

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.003

郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响

王振亚^{1,2},姚 成³,董俊玲^{1,2},杨 慧^{1,2}

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南 郑州 450003;
2. 河南省气象台,河南 郑州 450003;3. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 基于郑州市自动气象观测站资料,对河南郑州 2021 年“7·20”特大暴雨的降水极端性、降水时段、小时降水变化等特征及其内涝影响进行分析,提出超标准降水条件下内涝防治的建议。分析表明:河南郑州“7·20”特大暴雨是一次极端强降水天气过程,可以分为 5 个明显的降水阶段,第三阶段和第四阶段呈现短时强降水频发、重发特征,特别是 20 日 12—18 时郑州市主城区连续出现 80 mm 以上的小时降水,是造成郑州市主城区严重城市内涝的主要原因。按照现有的内涝防治设计标准,郑州市主城区仍不足以防范此种强度的降水,但仍可以通过完善城市内涝防治的超标应急系统、提高城市易涝点内涝防治标准等措施减轻内涝灾害。

关键词: 郑州“7·20”特大暴雨;降水特征;短时强降水;内涝

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)03-0017-06

Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou

WANG Zhenya^{1,2}, YAO Cheng³, DONG Junling^{1,2}, YANG Hui^{1,2}

(1. CMA Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China;
2. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China;
3. Collage of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on observations from automatic weather stations, the extremes, periods and hourly variation characteristics of precipitation and the urban flooding influence are analyzed for the “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou City, Henan Province, and some suggestions on the prevention and control of waterlogging under over standard precipitation conditions are put forward. The results show that this is an extreme precipitation weather process, and can be divided into five obvious precipitation periods. The short-term heavy precipitation shows characteristics of frequent occurrence and repeated occurrence at the third and fourth periods, while the continuous precipitation heavier than 80 mm/h in the main urban of Zhengzhou from 12:00 to 18:00 CST on 20 July is the principal cause of the serious urban flooding. The current design standards of urban flooding prevention is not enough to prevent precipitation with this intensity in the main urban area of Zhengzhou City, but we could reduce the flooding disasters by improving the emergency system of urban flooding prevention while exceeding standard, raising the urban flooding prevention standards at prone points, and measures like this.

Key words: “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou; precipitation characteristic; short-term heavy precipitation; urban flooding

受气候变化影响,全球极端天气气候事件频发、强发,造成了严重的人员伤亡和经济损失^[1-2]。近年来,我国极端强降水事件频繁发生,越来越受到社会的广泛关注,如 2012 年北京“7·21”特大暴雨^[3]、2016 年 7 月 19—20 日华北极端强降水^[4]、2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨^[5]、2017 年广州“5·7”极端强降水^[6-7]、2013 年 8 月和 2018 年 8 月粤东极端强降水^[8],造成了严重的城市内涝、地质灾害和洪涝等次生灾害,威胁着城市交通网的安全运行^[9]和人民的生命财产安全。极端强降水成因分析及影响研究日益成为研

基金项目: 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室重点项目(KZ202001);河南省 2021 年度国家超级计算郑州中心创新生态系统建设科技专项(201400210800);河南气象省局科技计划重点项目(KZ201703)

作者简介: 王振亚(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事气象水文研究。E-mail: hhuwzy1981@163.com

引用本文: 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):17-22.
WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):17-22.

究热点^[10-13]。

2021 年 7 月 17—22 日,郑州出现了一次持续时间长、累计雨量大、影响范围广的极端强降水事件(简称河南郑州“7·20”特大暴雨),造成了严重的城市内涝、重大人员伤亡和经济损失,极为罕见。本文通过分析此次极端强降水事件的特点及其内涝影响,分析当前内涝防治存在的问题,提出超标降水条件下内涝防治的建议,以为城市内涝防治和城市安全运行提供参考。

1 降水资料

剔除错误和缺测数据较多站点^[14],本文采用河南省郑州市 178 个气象观测站(图 1)的 2021 年 7 月 17 日 8 时至 7 月 23 日 8 时逐小时降水资料,其中郑州外国语站 21 日 8 时后观测缺测,但由于其代表性较好,21 日 8 至 23 日 8 时资料采用其邻近站郑州中学附属小学站资料;选取陇海路京广路西北角积水监测点数据分析此次城市内涝灾害事件变化过程。

