

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.005

城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应

杨悦莹^{1,2}, 朱志华^{1,2}, 蔡宴朋^{1,2}, 杨志峰^{1,2}

(1. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广东 广州 510006;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要:基于高时空分辨率的降雨产品,采用 RainyDay 暴雨生成器生成具有不同时空分布情景和降雨历时的设计降雨,通过分布式水文模型 GSSHA 模拟分析径流峰值对降雨时空异质性的响应规律,结合协方差分析方法和所构建的降雨时空异质性指标体系,定量研究不同降雨时空异质性指标对径流峰值的影响。结果表明:耦合短时序(2008—2016年)栅格降雨数据和 RainyDay 暴雨发生器,可以生成与实际降雨时空分布相似的流域设计降雨;降雨时空异质性对径流峰值具有显著的影响,其影响比降雨历时和降水量对径流峰值的影响大;雨峰系数、降雨集中度、1 h 最大降水量对径流峰值的影响较大,其中雨峰系数的影响随着降雨历时或降雨重现期增大而减小,而降雨集中度则相反。

关键词:降雨;时空异质性;径流峰值;RainyDay 暴雨生成器;GSSHA;石马河流域

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0027-07

Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed // YANG Yueying^{1,2}, ZHU Zhihua^{1,2}, CAI Yanpeng^{1,2}, YANG Zhifeng^{1,2} (1. Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: Based on rainfall products with high temporal and spatial resolution, the RainyDay rainstorm generator was used to generate design rainfall with different temporal and spatial distribution scenarios and rainfall duration. The response law of peak runoff to rainfall temporal and spatial heterogeneity was simulated and analyzed through the distributed hydrological model GSSHA, combined with the covariance analysis method and the constructed rainfall temporal and spatial heterogeneity index system, and the effects of different spatio-temporal heterogeneity indexes of rainfall on peak runoff were studied quantitatively. The results show that the coupling of short time series (2008-2016) grid rainfall data and RainyDay rainstorm generator can generate watershed design rainfall which is similar to the temporal and spatial distribution of actual rainfall. The temporal and spatial heterogeneity of rainfall has a significant impact on the peak runoff, which is greater than that of rainfall duration and rainfall. Rainfall peak coefficient, rainfall concentration and 1h maximum precipitation have a great impact on the peak runoff. The impact of rainfall peak coefficient decreases with the increase of rainfall duration or rainfall return period, while rainfall concentration is the opposite.

Key words: rainfall; temporal and spatial heterogeneity; peak runoff; RainyDay storm generator; GSSHA; Shima River Basin

在气候变化和城市化耦合作用下,降雨时空分布格局和自然水循环过程发生了显著的变化,导致城市洪涝灾害的影响程度和范围加大,雨洪灾害的致灾机理已成为当前城市水文研究的焦点问

题^[1-2]。前人研究表明,极端降雨事件频发是造成洪涝灾害日趋严重的主要诱因^[3-5],且在城市化进程下,强烈人类活动所造成的局部气候效应正加剧影响区域降雨时空分布的异质性^[6]。IPCC 在第五

基金项目:广东省重点领域研发计划(2020B1111380003);广东省引进创新创业团队项目(2019ZT08L213);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0403);国家自然科学基金青年科学基金(52009021)

作者简介:杨悦莹(1996—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: haruoneday_1015@163.com

通信作者:蔡宴朋(1978—),男,教授,博士,主要从事水生态效应管理研究。E-mail: yanpeng.cai@gdut.edu.cn

次评估报告中强调,21 世纪气候变化不确定性将进一步变大,区域降雨时空分布将更加不均匀^[7]。由于城市流域缺乏长时序的高时空分辨率降雨数据,导致降雨时空异质性和城市水文分析过程中常被简化或者忽略^[8],这一做法的合理性也受到普遍的质疑。因此,探究降雨时空异质性对径流峰值的影响,对厘清雨洪灾害的致灾机理具有重要的科学意义。

