

气候变化与人类活动背景下城市极端暴雨的水文响应

王 俊^{1,2}, 熊 丰¹, 王若晨³

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

³汉江集团公司董事会战略办, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年3月16日; 录用日期: 2023年4月10日; 发布日期: 2023年4月24日

摘 要

郑州7·20特大暴雨涉及的水文科学问题是气候变化与人类活动背景下城市极端暴雨的水文响应。本文从气候变化与雨洪的“高置信度”联系、极端暴雨仍遵守降雨径流规律、定义城市极端暴雨重现期的难度、城市设计暴雨分析方法的异同和融合、海绵城市与水文循环和极端暴雨情景下洪涝应急体系的水文应对6个方面论述了城市极端暴雨的形成原因、分析难点和应对关键,并得出如下结论: 1) 气候变化是城市极端暴雨的气候尺度背景,是否考虑气候变化,极端暴雨的产汇流原理并无不同之处,城市暴雨灾害涉及的科学问题是水文循环的基本问题,核心是理清直接人类活动背景下不透水面积增大、调蓄场所减少等的产汇流规律。2) 市政排水与水利排涝的面雨量重现期计算方法不一,可通过重现期衔接关系、地区线性矩估计等技术手段进行融合;参照江河防洪标准,选用典型年进行排涝设计也是较实用的选择。3) 从国家水网的高度来重新认识城市洪涝防治,以自然河湖为基础,引调排水工程为通道,调蓄工程为节点,重点要加强水系连通,增加大容量调蓄设施,开发城市水系智慧调度与管理系统,提升应对措施极端暴雨的预报预警能力。

关键词

郑州7·20特大暴雨, 气候变化, 城市极端暴雨, 水文响应

Hydrological Response of Urban Extreme Rainstorm under Climate Change and Human Activities

Jun Wang^{1,2}, Feng Xiong¹, Ruochen Wang³

作者简介: 王俊(1958-), 男, 正高级工程师, 珞珈讲座教授, 主要从事水文学与水资源研究。Email: wangjwd@whu.edu.cn

文章引用: 王俊, 熊丰, 王若晨. 气候变化与人类活动背景下城市极端暴雨的水文响应[J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 109-116.
DOI: 10.12677/jwrr.2023.122013

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

³Strategy Office, Hanjiang Group, Wuhan Hubei

Received: Mar. 16th, 2023; accepted: Apr. 10th, 2023; published: Apr. 24th, 2023

Abstract

The hydrologic problem with respect to the 7·20 torrential rainstorm in Zhengzhou city was the hydrologic response of urban extreme rainstorm under climate change and human activities. This paper discussed the causes, and analyzed the difficulties and countermeasures of urban extreme rainstorm from the following six aspects, *i.e.*, the “high confidence” relationship between climate change and rainfall and flood, extreme rainstorm still following the law of rainfall runoff, the difficulty of defining the return period of urban extreme rainstorm, the similarities, differences and integration of urban design rainstorm methods, sponge city and hydrological cycle, and hydrological response of flood emergency system under extreme rainstorm. The main conclusions are as follows: 1) climate change is the climate scale background of urban extreme rainstorm. Whether climate change is considered or not, there is no difference in the production and concentration principle of extreme rainstorm. The scientific problems involved in urban rainstorm disaster are the basic problems of hydrological cycle, and the core is to clarify the runoff generation and concentration law with increase of impervious area and decrease of regulating structure under human activities. 2) The calculation methods of areal rainfall return period of municipal department and water conservancy department are different, which can be integrated by technical means such as return period connection relationship, regional linear moment method and so on. It is also a practical choice to select typical year method for drainage design with reference to river flood control standards. 3) From the perspective of the national water network to reconsider the prevention and control of urban flood is necessary. Based on natural rivers and lakes, diversion, drainage, regulation and storage projects as channels and nodes, respectively, it is desired to strengthen the connection of water systems and to increase large-capacity regulation and storage facilities, as well as developing the intelligent operation and management system of urban river network and improving the prediction and early warning ability of extreme rainstorms.