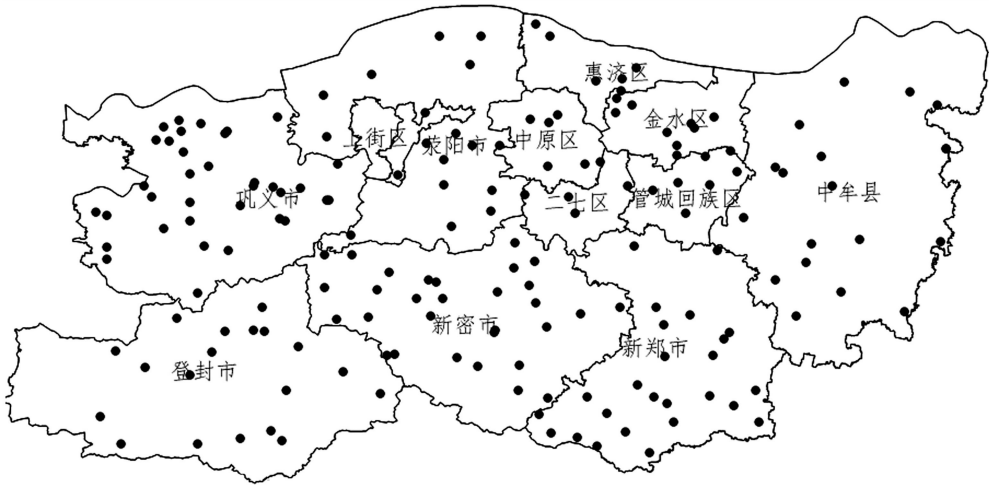


图 1 自动气象观测站分布
Fig.1 Distribution of the automatic weather stations

2 降水特征分析

2.1 极端性分析

由图 2 可知,郑州市大部分地区降水量在 400 mm 以上, 600 mm 以上降水主要分布在郑州市市辖区及其周边,800 mm 以上降水主要分布在巩义东部、荥阳西南部、新密市北部及二七区。此次降水过程是一次极端强降水过程。全市平均降水量 566.6 mm,149 个气象观测站(83.7%)降水量超过 400 mm,其中 16 个气象站降水量超过 800 mm,最大降水量(993.1 mm)在郑州市二七区侯寨,郑州、新密、嵩山、荥阳、巩义、登封 6 个国家级气象站日降水量突破建站以来历史日极值(图 2)。此次降水过程与河南“75·8”特大暴雨相比,最大 24 h 雨量和 6 h 雨量分别为郑州市辖区侯寨站 702.0 mm 和尖岗水库 469.5 mm,小于“75·8”特大暴雨最大 24 h 雨量(1 060 mm)和 6 h 雨量(830 mm)^[15],但最大小时雨量郑州站为 201.9 mm,不仅超过河南“75·8”特大暴雨最大 1 h 雨量(189.5 mm)^[16],也位列我国国家站 1 h 降水量排行榜首位,超出第二名 40 mm^[17]。

2.2 降水阶段特征分析

从郑州市小时平均雨量和最大小时雨强随时间变化(图 3)可以看出,此次降水过程呈现显著得多峰结

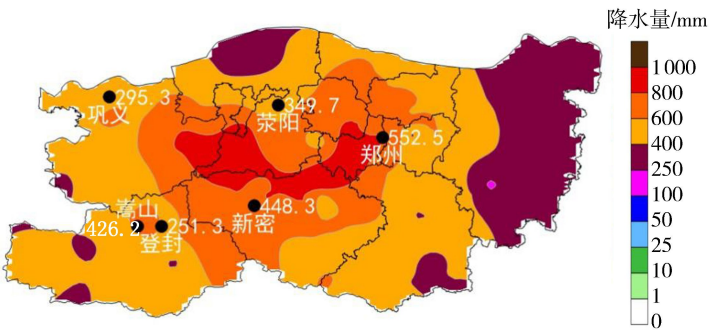


图 2 2021 年 7 月 17 日 8 时至 23 日 8 时累计降水量
Fig.2 Accumulative rainfall from 08:00 CST 17 to 08:00 CST 23 July 2021