降雨时空分布特征发生改变,必然导致洪峰流量、洪水总量等洪水特征发生变化^[9-10],而且大大增加了雨洪灾害发生的不确定性,使得雨洪致灾机理变得更为复杂。由于降雨时空分布存在明显的异质性,传统基于降雨和洪水同频率的假设(即 n 年一遇的降雨会产生 n 年一遇的洪水)产生极大不确定性,其适用性和合理性变得极其严苛^[11]。早在 2003 年,Trenberth 等^[12]就强调在径流(特别是洪峰流量)模拟过程中,需关注降雨事件的时空异质性,认为掌握降雨时间和空间变化过程是了解区域产汇流规律演变的关键所在;White 等^[13]亦认为掌握降雨的时间和空间移动规律与洪水响应关系,有助于更加深层次了解雨洪致灾原理和变化规律;Zhu 等^[14]指出在降雨时空异质性的影响下,降水总量相对较小(如 20 年一遇)时也可导致较大量级(如 500 年一遇)的洪水出现。

在数值模拟方面,径流峰值明显受降雨时空异质性的影响^[15-16],尤其在城市地区,这种影响表现得更为强烈^[17]。Shah 等^[18]指出,降雨空间分布异质性对流域洪峰流量大小的模拟具有重要影响;Peleg 等^[19]的研究亦表明,较小面积城市流域的洪峰流量受到降雨时空分布异质性的影响,特别是降雨时间异质性具有较为显著的影响。目前,常用降雨覆盖率、降雨强度、降雨移动规律、降雨中心空间相对位置等典型降雨特征指标表征区域降雨时空异质性,并分析其对流域洪峰流量的影响^[20-21]。Ten

Veldhuis 等^[20]指出降雨空间分布相对位置、移动方向及速度直接影响着洪峰流量、径流响应时间等;Mejía 等^[22-23]指出,强降雨覆盖率是洪峰流量分析中重要的因素,其直接与洪峰流量、径流总量等相关。虽然降雨时空异质性对流域产汇流的影响引起了人们的极大关注,但径流峰值对降雨时空异质性的响应机制仍有待深入研究。

本文以高度城市化的石马河流域作为典型的的城市流域,研究耦合 RainyDay 暴雨生成器和高时空分辨率的遥感降雨产品,生成一系列不同降雨重现期、历时和时空分布情景的设计降雨,进而将相同降雨重现期和降雨历时的降雨情景重构成降水总量相同的降雨事件,输入分布式水文模型 GSSHA 中,结合协方差分析方法和降雨时空异质性指标体系,定量揭示径流峰值对降雨时空异质性的响应规律。值得一提的是,本文并非模拟分析流域的洪水频率,而是探究不同降雨强度下径流峰值对降雨时空异质性的响应,以期城市化背景下雨洪灾害防治提供理论依据和科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

石马河流域位于粤港澳大湾区城市群核心地带,横跨深圳和东莞市两市,流域面积达 1249 km²。石马河源于大脑壳山,流经深圳市龙华区和东莞市塘厦、清溪、凤岗、樟木头、和谢岗等镇,汇入东江干流,河长 73.5 km,河床平均坡降 0.61‰。石马河流域内四周地势相对较高,海拔在 200 ~ 600 m 之间(图 1(a)),该流域属于亚热带季风气候,降水量大,年平均降雨量为 1 300 ~ 2 500 mm,但降雨主要集中在 4—9 月。从 20 世纪 90 年代起,石马河流域经历了复杂的城市化过程,导致土地利用发生显著变化,其中建设用地面积占比提升至 38%,具体土地利用情

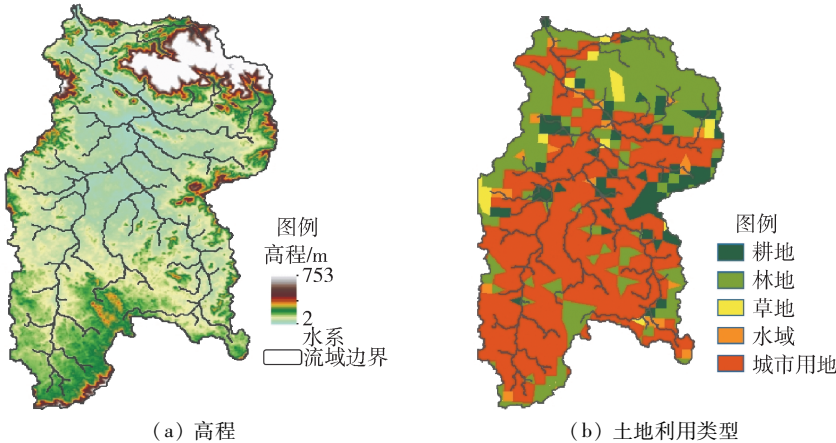


图 1 石马河流域高程及土地利用类型
Fig.1 Elevation and land use of Shima River Basin

况见图 1(b)。在气候变化和城市化进程不断加快的耦合影响下,流域内雨洪问题日益突出,并造成严重的经济损失。

石马河流域虽处于高度发达的城市区域,但其水文监测系统相对不完善。流域内仅设旗岭水文站用于监测 1 h 步长的径流过程。基于此,本研究仅针对旗岭水文站所控制的集水面积开展研究,即将旗岭水文站作为研究区域的出水口。旗岭水文站所控制的集水面积为 682 km², 纬度为 22.58°N ~ 22.95°N, 经度为 114.00°E ~ 114.23°E。