Keywords

Zhengzhou 7·20 Rainstorm, Climate Change, Urban Extreme Rainstorm, Hydrological Response

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

郑州7·20暴雨灾害的发生,引起社会和业内广泛的关注。2021年7月20日2时起观测到的郑州24 h降水量达622.7 mm,而中国气象上规定,24 h降水量250 mm以上即为特大暴雨。其中,7月20日16至17时的1 h降水量达201.9 mm,超过河南“75·8特大暴雨”创造的我国陆地小时降水量极值198.5 mm [1]。

目前关于郑州7·20暴雨的研究多聚焦于对气象成因、风险管理及防御对策的思考与建议。例如,苏爱芳等[2]分析了郑州7·20暴雨洪涝灾害性过程的基本观测现象,研究结果表明:此次极端大暴雨的形成原因复杂,

大气环流稳定、水汽和能量充足、地形作用明显以及对流系统不断向郑州地区积聚、合并及停滞是基本成因。史文茹等[3]采用地面降水观测、静止卫星观测、再分析资料和数值模式预报数据对郑州7·20暴雨开展了多模式预报偏差原因分析,结果表明:7月20日白天存在中低层切变发展成闭合低压系统的过程,为对流发展提供了动力条件。章卫军等[4]构建郑州市主城区水文水动力二维洪涝模型分析评估了郑州7·20暴雨的动态淹没、地面水深流速等风险,模拟结果表明:郑州市主城区大部分区域最大积水深度超过城市内涝防治要求的0.25 m,部分区域最大积水深度甚至在2.00 m以上。陈文龙等[5]结合郑州7·20暴雨启示,通过深入分析我国高密度城市洪涝的主要特征、成因,从“防御体系有韧性、基础设施有韧性、极端暴雨少损失”三个方面提出了高密度城市暴雨洪涝防治对策。

郑州7·20特大暴雨所反映的问题,既涉及到对暴雨本身的分析、灾害评估和应急体系建设,也涉及到如何评估气候变化与人类活动对极端暴雨的影响,更涉及到城市洪涝防治中雨洪模型应用和海绵城市建设。目前关于该暴雨气象成因的分析和灾害评估和应急体系建设等已有较多研究,但尚未有关于郑州7·20特大暴雨涉及的水文问题的全面探讨。从水文的角度看,郑州7·20特大暴雨涉及的科学问题是气候变化与人类活动背景下城市极端暴雨的水文响应。本文从该角度出发,结合现有研究成果,论述了城市极端暴雨的形成原因、分析难点和应对关键,以为城市极端暴雨洪水的应对提供参考。

2. 气候变化与极端暴雨的“高置信度”联系

全球变暖是不争的事实。图1和图2分别展示了1850~2020年全球平均温度距平及1901~2020年中国地表年平均气温距平,结果均显示地表温度增加趋势显著;图3~4分别展示了中国1961~2020年平均年降水量和地表水资源量的变化[6]。根据IPCC AR6第八章水循环变化的评估,全球平均降水量和蒸发量随着全球变暖而增加,更温暖的气候增加了对天气系统的水汽输送,这使得雨季更加潮湿,结论是气候变化与极端暴雨有着“高置信度”联系。高置信度基于统计方法,反映归因和物理机制的不确定性,是气候尺度,而任一场短历时暴雨是天气尺度,将气候变化作为洪涝风险的宏观背景考虑是十分正确的,但具体到任一场暴雨,尚无法指证其由气候变化引起的属性,就郑州7·20暴雨而言,还是应该从天气系统背景切入:副高西伸北抬,为黄淮流域“七下八上”冷暖空气在此交汇创造了有利条件,再加上即将形成的台风对大气的调整,增加了对该地区的水汽输送,加剧了降水活动。