构。从天气分析角度把降水从增强到减弱过程看成一个降水阶段,以平均雨量达到最小值为降水阶段的结束,此次降水过程可以分为5个阶段,时间分别为17日8时至17日19时、17日21时至19日8时、19日8时至20日3时、20日3时至21日16时和21日16时至23日8时。第一阶段郑州西部出现阵雨天气,最大雨量(14.3 mm)在登封雅馨园,最大小时雨强也出现在该站为14 mm;第二阶段全市以中到大雨为主,巩义、荥阳西部、登封东北部出现暴雨,最大雨量(105.9 mm)在巩义四初中,最大小时雨强登封大冶39.2 mm;第三阶段郑州市大部出现暴雨,其中巩义、荥阳、新密、登封、新郑和二七区出现大暴雨,巩义、登封、荥阳、新密局部特大暴雨天气,有2站雨量超300 mm,分别为巩义四初中303.3 mm、嵩山国家站300.9 mm,最大小时雨强新密密集77 mm;第四阶段全市大部出现特大暴雨天气,400 mm以上降水主要位于市辖区及荥阳中南部、新密中北部和巩义东部,有5站雨量超600 mm,其中最大雨量二七区侯寨达715 mm,最大小时雨量郑州站201.9 mm;第五阶段是降水减弱阶段,全市以中到大雨为主,登封及惠济区、中牟局部出现暴雨,最大降水量登封市佛垌113.8 mm,最大小时雨强也出现在该站为47.2 mm。

从以上分析可以看出,降水从郑州西部开始,暴雨中心逐步向东移动加强,在移动到二七区后迅速减弱。第三阶段和第四阶段呈现出短时强降水(小时降水量大于或等于20 mm)频发、重发特征,19日8时至21日8时小时最大雨强均在20 mm以上,19日19时至20日1时和20日6—22时22个时次中有20个时次最大小时雨强在50 mm以上,20日12—18时连续6 h最大小时雨强均在80 mm以上,其中20日15—18时分别有7站、6站、4站小时雨量超100 mm。多项研究^[3,9,12,18-19]表明短时强降水事件易引发严重的洪涝和城市内涝等灾害。登封、巩义、新密20日凌晨到上午开始出现山洪灾害,郑州市辖区下午开始出现严重内涝,这与暴雨中心的发展过程吻合。

3 内涝影响分析

3.1 最大积水深度与降水对比分析

最大小时雨强空间分布(图4)显示,最大积水深度在100 cm以上区域的最大小时雨强在100 mm以上,主要分布在中原区、二七区及金水区和管城区的交界处,惠济区、金水区的北部最大小时雨强较小,其最大积水深度也较小。从最大短时强降水频次空间分布(图5)可以看出,在12次以上的观测站主要分布在巩义东部、荥阳南部、二七区东南部和新密东北部及登封和新密交界处,二七区及中原区东部、金水区西部短时强降水次数在8~12次之间。与最大小时雨强相比,其与最大积水深度的相关性较差。

郑州市辖区西南部无内涝监测站,其可能原因是西南部地势较高,同

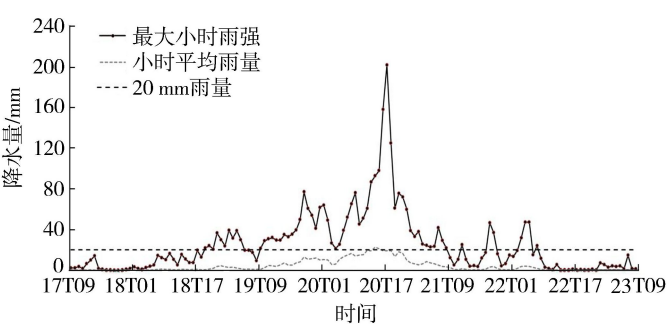


图3 郑州市小时平均雨量和最大小时雨强随时间变化
Fig.3 Temporal variation of average hourly rainfall and maximum hourly rain intensity