1.2 数据来源

本文基于国家气象科学数据中心发布的中国逐时降水量 0.1°×0.1°网格气象数据集(<http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjgx/>)计算石马河流域不同频率下的降雨时空过程。该数据集以中国地面 3 万多个自动气象观测站的逐时降水观测资料为基础,对 CMORPH 卫星降水资料进行优化和验证而得到。该数据集产品总体误差水平在 10% 以内,对强降水和站点稀疏区的误差在 20% 以内,准确度高于同类其他产品。综合考虑该数据集的可获取年份和完整性,本文选取 2008—2016 年的降雨数据估算石马河流域的设计降雨。

在构建石马河流域产汇流模型过程中,DEM 数据、土壤数据和土地利用数据分别采用美国地质勘探局提供的 SRTM-30m 数字地形高程数据、世界土壤数据库提供的分辨率 1:100 万土壤数据(Harmonized World Soil Database version 1.1)和由中国科学院地理科学与资源研究所提供的基于 Landsat TM/ETM 的 1km 土地覆盖遥感影像数据。为率定和验证所构建的流域产汇流模型的合理性,采用的实测降雨和径流数据包括来自于 2009 年观洞、碗窑、上村、高峰 4 个水文站的降雨数据和旗岭水闸的下泄流量数据,所选择的降雨数据和径流数据均是相同时间内发生的事件。此外,本文采用日本 GsMAp 提供 2001—2020 年的小时降雨数据验证所估算得到不同频率下的流域设计降雨的合理性。

2 研究方法

2.1 RainyDay 暴雨发生器

RainyDay 暴雨发生器是 Wright 等^[24]基于 Python 平台所开发,其核心是结合随机降雨转置技术和遥感降雨产品,通过多次转置发生于研究区域外,并与其具有相同气候特征和降雨过程的降雨场次,以达到增加发生在研究区域内的强降雨事件,扩大研究区域的样本容量。本文所选取的最大转置空间与 Zhu 等^[2]一致,最大转置空间选取的合理性分

析可见文献[2]。值得一提的是,RainyDay 暴雨发生器只改变降雨发生的空间位置,而不改变降雨量的时程分布。

2.2 GSSHA 分布式水文模型

为更全面地揭示降雨时空异质性的对流域径流峰值的影响,采用二维分布式水文模型 GSSHA (gridded surface/subsurface hydrologic analysis) 进行流域的产汇流过程模拟。该模型具有较全面的水文物理机理计算机制,即使所构建的模型在未得到“显著校准”的情况下,也能较好地捕获区域洪水对降雨的响应,其在水文资料相对不足的城市区域具有良好的模拟效果^[25]。采用 30 m 分辨率的 DEM 数据构建流域产汇流模型的水文地理基面,并提取各河道的流向;选取考虑土壤水分再分配的 Green-Ampt 方程计算径流下渗过程;利用一维扩散波方程和 ADE 方程分别计算河道洪水波运动及地表径流过程。

采用 multilevel single linkage (MLSL) 方法和实测降雨及其相应的流量数据自动率定模型参数。其中,模型模拟效果采用纳什系数 (N_{SE}) 和 Kling-Gupta efficiency (K_{GE}) 系数进行评价。Zhu 等^[26]的研究表明 N_{SE} 和 K_{GE} 能很好地评价模型结果的合理性,当 N_{SE} 和 K_{GE} 系数大于 0.5 时,表明模型是可行的,其数值越靠近 1,模型模拟效果越好。

2.3 降雨时空异质性指标

根据 Ten Veldhuis 等^[20-21]的研究,综合选取最有代表性的雨峰系数(r)、降雨集中度(P_{CI})、1 h 最大降水量(R_{max})、总降雨中心(t_g)、时刻降雨中心(c_g)、25 mm/h 阈值降雨空间覆盖率(A_{25})、50 mm/h 阈值降雨空间覆盖率(A_{50})这 7 个指标,构建表征降雨时空变化的异质性指标体系,并采用协方差分析方法定量计算各指标对径流峰值的贡献情况。