关注气候变化和人类活动对水循环的影响,除了做出对温度距平的统计,也要分析人类活动的直接影响(流域面上的水工程调节和城市下垫面的变化),而水循环变化的周期性也不能忽略。

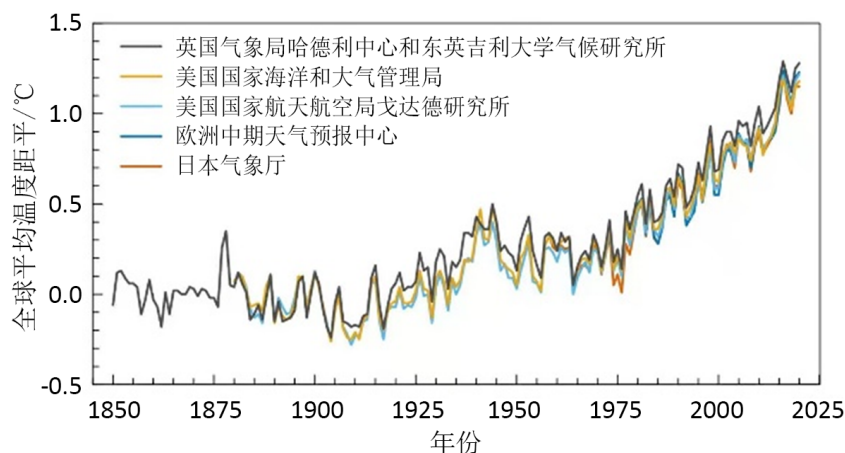


Figure 1. Anomaly of global average temperature from 1850 to 2020

图1. 1850~2020年全球平均温度距平

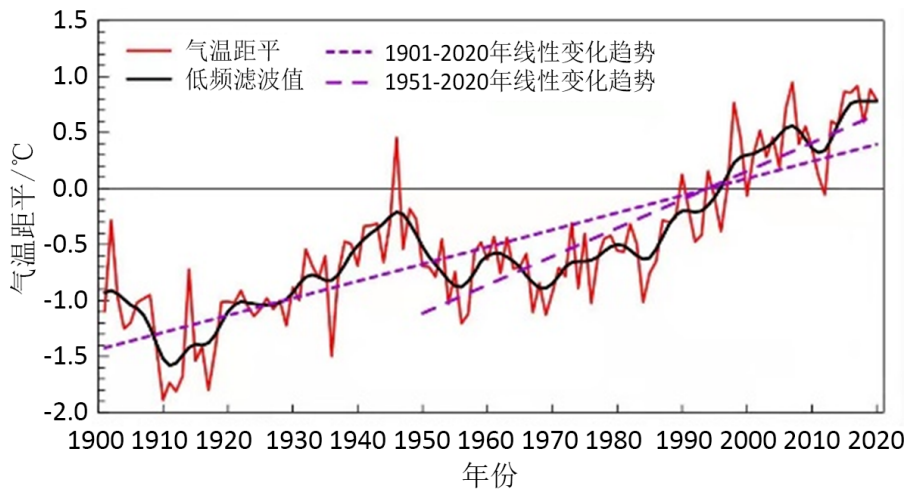


Figure 2. Anomaly of average temperature from 1901 to 2020 in China
图 2. 1901~2020 年中国地表年平均气温距平

