encounter of rainstorm and tidewater level in tide-influenced area [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43 (2): 166-169. (in Chinese))
- [24] LIAN J J, XU K, MA C. Joint impact of rainfall and tidal level on flood risk in a coastal city with a complex river network: a case study of Fuzhou City, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(2): 679-689.
- [25] SVENSSON C, JONES D A. Dependence between extreme sea surge, river flow and precipitation in eastern Britain [J]. International Journal of Climatology, 2002, 22 (10): 1149-1168.
- [26] 武传号, 黄国如, 吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短时暴雨与潮位组合风险分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 33-40. (in Chinese))
- [27] QIAN K, XIN T, JEREMY B, et al. Urban pluvial flooding prediction by machine learning study of Shenzhen City, China [J]. Advances in Water Resources, 2020, 145: 103719.

(收稿日期: 2020-11-22 编辑: 王芳)