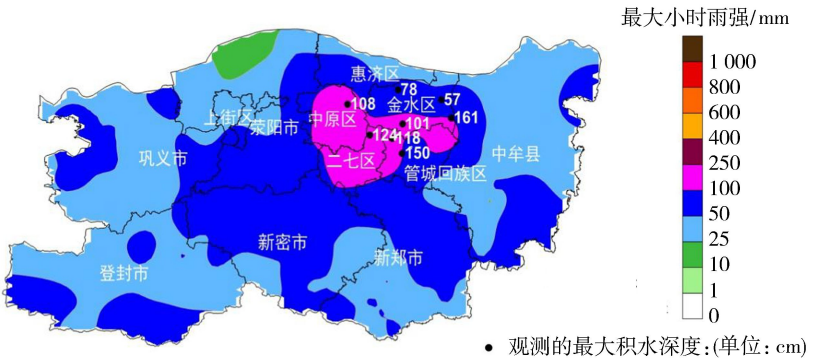


图4 郑州市最大小时雨强空间分布
Fig.4 Spatial distribution of maximum hourly rain intensity

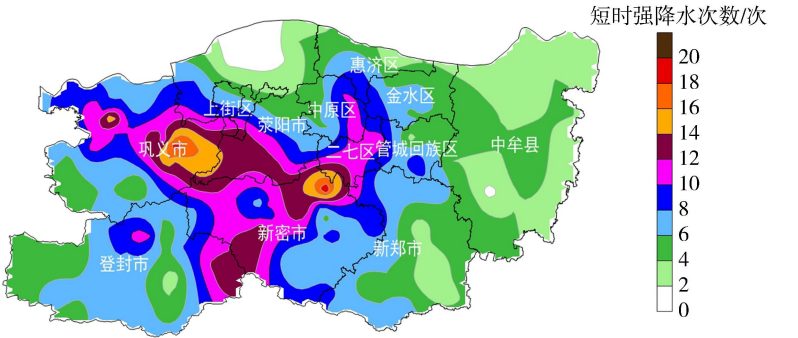


图5 郑州市短时强降水次数空间分布
Fig.5 Spatial distribution of short-duration heavy rain frequency

时由于该区域内分布有常庄、郭家咀、尖岗等水库,排水速度也较快,内涝风险较低;二七区为此次降水过程最强的暴雨中心,其积水深度普遍超过100 cm;东部的积水深度超过了暴雨中心区域,其可能原因是东部地势较低,同时暴雨中心由西向东移至此处时,西部山区暴雨径流和水库安全下泄造成下游河道水位抬升,造成积水向河道排水不畅。

3.2 郑州“7·20”特大暴雨内涝防治分析

按照室外排水设计规范(2016年版)^[20],排水系统和内涝防治设计暴雨强度公式均应采用年最大值法,本文采用文献[21]的郑州暴雨强度公式^[21]:

$$i = \frac{32.9(1 + 0.965lgP)}{(t + 24.8)^{0.929}}$$

(1)

式中: i 为设计暴雨强度,mm/min; P 为重现期,a; t 为降水历时,min。

式(1)适用范围为暴雨历时5~1440 min,设计重现期2~100 a。

根据《郑州市海绵城市专项规划(2017—2030年)》要求,郑州市内涝防治标准见表1。郑州市年径流总量控制率75%,对应日雨量22 mm;主城区管网设计标准按照5年一遇的标准设计,按照式(1)计算能够抵御小时雨强53.4 mm的暴雨;内涝防治设计重现期按照50年一遇标准设计,能够抵御小时雨强84.2 mm和24 h雨量110.2 mm的暴雨。从第2节分析可以看出,无论从日雨量还是小时雨强,本次强降水过程远远超过郑州市内涝防治标准,特别是20日12—18时郑州市主城区连续出现80 mm以上的小时降水,是造成郑州市主城区严重城市内涝的主要原因。