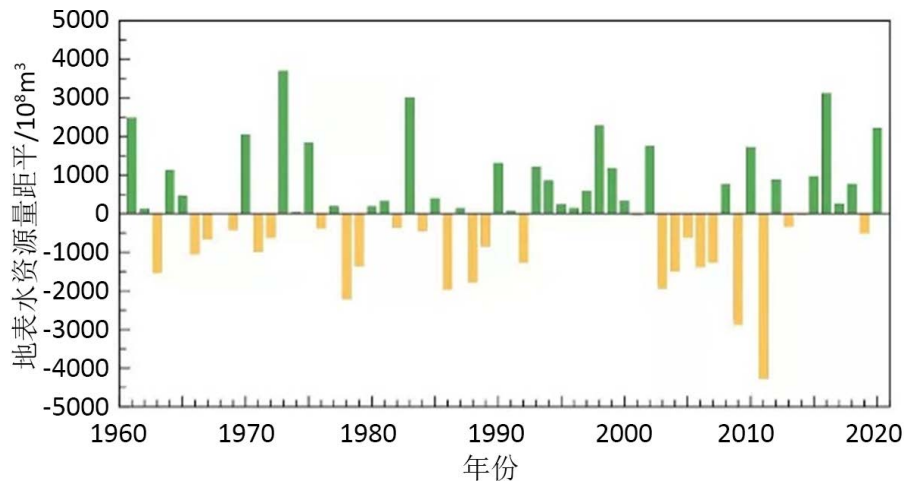


Figure 3. Anomaly of average annual precipitation in China from 1961 to 2020
图 3. 1961~2020 年中国平均年降水量距平

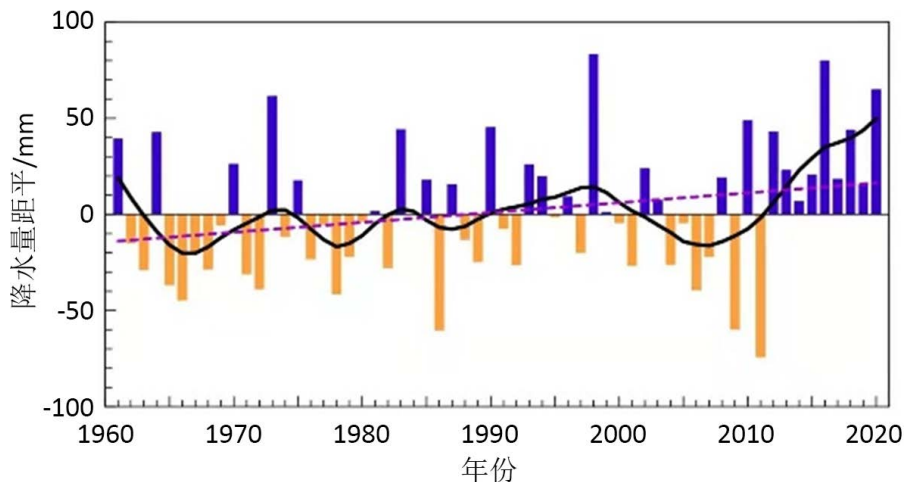


Figure 4. Anomaly of surface water resources in China from 1961 to 2020
图 4. 1961~2020 年中国地表水资源量距平

3. 极端暴雨仍遵守降雨径流规律

除了河南“75·8特大暴雨”(其暴雨中心泌阳林庄8月7日的降雨量达1005.4 mm)以外,近年还有多次调查和实测的特大暴雨均未定义为是气候变暖下的极端事件,例如:1)1977年8月1日,陕西榆林地区和内蒙古鄂尔多斯地区交界的毛乌素沙漠地区出现罕见的特大暴雨,经实地调查,内蒙古乌审旗木多才当10 h降雨量估计达1400 mm。2)1998年7月9日,陕西省商洛地区出现罕见的特大暴雨。经实地调查,丹凤县宽坪7 h降雨量估计达1300 mm,商南县吊庄8 h降雨量估计达1050 mm。3)2007年8月9~11日,广东雷州半岛普降暴雨,部分地区特大暴雨。暴雨中心(幸福农场)降雨量为中国大陆目前实测的24 h最大降雨量(达到1193.2 mm)。

是否考虑气候变化背景,极端暴雨的产汇流原理并无不同之处。气候变化条件下在时间上可能出现极端暴雨的几率较大,在空间上极端暴雨出现在城市和乡村具有随机性,大暴雨条件下城市热岛效应属于次要因素。暴雨出现在城市表现为城区内涝为主,如2012年北京7·21暴雨和本次郑州7·20暴雨;出现在山区表现为山洪,如2021年9月汉江流域鸭河口水库超1000年一遇设计洪水位的特大洪水;出现在平原农区,表现为洪涝兼有,如2021年湖北随州8·20暴雨。现有的产汇流分析模型足以根据不同的下垫面条件,有针对性的推算洪涝过程和分析灾害风险。