3 结果与分析

3.1 流域产汇流模型率定和验证

选取 2009 年 4 场典型降雨进行石马河流域产汇流模型的率定和验证,表 1 为产汇流模型率定和验证结果,图 2 为 4 场典型降雨实测与模拟结果对比。由图 2 可见,所构建的模型能够较好地反映出流域场次降雨的产汇流情况,所得到的模拟径流过程基本与实测径流一致,且能够准确地模拟径流峰值的出现时间。通过定量分析各场次的模拟效果可以发现,各降雨场次的模拟径流和实测径流的 N_{SE} 系数和 K_{GE} 系数均大于 0.5,径流峰值偏差系数均控制在 10% 以内,表明该模型能够基本反映流域的产汇流情况,能够较好地模拟流域内场次降雨所产生

表 1 2009 年 4 场典型降雨模型率定和验证结果

Table 1 Model calibration and verification results of 4 typical rainfall events in 2009

阶段	时间段	实测总降水量/mm	实测径流峰值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	K_{CE}	N_{SE}	径流峰值偏差系数/%
率定 1	2009-08-03—2009-08-15	210.96	253.5	0.70	0.82	9.46
验证 1	2009-03-04—2009-03-09	104.37	126.1	0.75	0.51	6.84
验证 2	2009-06-25—2009-06-30	69.27	165.1	0.63	0.79	8.39
验证 3	2009-09-12—2009-09-17	94.66	208.0	0.51	0.57	-6.69

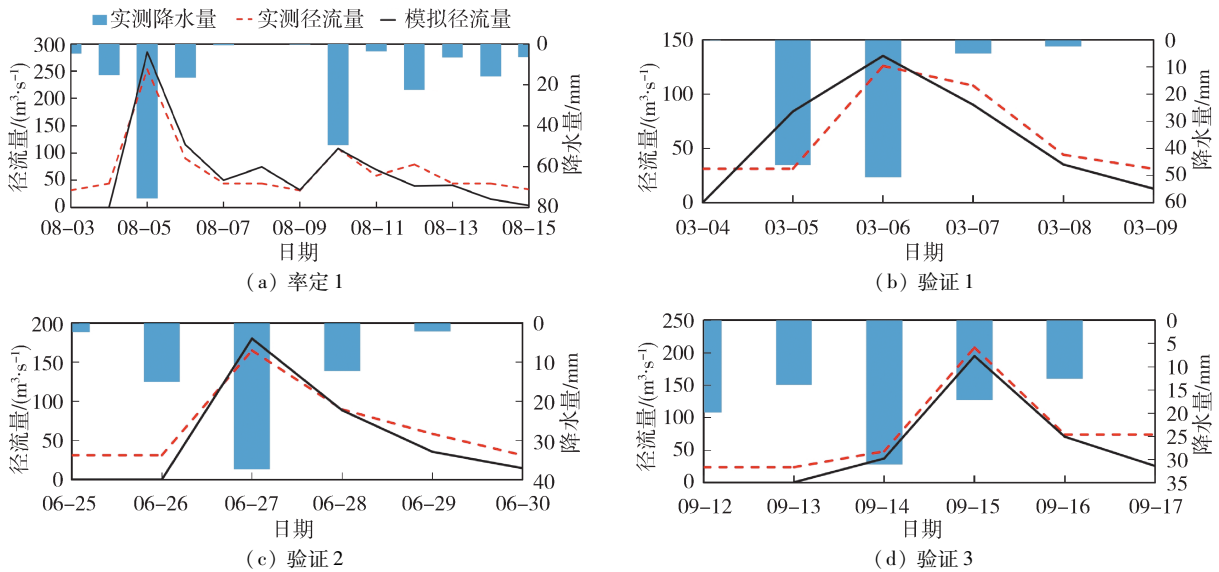


图 2 2009 年 4 场典型降雨实测与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated results of 4 typical rainfall events in 2009

的径流峰值。产汇流模型中不同土地利用类型的粗糙度系数分别为:耕地和草地 0.110、林地 0.130、城市建设用地 0.014;河道粗糙度系数为 0.067。产汇流模型不同土壤类型参数率定结果见表 2。