表1 郑州市内涝防治标准
Table 1 Standard of urban flooding prevention in Zhengzhou City

核心指标	内涝防治标准
年径流总量控制率	75%,对应日雨量22 mm
雨水管渠设计重现期	管网设计标准一般地区为3年一遇,重要地区为5年一遇,道路立交、隧道、下沉式广场为30年一遇
内涝防治设计重现期	城区与航空城的内涝防治设计重现期为50年一遇,其他规划区的内涝防治标准为20年一遇

《郑州市海绵城市专项规划(2017—2030年)》编制于2017年,2017年郑州常住人口988.1万,为特大城市,而郑州国家气象站历年最大小时雨强2007年为86.9 mm,内涝防治设计重现期50年一遇完全能够抵御这种强度的暴雨。2018年以后郑州市常住人口超过1000万,为超大城市,即使内涝防治设计重现期按照100年一遇设计,能够抵御最大小时雨强为93.4 mm和24 h雨量120.3 mm的暴雨,仍不足以抵御此次暴雨过程。按照《国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发[2021]11号)要求在防御此种超标标准极端强降水天气时应完善城市内涝防治的超标应急系统,包括建立完善城市排水与内涝防范超标应急预案,落实各相关部门工作任务、响应程序和处置措施,提高公众防灾避险意识和自救互救能力等措施,尽量减轻内涝带来的损失。

3.3 典型内涝监测点内涝过程分析

城市积水深度监测点一般为易涝点,由于此次降水过程中京广路隧道内涝严重,同时周边为老城区,选取离其最近的陇海路京广路西北角积水监测点为研究对象分析此次内涝灾害发生发展过程。取此积水点四周最近的4个气象观测站的加权平均雨量作为此监测点的降水。由图6可知,20日5时以前无积水,其最大小时雨强为12.1 mm;20日6时积水深度为16 cm,其小时雨量为18.8 mm;20日10时再次出现积水,11时积水深度为15 cm,9—11时2 h雨量为27.3 mm,13时以后随着小时雨强的增强积水深度迅速增加。地面积水设计标准要求道路中一条车道积水的积水深度不超过15 cm,计算此积水监测点暴雨强度重现期小于2年。以上分析说明易涝点是城市内涝防治的短板,亟需通过更新改造老城区排水管网、修复自然生态系统等措施补齐排水防涝设施短板,提高城市易涝点内涝防治标准。

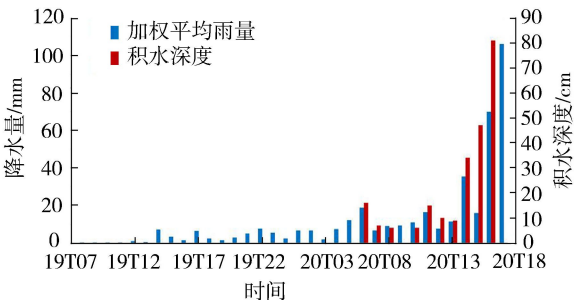


图6 陇海路京广路西北角积水监测点积水深度和其周边雨量站加权平均雨量时间变化

Fig. 6 Temporal variation of water depth at ponding position in the northwest corner of Longhai Road and Jingguang Road, and weighted average rainfall at surrounding precipitation station

4 结 论

- a. 河南郑州“7·20”特大暴雨是一次极端强降水天气过程,此次过程最大 24 h 雨量和 6 h 雨量与河南“75·8”特大暴雨相比较小,但小时最大雨强不仅超过河南“75·8”特大暴雨最大 1 h 雨量(189.5 mm),也位列我国国家站 1 小时降水量排行榜首位。
- b. 此次降水过程分为 5 个明显的降水阶段,在第三和第四阶段呈现出短时强降水频发、重发特征,特别是 20 日 12—18 时郑州市主城区连续出现 80 mm 以上的小时降水,是造成郑州市主城区严重城市内涝的主要原因。
- c. 按照现有的内涝防治设计标准,郑州市主城区仍不足以防范此种强度的降水。但仍可以通过建设完善城市内涝防治的超标应急系统、提高城市易涝点内涝防治标准等措施减轻内涝灾害。