4. 定义城市极端暴雨重现期的难度

郑州单站1 h降水201.9 mm被定义为超1000年一遇,这在业内引起了争议。以同一场洪水为例,受洪水来源、地区组成、洪水遭遇影响,很难用一个重现期来表达不同河段(上游、下游)洪水的大小。即使是同一河段,洪峰和时段洪量的重现期也不尽相同。判断一场降水的重现期,同样受时空分配约束。时段方面,城区(市政排水)一般采用5 min, 10 min, 30 min, 60 min, 180 min的研究时段,而农区(水利排涝)一般采用1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 3 d, 7 d, 15 d, 30 d的研究时段。空间方面,当降雨笼罩范围极小时,可以计算单站降水重现期,否则一般均需要计算面雨量重现期。因此,仅采用单站短历时雨量难于确定面上一次降水的重现期。另一方面,市政排水的降水频率计算经验公式,无法外延稀遇设计频率计算值。水利排涝的降水频率计算存在两个问题,一是降雨笼罩面积和采用的站点数目均对面雨量重现期的分析结果产生较大影响,面雨量系列获取不易,二是即使以点雨量计算,也存在复杂的点面关系折算问题,因此重现期难以直接判定,需事后深入分析。

此外,气象、水文和市政部门基于各自需求,都设有城市雨量观测站,由于所采用的自记翻斗雨量计有0.1、0.2、0.5 mm不同分辨率的客观存在,有可能因累积误差而对雨量重现期的判定带来一些噪声,需引起注意。

5. 城市设计暴雨分析方法的异同和融合

市政排水和水利排涝在暴雨频率分析中选取了不同的采样方法。市政排水在城市规划和室外排水规范中,采用超定量法、年多次法,考虑逐次大暴雨的“次频率”进行暴雨数据采样,进而分析城市暴雨,主要研究5 min~180 min短历时时段。以10~50年重现期为例,采用的经验暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{167A_1(1+C \lg P)}{(t+b)^n} \quad (P=10 \sim 50a) \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度 $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; t 为降雨历时(min); P 为设计重现期(年); A_1 , C , b , n 为公式参数,根据统计方法进行计算。

水利排涝在进行暴雨频率分析时选取年最大值法,设计重现期以年为单位,选择1 h~60 d等较长的研究时段。因此水利排涝和市政排水以不同采样方法为基础,分析得到的设计暴雨成果存在较大差异性。

众多学者研究了关于两者差异的解决方法。例如欧阳硕等[7][8]以2016武汉南湖地区降雨为例,分析对比了市政排水和水利排涝的城市设计暴雨分析方法;结果表明:水利排涝的短中历时设计暴雨计算成果与实测暴

雨频率分析成果较为接近, 10 min、1 h 短历时成果与市政排水暴雨经验公式贴合较好; 市政排水暴雨经验公式 1 min~10 min 短历时设计暴雨成果与城市暴雨特性较为贴合。黄国如等[9]构建了市政排水与水利排涝设计标准的衔接关系。采用广州市长序列降雨资料构建长短历时降雨量的重现期衔接对比关系, 表明汇流历时长短不同是导致市政和水利两者标准中重现期相差较大的主要原因, 市政排水与水利排涝设计暴雨雨峰的重现期大约存在 5 倍的衔接关系。谢华和黄介生[10]分析对比了市政排水系统和水利排涝系统的异同, 并给出了采用不同暴雨选样方法重现期的衔接关系和频率分布模型的转换关系。