3.2 考虑降雨时空异质性的流域设计降雨

图 3 为基于 RainyDay 暴雨发生器得到的石马河流域不同降雨重现期(1~100 a)和不同降雨历时(2 h、6 h 和 24 h)的设计降雨,图中红色圆点、红色菱形和红色三角分别代表根据实测降雨数据计算得到的降雨历时分别为 2 h、6 h 和 24 h 的设计降水量值。值得一提的是,每个重现期具有 20 种不同时空分布特征的情景,每个情景的设计降水量均有所差异,各重现期下不同降雨历时及情景的设计降水量均落在图 3 的阴影部分。与传统方法所计算得到的设计降雨不同的是,基于 RainyDay 暴雨发生器得到的设计降雨的时间分布是实际发生在最大转置区内的降雨

事件,RainyDay 暴雨发生器仅是改变了降雨的空间位置,即所计算得到的设计降雨时空分布与实际降雨更为相符。

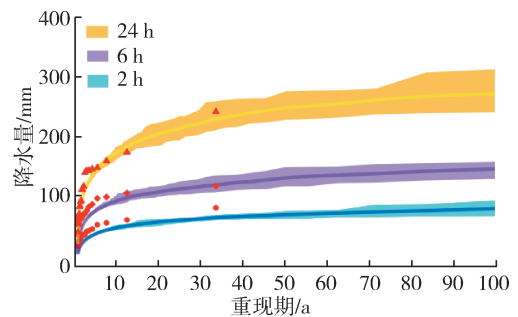


图 3 石马河流域不同降雨历时的设计降雨

Fig. 3 Design rainfall of different rainfall duration in Shima River Basin

由图 3 可知,基于 RainyDay 暴雨发生器的设计降雨强度呈现随着重现期和降雨历时的增大而增大

表 2 产汇流模型不同土壤类型参数率定结果

Table 2 Calibration results of parameters of different soil type in runoff model

土壤类型	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	毛管压力水头/ cm	多孔率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙分布指数/ ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$)	残余饱和度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	田间持水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	枯萎点/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	初始土壤 湿度/%
砂质壤土	0.2180	11.01	0.412	0.378	0.041	0.207	0.095	41
砂质黏壤土	0.0298	21.85	0.330	0.319	0.068	0.255	0.148	33
粉质黏壤土	0.0207	27.30	0.432	0.177	0.040	0.366	0.208	43
砂质黏土	0.0100	23.90	0.321	0.223	0.109	0.339	0.239	32

的变化规律。通过对比基于实测降雨数据和 RainyDay 暴雨发生器所得到的设计降雨可以发现,二者所计算得到的设计降雨较为相近。在降雨历时较短时,RainyDay 暴雨发生器普遍低估了流域设计降雨,而这种低估现象随着重现期增大而有所减小;随着降雨历时增加,RainyDay 暴雨发生器所得到的设计降雨基本能够与基于实测降雨的设计降雨相同,即实测设计降雨落在阴影部分(图3)。具体地,结合相对误差分析,在降雨历时为6 h 时,重现期大于10 a 的范围内,实测设计降雨都在 RainyDay 暴雨发生器计算范围内,降雨历时6 h 的整体相对误差在2%~14%之间;而在降雨历时为24 h 时,实测设计降雨都落在基于 RainyDay 暴雨发生器所计算得到的设计降雨范围内,RainyDay 暴雨发生器设计降雨与实测设计降雨的相对误差范围在3%以内。总体来说,RainyDay 暴雨发生器能够较好地计算石马河流域的设计降雨。虽然 RainyDay 暴雨发生器在计算短历时设计降雨时会出现一定的低估现象,但本文并不是模拟分析石马河流域的洪水频率变化规律,而是探究不同降雨强度下径流峰值对降雨时空异质性的响应,因此这一低估现象并不影响本文的研究结果,Wright 等^[24]在分析流域洪水频率时也出现了类似现象。

在得到上述设计降雨的基础上,计算同一重现期和降雨历时下各设计降雨情景与平均设计降雨的比值,按照这一比值同比例缩放各时刻和网格的降

水量,以达到相同重现期和降雨历时下具有相同的降水量,并将同比例缩放后的降水量作为流域产汇流模型的降雨输入,以模拟径流峰值对降雨时空异质性的响应规律。为更好地展示降雨时空异质性,在此选取了降雨历时为24 h、重现期为10 a 的3种降雨情景(下面分别简称其为降雨事件A、B、C)进行说明,从图4~6可见,虽然降雨事件A、B、C的总降雨量均为180 mm,但在时空结构上存在明显差异。由图4降雨的时程分布来看,不同降雨情景的降雨量时程分配具有明显的差异,降雨峰值出现的时间可较早、中间或者较晚,具有较为明显的差异;降雨集中度也存在明显的差异,其中降雨事件C的降雨集中度明显比A和B要高。图5为降雨事件A、B、C的24 h 累积降水量空间分布,图6为降雨事件B中3个不同时刻1 h 降水量空间分布。由图5可见,每个栅格的总降水量及其每个时刻的降水量也存在显著的差异,降雨事件A和B的降雨在空间上较为集中,而降雨事件C的降雨分布相对分散;3