参考文献:

[1] World Meteorological Organization (WMO). State of the global climate 2020. (WMO NO. 1264) [R] . Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2021

[2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] 谌芸,孙军,徐珺,等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 2012,38(10):1255-1266. (CHEN Yun,SUN Jun,XU Jun,et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part I : observation and thinking[J]. Meteor Mon, 2012,38(10):1255-1266. (in Chinese))

[4] 符娇兰,马学款,陈涛,等. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象,2017,43(5):528-539. (FU Jiaolan, MA Xuekuan,CHEN Tao,et al. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon,2017,43(5):528-539. (in Chinese))

[5] 赵娴婷,王晓芳,王珏,等. 2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象,2020,46(4):490-502. (ZHAO Xianting, WANG Xiaofang, WANG Jue, et al. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. Meteor Mon, 2020,46(4):490-502. (in Chinese))

[6] 田付友,郑永光,张小玲,等. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象,2018,44(4):469-484. (TIAN Fuyou,ZHENG Yongguang,ZHANG Xiaoling, et al. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou Extreme Rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon,2018,44(4):469-484. (in Chinese))

[7] 徐国强,赵晨阳. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨模拟中的背景场影响分析[J]. 气象, 2019,45(12):1642-1650. (XU Guoqiang,ZHAO Chenyang. Impact of background field in the numerical simulation of extremely severe rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon,2019,45(12):1642-1650. (in Chinese))

[8] 陈芳丽,姜帅,李明华,等. 边界层急流在粤东暴雨中心两次极端强降水过程中的作用[J]. 气象,2021,47(3):290-302. (CHEN Fangli,JIANG Shuai,LI Minghua,et al. The role of boundary layer jet in two severe rainfalls over eastern region of Guangdong Province[J]. Meteor Mon,2021,47(3):290-302. (in Chinese))

[9] 尹志聪,郭文利,李乃杰,等. 北京城市内涝积水的数值模拟[J]. 气象,2015,41(9):1111-1118. (YIN Zhicong,GUO Wenli, LI Naijie,et al. Numerical simulation of urban ponding in Beijing[J]. Meteor Mon,2015,41(9):1111-1118. (in Chinese))

[10] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护,2022,38(1):100-105. (LIU Jiahong,LUO Zhuoran,ZHANG Yongxiang,et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province[J]. Water Resources Protection, 2022,38(1):100-105. (in Chinese))

[11] 曹永强,李玲慧,邵薇薇,等. 珠海市香洲城区降水变化特征及成因分析[J]. 水资源保护,2021,37(5):9-15. (CAO Yongqiang,LI Linghui,SHAO Weiwei,et al. Analysis on characteristics and causes of precipitation change in Xiangzhou Urban Area,Zhuhai City[J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):9-15. (in Chinese))

[12] 杨悦莹,朱志华,蔡宴朋,等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护,2021,37(6):27-33. (YANG Yueying,ZHU Zhihua,CAI Yanpeng,et al. Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed[J]. Water Resources Protection, 2021,37(6):27-33. (in Chinese))

[13] 皋云,李琼芳,周正模,等. 镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析[J]. 水资源保护,2021,37(3):43-49. (GAO Yun,LI Qiongfang,ZHOU Zhengmo,et al. Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City[J]. Water Resources Protection, 2021,37(3):43-49. (in Chinese))

[14] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[15] 李泽椿,谌芸,张芳华,等. 由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J]. 气象与环境科学,2015,38(3):1-12. (LI Zechun, CHEN Yun,ZHANG Fanghua,et al. Consideration by “75·8” extreme heavy rainfall event in Henan[J]. Meteorological and

Environmental Sciences,2015,38(3):1-12. (in Chinese))

[16] 丁一汇. 论河南“75·8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J]. 气象学报, 2015,73(3): 411-424. (DING Yihui. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assessment[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015,73(3): 411-424. (in Chinese))

[17] 国家气象信息中心(中国气象局气象数据中心). 全国降水自记纸数字化成果出炉,带来了什么变化? [2021. 08. 13] [EB/OL]. <http://data.cma.cn/site/article/id/41148.html>.

[18] 伍红雨,李春梅,刘蔚琴. 1961—2014 年广东小时强降水的变化特征[J]. 气象,2017,43(3):305-314. (WU Hongyu, LI Chunmei, LIU Weiqin. Variation characteristics of hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961-2014[J]. Meteor Mon, 2017,43(3):305-314. (in Chinese))

[19] 付超,湛芸,朱克云,等. 2010—2016 年江西省暖季短时强降水特征分析[J]. 气象,2019,45(9):1238-1247. (FU Chao, CHEN Yun, ZHU Keyun, et al. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016[J]. Meteor Mon, 2019,45(9):1238-1247. (in Chinese))

[20] 上海市建设委员会. 室外排水设计规范:GB50014—2006[S]. 北京:中国计划出版社,2006.

[21] 荆燕燕. 郑州市暴雨强度公式推求研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2014.

(收稿日期:2021-10-20 编辑:刘晓艳)

(上接第8页)

[20] ZHANG Wenxia, KALLI F, PEILI W, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Journal of Science Advances,2021,7(31):eabf8021.

[21] 彭建,魏海,武文欢,等. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以深圳市茅洲河流域为例[J]. 生态学报,2018,38(11):3741-3755. (PENG Jian, WEI Hai, WU Wenhuan, et al. Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios: a case of Maozhou watershed in Shenzhen City[J]. Journal of Acta Ecologica Sinica,2018,38(11): 3741-3755. (in Chinese))

[22] WU Y, ZHONG P, ZHANG Y, et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River Basin, China[J]. Journal of Natural Hazards,2015,78(1): 635-651.

[23] HU P, ZHANG Q, SHI P, et al. Flood-induced mortality across the globe: spatiotemporal pattern and influencing factors[J]. Journal of Science of the Total Environment,2018,643:171-182.

[24] 大连市统计局,国家统计局大连调查队. 大连统计年鉴:2016[M]. 北京:中国统计出版社,2016.

[25] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology,1977,15(3): 234-281.

[26] DYER J S. Remarks on the analytic hierarchy process[J]. Management Science,1990,36(3):249-258.

[27] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):11-16. (in Chinese))

[28] WANG T, CHEN J, WANG T, et al. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation [J]. Journal of Natural Hazards,2015,76(2):747-767.

[29] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报,2002,3(11):1-9. (SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. Journal of Natural Disaster,2002,3(11):1-9. (in Chinese))

[30] 张继权,李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2007.

[31] 张会,张继权,韩俊山. 基于 GIS 技术的洪涝灾害风险评估与区划研究:以辽河中下游地区为例[J]. 自然灾害学报,2005,14(6): 141-146. (ZHANG Hui, ZHANG Jiquan, HAN Junshan. GIS-based assessment and zoning of flood /waterlogging disaster risk: a case study on middle and lower reaches of Liaohe River[J]. Journal of Natural Disaster,2005,14(6): 141-146. (in Chinese))

[32] 徐玉霞,许小明,马楠. 县域尺度下的陕西省洪涝灾害风险评估与区划[J]. 干旱区地理,2018,41(2):306-313. (XU Yuxia, XU Xiaoming, MA Nan. Assessment and regionalization of flood disaster risk in Shaanxi Province at the country scale[J]. Journal of Arid Land Geography,2018,41(2):306-313. (in Chinese))

[33] 张前东,史春彦. 济南市长清区暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 沙漠与绿洲气象,2018,12(3):64-69. (ZHANG Qiangdong, SHI Chunyan. Risk zoning of rainstorm and flood disaster in Changqing District of Ji'nan City[J]. Journal of Desert and Oasis Meteorology,2018,12(3):64-69. (in Chinese))

[34] 温克刚,李波,孟庆楠. 中国气象灾害大典·辽宁卷[M]. 北京:气象出版社,2005.

[35] 大连市气象局办公室. 大连市气象局关于公布大连市暴雨灾害风险区划的通告[R]. 大连:大连市气象局,2017.

(收稿日期:2021-10-01 编辑:胡新宇)