国外做法以美国最具代表性。美国 NOAA 开发了完整的“暴雨频率分析地区线性矩法”, 并且完成了全美暴雨频率图集的编制, 涵盖了常用的设计时段和完整的频率估计值, 包括 5 m、10 m……60 m、2 h、3 h……24 h、2 d、4 d……7 d……60 d 共 18 个设计时段, 涵盖 1a、2a……10a……100a、200a、500a、1000a 等完整的频率估计值, 供联邦、州、县三级各类工程建设和地区防洪规划使用。近年来有学者在国内开展研究[11]。

在防洪实践中, 各种防洪保护对象或工程本身要求达到的防御洪水的标准, 通常以频率法计算的某一重现期的设计洪水位防洪标准, 也可以某一实际洪水(或将其适当放大)作为防洪标准, 如长江直接以 1954 典型年的洪水(或将其适当放大)作为防洪标准。处理城市暴雨重现期, 也可采用典型年的方法, 简明实用, 针对性强。如将来郑州若以防御 7·20 暴雨为标准, 则计算出暴雨产水量后, 按洼地蓄水量、河流湖泊汇流量等进行分析计算, 再确定排涝能力, 则再遇频率低于 7·20 重现期暴雨时均能较好的应对内涝问题。因此, 典型年法可以认为是解决内涝问题最实用的方法。

近年来, 基于卫星遥感反演流域长系列气象数据集的手段已成为一种获得面雨量和设计暴雨的新方法。尹家波等[12]考虑融合卫星遥测数据、气候模式再分析数据和地面观测数据, 采用国际上应用较多的 MSWEP V2 高精度降水数据集和欧洲中期天气预报中心的 ERA5 气温数据集, 通过偏差校正方法将巢湖流域的日降水和气温数据延长, 获得了巢湖流域的长系列高精度气象数据集。目前最新的 GPM 遥感卫星的分辨率已达到 0.1°、30 min 量级, 在城市内涝的暴雨分析中, 可以作为一种新手段。

6. 海绵城市与水文循环

城市暴雨致涝灾害的原因通常有以下三点: 1) 强降雨; 2) 下垫面不透水面积骤增; 3) 行洪道上违规建设致使涝灾伴生洪灾。

通常而言, 海绵城市的源头控制系统只能应对中小雨的径流蓄滞问题, 通过渗、滞、蓄水的方式将 70% 的降雨就地消纳, 避免形成洪峰径流, 同时将雨水资源化, 促进水文循环。国外的分散式低影响开发设施(LID), 主要包括下凹式绿地、透水铺砖、绿色屋顶等, 是狭义上的海绵城市。广义的海绵城市又扩大为源头控制系统、管网建设、调蓄设施和水利防洪设施[13]。尽管已有狭义和广义之分, 但对海绵城市在重大暴雨灾害面前的承受能力应有清醒的充分估计, 海绵(sponge)的内涵其实就是包气带的形象描述, 是一个水文的基础概念。

城市暴雨灾害的基本科学问题依然是水文循环, 核心是模拟分析降水量经截留、填洼、下渗后产生的自然河道产汇流、库堰湖塘存水、抽排水等各部分水量。通过破垵行洪、水系再调整和躲避风险图等措施可进一步分配无法抽排的水量。现有各种模型的产流部分已能较好的解决城市降雨产流问题, 当前的主要难点是透水/不透水的面积比问题。河道汇流及风险图制作采用水文水动力 2D 洪涝模型耦合 GIS/DEM 技术, 可以充分反映城区产汇流状况[14]。

有关研究指出, 此次郑州 7·20 暴雨, 管网在设计能力条件下排水量(含海绵设施)占本次极端降雨总雨量的 19%, 50 年一遇防涝系统排水量(含管网)约占 32%, 超额水量占总产水量的 68%, 大量超出内涝防治体系能力标准的雨水将形成快速的地表坡面汇流, 流向地势低洼区域。超额水量不可能全部排走。因此, 治理城市暴雨灾害, 不论何种尺度的海绵城市, 涝是绝对的, 免涝是相对的。核心就是理清产汇流的关系、透水/不透水面积的比例, 并加强 GIS/DEM 信息采集, 完善洪涝演进模型, 按蓄排引水量占比合理配置排涝能力, 制作涝渍风险