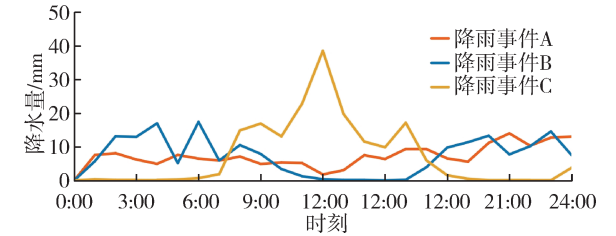


图4 降雨事件A、B、C的降雨过程
Fig.4 Rainfall process of rainfall A,B and C

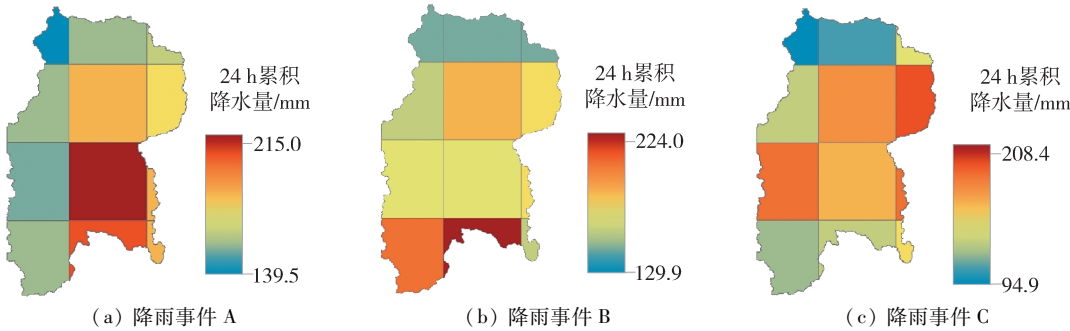


图5 降雨事件A、B、C的24 h 累积降水量空间分布
Fig.5 Spatial distribution of 24 h cumulative rainfall of rainfall events A, B and C

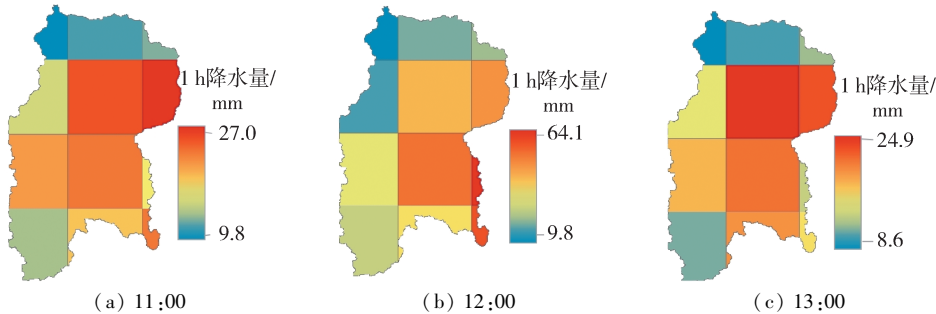


图6 降雨事件B中3个不同时刻的1 h 降水量空间分布
Fig.6 Spatial distribution of 1 h rainfall at 3 different times in rainfall event B

个降雨事件在不同时刻的降水量空间分布也存在明显的差异。

3.3 径流峰值对降雨时空异质性的响应规律

图7为不同降雨重现期和降雨历时下各降雨情景所产生的径流峰值,图中各点表示各降雨情景所产生的相应径流峰值,阴影部分表示相应重现期和降雨历时的径流峰值波动范围。由图7可见,径流峰值随着降雨历时和重现期的增大而增大,但也出现降雨重现期较小(降雨历时较短)时所产生的径流峰值可比降雨重现期较大(降雨历时较长)所产生的径流峰值大。如图7中,降雨历时为6h时,重现期为10a的部分降雨情景比重现期为20a的所有降雨情景的径流峰值大,降雨历时为24h、重现期为50a和100a所产生的径流峰值亦出现相同的现象。此外,在降雨重现期为10a时,降雨历时为6h的部分降雨情景所产生的径流峰值比降雨历时为24h所产生的径流峰值大。由此可以看出,降雨时空异质性对径流峰值的影响有时比降雨历时和降水量的影响更大,即降水量或者降雨历时越大时,不一定会产生较大的径流峰值,而降水量较小或者降雨历时较短时,也可产生较大的径流峰值。