淹没图。

7. 极端暴雨情景下洪涝应急体系的水文应对

郑州 7·20 特大暴雨发生后,各地强化预警和响应一体化管理,引入该场特大暴雨作推演。从水文应对角度出发,建立与完善极端暴雨情景下的城市洪涝应急体系,主要有以下考虑:

1) 从国家水网的高度来重新认识城市洪涝防治

国家水网,是以自然河湖为基础,引调排水工程为通道,调蓄工程为节点,智慧调控为手段,集水资源优化配置、流域防洪减灾、水生态系统保护等功能于一体的综合工程体系。据此,城市洪涝防治应加强水系连通,增加大容量调蓄设施,再设置一批单退(退人不退田)、双退(退人又退田)圩垸;综合审视城市圈扩大和城镇化过程中新出现的水安全(防洪排涝、水资源配置和排污)问题。

2) 修订排涝标准

修订城区防洪排涝规划,与城区防洪标准(如重要城市 100~200a 一遇)相匹配,与城区重要地位相适应,考虑已发生的典型特大暴雨实际,适当提高城区内涝防治设计标准;统一认识,融合水利排涝、市政排水的城市设计暴雨分析方法。

3) 加强预报预警技术手段

本次郑州暴雨过程中,降水预报敢于报出未来 100 mm/3 h 以上雨量,尽管不敷使用,今后还要加强,但从实战角度说,应该是发挥了重要作用,主要的问题在于预警不足。城市洪涝防治的预报预警,应特别注重预警,可进一步开发城市水系智慧调度与管理系统,统一管理防洪与排涝调度,完善气象、水文、市政监测站网,实行数据共享。

8. 结论

郑州 7·20 特大暴雨涉及的水文科学问题是气候变化与人类活动背景下城市极端暴雨的水文响应。本文结合本次特大暴雨所反映的问题,探讨了城市极端暴雨的形成原因、分析难点和应对关键,所得结论如下:

1) 气候变化是城市极端暴雨的气候尺度背景,极端暴雨从天气尺度背景已能清楚地解释水汽来源和输送,是否考虑气候变化背景,极端暴雨的产汇流原理并无不同之处;城市暴雨灾害所面对的,依然是水文循环的基本问题,核心是理清直接人类活动背景下不透水面积增大、调蓄场所减少等的产汇流规律。

2) 市政排水与水利排涝的面雨量重现期计算方法不一,可通过重现期衔接关系、地区线性矩法等技术手段进行融合。参照江河防洪标准,选用典型年进行排涝设计也是较实用的选择。

3) 从国家水网的高度来重新认识城市洪涝防治,以自然河湖为基础,引调排水工程为通道,调蓄工程为节点,重点要加强水系连通,增加大容量调蓄设施,开发城市水系智慧调度与管理系统,提升应对措施极端暴雨的预报预警能力。

基金项目

国家重点研发计划(2021YFC3200301)和国家自然科学基金地区联合基金(U20A20317)。

参考文献

- [1] 何秉顺. 河南郑州山区 4 市 2021 年“7·20”特大暴雨灾害调查的思考与建议[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(3): 37-40.
HE Bingshun. Reflections and suggestions on the investigation of the “7·20” heavy rainstorm in 2021 in 4 cities in the mountainous region of Zhengzhou, Henan. China Flood and Drought Control, 2022, 32(3): 37-40. (in Chinese)
- [2] 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 李周, 席乐, 栗晗. 郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445-454.
SU Aifang, LV Xiaona, CUI Liman, LI Zhou, XI Le and LI Han. Basic observation analysis of the extreme rainstorm in