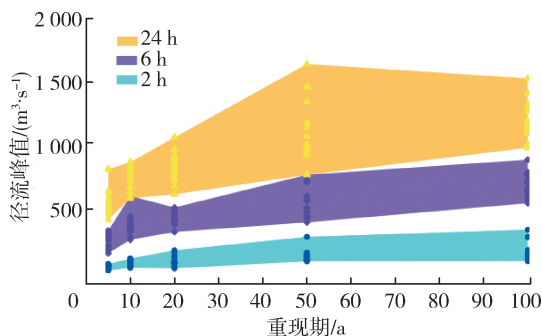


图7 不同降雨重现期和降雨历时下各降雨情景所产生的径流峰值

Fig.7 Runoff peak generated by each rainfall scenario under different rainfall return periods and rainfall durations

图8为 r 、 P_{Cl} 、 R_{max} 、 t_g 、 c_g 、 A_{25} 、 A_{50} 7个降雨时空异质性指标对径流峰值的影响。总体来说, r 、 P_{Cl} 、 R_{max} 等降雨时空异质性指标对径流峰值的影响较大,而在不同降雨历时下各指标的影响程度有所差异。其中, r 在降雨历时较小时对径流峰值的影响较大,随着降雨历时和降雨重现期的增大,其影响随之减小;在降雨历时为2h时,其对径流峰值的影响达到50%以上,而随着降雨重现期增大至100a,这一影响下降至25%;而在降雨历时为24h时, r 的影响在各重现期下基本可忽略不计。 P_{Cl} 则出现相反的情况,其对径流峰值的影响明显地在各降雨历时下呈现随着降雨重现期的增大而增大;而这一比例在重现期为100a可达到45%~60%左右。 R_{max} 虽

然对径流峰值具有相对较大的影响,但其随降雨重现期或降雨历时变化呈现较为无规律的变化。除了 A_{25} 和 A_{50} 在降雨历时为24h、降雨重现期较小时对径流峰值具有较大的影响外,其他指标对径流峰值的影响相对有限。值得一提的是,各指标之间的相互作用在各重现期和降雨历时均具有较大的影响,即不可忽视各要素之间相互作用对径流峰值的影响。

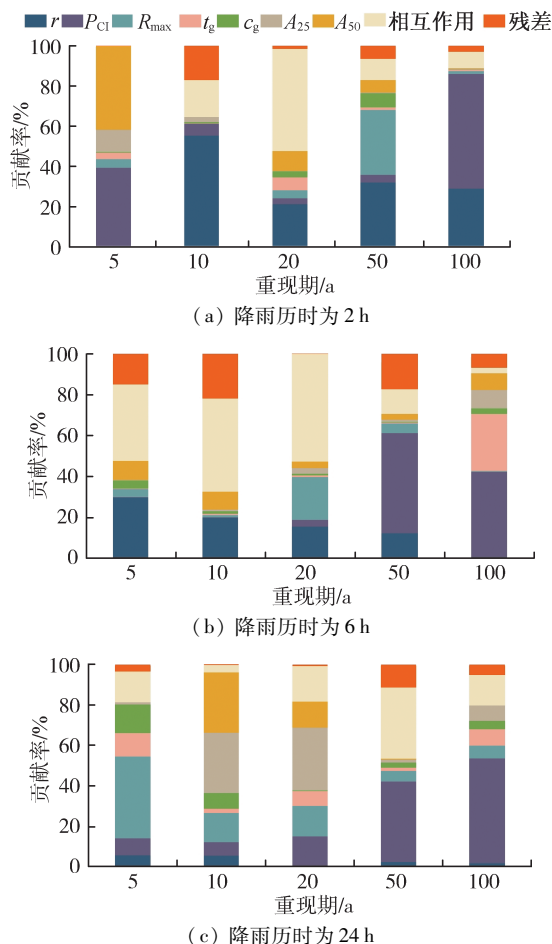


图8 不同降雨时空异质性指标对径流峰值的影响

Fig.8 Effects of different spatio-temporal heterogeneity indexes of rainfall on peak runoff

4 结论

a. 基于短时序(2008—2016)栅格降雨数据,采用RainyDay暴雨生成器能够生成与实际降雨时空分布相似的流域设计降雨。并通过对比,基于RainyDay暴雨生成器得到的设计降雨基本与根据实测降雨数据计算得到的设计降雨相近,虽然在降雨历时较短时,RainyDay暴雨生成器会出现一定程度的低估,但这一低估现象随着降雨重现期增大或者降雨历时增长有明显的改善。

b. 降雨时空异质性显著地影响着径流峰值。径流峰值随着降雨重现期或降雨历时增大而增大,

但降雨时空分布不同会导致降雨重现期较小或历时较短的降雨产生的径流峰值比降雨重现期较大或历时较长的降雨所产生的径流峰值大的现象出现,即降雨时空异质性对径流峰值的影响可比降雨历时或降雨量的影响大。

c. 雨峰系数、降雨集中度、1 h 最大降水量等降雨时空异质性指标对径流峰值的影响较大。其中,雨峰系数在降雨历时较短或降雨重现期较小时对径流峰值的影响较大,其影响可高达 50% 以上;而降雨集中度对径流峰值的影响随着降雨重现期和降雨历时的增大而增大,可高达 60%;1 h 最大降水量对径流峰值的影响也高达 40% 以上,但其随降雨重现期或降雨历时变化呈现较为无规律的变化。

参考文献:

[1] 陈佩琪,王兆礼,曾照洋,等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报,2020,39(9): 66-77. (CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Assessing influence of future urbanization on hydrological process in typical river basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(9): 66-77. (in Chinese))

[2] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))

[3] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 徐宗学,任梅芳,陈浩,等. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2): 10-14. (XU Zongxue, RENG Meifang, CHEN Hao, et al. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))

[6] 赵静,胡庆芳,王腊春,等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护,2020,36(2): 27-33.

(ZHAO Jing, HU Qingfang, WANG Lachun, et al. Analysis of precipitation characteristics in Taihu lake basin based on MSWEP [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 27-33. (in Chinese))

[7] SANCHES F, VERDUM R, FISCH G, et al. Extreme rainfall events in the southwest of rio grande do sul (Brazil) and its association with the sandization process [J]. American Journal of Climate Change, 2019, 8(4): 441-453.

[8] 谭乔凤,陈然,朱阳,等. 基于多因子最近邻抽样回归模型的径流相似性预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 521-527. (TAN Qiaofeng, CHEN Ran, ZHU Yang, et al. Runoff similarity forecast based on multi-factor nearest neighbor bootstrapping regressive model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 521-527. (in Chinese))

[9] 苏恒,徐宗学,李鹏,等. 1970—2017 年西江流域降水特性分析[J]. 水力发电学报,2021,40(6): 51-61. (SU Heng, XU Zongxue, LI Peng, et al. Characteristics of precipitation in Xijiang river basin from 1970 to 2017 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(6): 51-61. (in Chinese))

[10] 李宝,于磊,潘兴瑶. 北京市通州区降雨时空特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(4): 566-572. (LI Bao, YU Lei, PAN Xingyao. Temporal and spatial characteristics of precipitation in Tongzhou district, Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(4): 566-572. (in Chinese))

[11] ZHOU Z, SMITH J A, YANG L, et al. The complexities of urban flood response: flood frequency analyses for the Charlotte metropolitan region [J]. Water Resources Research, 2017, 53(8): 7401-7425.

[12] TRENBERTH K E, DAI A, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84(9): 1205-1218.

[13] WHITE R H, BATTISTI D S, SKOK G. Tracking precipitation events in time and space in gridded observational data [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(16): 8637-8646.

[14] ZHU Z, WRIGHT D B, YU G. The impact of rainfall space-time structure in flood frequency analysis [J]. Water Resources Research, 2018, 54(11): 8983-8998.

[15] 刘元波,吴桂平,赵晓松,等. 流域水文遥感的科学问题与挑战[J]. 地球科学进展,2020,35(5): 488-496. (LIU Yuanbo, WU Guiping, ZHAO Xiaosong, et al. Remote sensing for watershed hydrology: issues and challenges [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(5): 488-496. (in Chinese))

(下转第 66 页)