- Zhengzhou on 7·20. Heavy Rainfall Disaster, 2021, 40(5): 445-454. (in Chinese)
- [3] 史文茹, 李昕, 曾明剑, 张冰, 王宏斌, 朱科锋, 诸葛小勇. “7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 688-702.
SHI Wenru, LI Xin, ZENG Mingjian, ZHANG Bing, WANG Hongbin, ZHU Kefeng and ZHUGE Xiaoyong. Multi-model comparison and analysis of high-resolution regional model forecasts for the “7·20” heavy rainstorm in Zhengzhou. Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 688-702. (in Chinese)
- [4] 章卫军, 廖青桃, 杨森, 张馨匀, 张晨玲, 向美焘, 雷征旻. 从郑州“2021.7.20”水灾模型推演看城市洪涝风险管理[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 1-4.
ZHANG Weijun, LIAO Qingtao, YANG Sen, ZHANG Xingyun, ZHANG Chenling, XIANG Meitao and LEI Zhengmin. Urban flood risk management from “2021.7.20” flood modeling in Zhengzhou. China Flood Control and Drought Relief, 2021, 31(9): 1-4. (in Chinese)
- [5] 陈文龙, 杨芳, 宋利祥, 张大伟, 刘培, 陈高峰. 高密度城市暴雨洪涝防御对策——郑州“7·20”特大暴雨启示[J]. 中国水利, 2021(15): 18-20.
CHEN Wenlong, YANG Fang, SONG Lixiang, ZHANG Dawei, LIU Pei and CHEN Gaofeng. Countermeasures against heavy rainfall and flooding in high-density cities: Insights from the “7·20” heavy rainfall in Zhengzhou. China Water Resources, 2021(15): 18-20. (in Chinese)
- [6] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021) [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Climate Change Center of China Meteorological Administration. China climate change blue book (2021). Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [7] OUYANG, S., XU, C. J. and SHAO, J. Discussion on the analysis method of urban design rainstorm under the “new normal” of “city seeing the sea”. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019, 344: 012109.
- [8] 王俊, 贾建伟, 张明波, 等. 水文分析计算与海绵城市[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 74-78.
WANG Jun, JIA Jianwei, ZHANG Mingbo, et al. Hydrological analysis and calculation of sponge cities. China Flood and Drought Control, 2017, 27(3): 74-78. (in Chinese)
- [9] 张明珠, 曾娇娇, 黄国如, 等. 市政排水与水利排涝设计暴雨重现期衔接关系的分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 131-135.
ZHANG Mingzhu., ZENG Jiaojiao, HUANG Guoru, et al. Analysis of the relationship between municipal drainage and hydraulic drainage design storm recurrence period. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(1): 131-135. (in Chinese)
- [10] 谢华, 黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2007(5): 10-13.
XIE Hua, HUANG Jiesheng. Study on the relationship between municipal drainage and regional flooding in urbanized areas. Journal of Irrigation and Drainage, 2007(5): 10-13. (in Chinese)
- [11] 林炳章. 水文气象分区线性矩法规范防洪设计标准的研究和应用[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2010 学术年会论文集(上册). 郑州: 黄河水利出版社, 2010: 272-280.
LIN Bingzhang. Research and application of the linear moment method of hydro-meteorological zoning to regulate flood control design criteria//Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2010 Annual Academic Conference of the Chinese Water Resources Society (Previous Book). Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010: 272-280. (in Chinese)
- [12] 尹家波, 郭生练, 王俊, 等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1335-1346.
YIN Jiabo, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Hydrological simulation based on Bayesian model averaging method to fuse multi-source data. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1335-1346. (in Chinese)
- [13] 刘俊, 韩波, 王战平, 等. 秦岭北麓城市型河流 LID 建设模拟及其水文响应特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 83-90.
LIU Jun, HAN Bo, WANG Zhanping, et al. Simulation of urban river LID construction and its hydrological response characteristics in the northern Qinling Mountains. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2021(2): 83-90. (in Chinese)
- [14] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392.
XU Zongxue, YE Chenlei. Urban storm flood simulation: Principles, models and perspectives. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese)