

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.090



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



超大城市洪涝灾害成因综合解析 ——以重庆市为例

仇文岗¹, 王云浩¹, 胡庆芳², 孙伟鑫¹, 金君良²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室, 南京 210029)

摘要:近年来, 极端天气事件呈现趋多趋强态势, 变化环境下洪涝灾害频发给社会经济发展带来严峻挑战。重庆是中国西部超大城市和成渝城市群“双核”之一, 主城区地貌以山地、丘陵为主, 受上游江河来水和三峡库区回水的双重影响, 洪涝灾害风险突出。以重庆市历年洪涝灾害事件为基础, 梳理重庆市防涝减灾现状, 分析水文、地理、地形、城市化、气象等因素对重庆市洪涝灾害发生频率和强度的影响, 结合这些洪涝灾害致灾因子进一步对重庆市的孕灾环境和承灾体进行分析, 提出针对重庆中心城区洪涝治理的对策建议。分析发现: 重庆市洪涝灾害受多种因素综合影响, 特殊的地理位置和山地城市的地形条件决定了重庆防洪治涝的艰巨性; 重庆市河流纵横, 山高谷深, 完全具备发生洪涝灾害的孕灾条件; 应充分考虑气象水文和经济社会发展的新情况, 根据三峡水库等建成后的洪涝灾害特征和城区防洪防涝能力现状, 及时优化城市洪涝灾害防御体系。

关键词:城市灾害; 洪涝灾害; 防灾减灾; 防洪规划

中图分类号: TU998.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)01-0001-10

Comprehensive analysis on causes of flood disaster in megacities: A case study of Chongqing

ZHANG Wengang¹, WANG Yunhao¹, HU Qingfang², SUN Weixin¹, JIN Junliang²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China)

Abstract: In recent years, extreme meteorological and hydrological events have become more frequent and intense, and the frequent occurrence of flood disasters in a rapidly evolving environment has brought severe challenges to socio-economic development. This study focuses on Chongqing, one of two principal cores within the megacities of western China, part of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration. This city's terrain, predominantly hilly and mountainous, together with its proximity to upstream rivers and the backwater of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA), highlights its exposure to the threat of flood disasters. This study focuses on Chongqing's historical flood disaster events to assess the current state of flood prevention and disaster reduction efforts within the city. The authors further analyze the impact of various factors, including hydrology,

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 中国工程院院地合作重大项目(2021-ZD-CQ-2)

作者简介: 仇文岗(1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。

Received: 2023-04-24

Foundation item: Major Projects of the Chinese Academy of Engineering (No. 2021-ZD-CQ-2)

Author brief: ZHANG Wengang (1983-), professor, doctoral supervisor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

geography, topography, urbanization, and meteorological conditions, on both the frequency and intensity of flood disasters in Chongqing. Alongside these causal factors of flood disasters, the authors further delve into the analysis of Chongqing's disasters—Forming environment and the entities that bear these disasters. Finally, countermeasures are provided. The findings indicate that the occurrence of flood disasters in Chongqing is influenced by various factors, and its special location and characteristics of the mountain city determine the difficulty of flood prevention and management in Chongqing. Notably, the city's complex terrain and numerous rivers create the conditions conducive to flood disasters. Given the evolving circumstances brought about by meteorological hydrology and socio-economic development, it is imperative to proactively reassess and optimize Chongqing's urban flood disaster prevention system. This should be done in accordance with the unique flood disaster characteristics that have emerged following the completion of the TGRA and the current flood control and waterlogging prevention capacity of the urban area.

Keywords: urban disasters; flood disasters; disaster prevention and reduction; flood control planning

洪涝灾害包括洪水灾害和雨涝灾害两类,两种灾害在同一地区往往同时发生,常统称为洪涝灾害。近年来,极端天气事件趋多趋强,北京、纽约等大型城市均遭受过特大洪涝灾害冲击^[1-2]。2021年河南省遭遇罕见暴雨,发生洪涝灾害,造成了严重的人员伤亡和经济损失^[3-5]。随着经济社会的不断发展,同量级洪水给一座城市带来的损失日益严重,“逢大雨即涝”已成为许多城市的通病^[6]。中华人民共和国应急管理部统计资料^[7]显示,2022年前三季度,中国自然灾害以洪涝、干旱、风雹、地震和地质灾害为主,台风等灾害也时有发生。洪灾呈现“南北重、中间轻”的特点,局地山洪灾害频发。自然灾害具有复杂性和动态性等特点,给超大城市的灾害防御带来了诸多新挑战^[8]。有关资料^[9]指出,要以31个重点防洪城市和大江大河沿岸沿线城市为重点,提升改造城市防洪排洪设施,建设海绵城市,降低洪涝灾害给城市带来的影响。重庆市地处中国内陆西南部、长江上游地区。从自然气候来看,重庆属亚热带季风性湿润气候,长江、嘉陵江过境洪水常与本地强降雨遭遇,洪灾频繁发生。再加上三峡库区蓄滞水的综合影响,防洪边界条件更加复杂,城市应急管理面临着严峻挑战^[10-11]。从地形地貌来看,重庆市1/3以上面积属山洪灾害重点防治区,且大部分城镇临河而建,“人水争地”问题严重^[12]。

洪涝灾害的防灾减灾至关重要,洪灾频发给现有的灾害风险治理带来了新的挑战^[13]。刘永志等^[14]认为洪灾灾害链是致灾因子在一定孕灾环境下对承灾体造成破坏,并且会诱发衍生灾害,加剧对承灾体的影响。此外,还以北京内涝引发泥石流灾害为例,说明了洪涝灾害衍生灾害的危害。在分析台风暴雨洪灾强度和承灾体脆弱性的基础上,Liu等^[15]利用ArcGIS软件呈现了温州市洪灾的风险情景。彭建等^[16]研究表明,建设用地面积增加对暴雨洪涝

灾害风险的影响值得深入探讨。胡畔等^[17]指出孕灾环境对洪水灾害的时空格局有重要影响。由此可知,结合变化环境下洪涝灾害致灾因子、孕灾环境和承灾体情况对洪灾致灾机理进行分析有利于灾害风险管理。

很多学者对洪涝灾害的致灾机理进行了深入研究。徐宗学等^[18]指出了在变化环境下研究洪涝致灾机理对完善城市防洪防涝体系的重要性,并对城市洪灾的致灾机理进行了系统分析,阐明了气候变化、极端降水、城市化对城市暴雨洪涝灾害的影响。任宏昌等^[19]对郑州“7·20”暴雨原因进行分析发现,造成此次暴雨的原因之一是极端的水汽条件,郑州的地形也对降雨量的增幅起到了重要作用。张建业等^[20]梳理了城市化对降水、产汇流过程、河网水系、生态环境和洪涝灾害的影响,阐明了城市化进程对城市水文的影响。Liu等^[21]研究了1951年以来中国山洪灾害的时空演变特征,发现降雨对山洪分布的影响比人类活动和地表环境的影响更为显著。目前已有涉及西南地区的研究成果大部分关注对整个长江流域洪涝灾害的分析,针对重庆市的洪涝灾害成因分析较少。对于重庆市而言,受长江、嘉陵江过境洪水和暴雨天气的影响,洪灾频发。因此,分析水文、地理、地形、城市化、气象等因素对重庆市洪涝灾害的影响,对重庆市的防涝减灾至关重要。

在洪涝灾害防御体系建设方面,Hallegatte等^[22]对136个大型沿海城市现今和未来的洪水损失进行了量化,基于相关数据库对未来的防洪工程建设进行了强调说明。Xia等^[23]对比了长江1954年、1998年和2020年3次特大洪水的应对策略,分析了长江防洪格局的变化,提出了新时期长江防洪措施的原则。Jia等^[24]从大气、水文、社会经济和灾害损失等角度对1998年和2020年长江流域洪涝灾害进行了

对比分析,肯定了中国在防洪减涝风险管理方面取得的成效。近年来重庆市成功防御了2020年长江流域性洪水和暴雨内涝,但城市防御洪水仍然存在短板。

因人口和经济活动主要集中在滨水区域,重庆洪涝灾害带来的直接经济损失居全市各类自然灾害之首。同时,恶劣天气、极端降雨增加了洪灾发生的可能性,大量人口及资产可能受到洪灾的影响^[25]。此外,重庆市与5省山水相连,产汇流条件不断变化,是长江流域防汛的关键节点。因此,对重庆市洪涝灾害成因进行综合分析,阐明影响重庆市洪涝灾害的各种因素,对系统提升防洪防涝能力至关重要。笔者针对重庆这座典型城市,结合重庆历年洪涝灾害纪实,阐明重庆市发展过程中水文地理、人文和自然因素对洪涝灾害的影响,总结重庆市洪涝灾害多发成因,为支撑超大城市及城市圈高质量发展提供理论支持。

1 重庆历年洪涝灾害

重庆市主城区洪水灾害频发,新中国成立以来的最大洪水发生在1981年。70多年来,洪涝灾害较严重的年份还包括1954年、1998年、2007年、2018年和2020年等^[26-30]。对重庆市历年典型洪涝灾害及产生的影响进行梳理,如表1所示。其中,2007年、2012年和2014年洪灾属于山洪,2018年洪灾属于过境洪水,其他年份洪灾为暴雨洪水。

2020年6—8月,受强降雨因素影响,长江、嘉陵江发生历史罕见特大洪水,三峡水库入库流量达到75 000 m³/s,为建库以来最大。陈敏^[27]通过分析此次暴雨洪水的发展过程,将其分为6个阶段。在第1阶段,长江中下游干流发生6次降雨过程,具备了形成洪水的基础;第2阶段,长江中下游地区发生3次降雨过程,使得中下游部分干流水位超警;第3阶段,受强降雨影响,“长江2020年第2号洪水”形成;“长江2020年第3号洪水”于第4阶段形成;第5阶段,在水库的调控作用下,库水位逐步降低;受集中强降雨影响,嘉陵江在第6阶段发生超保证水位洪水。2020年8月18—20日,受长江和嘉陵江洪峰过境影响,重庆市主城区、潼南、江津等区县26.32万人受灾。2021年嘉陵江、涪江出现历史最强秋汛。2023年7月3—4日,受持续强降雨影响,重庆市万州区发生暴雨洪涝灾害,7月4日长滩镇降雨达到特大暴雨,最大雨量为261.2 mm(长滩站)。此次暴雨洪灾造成17人死亡,万州区五桥、白羊等36个乡镇街道受灾,受灾人口37 226人。通过历年洪灾受灾情况可以看出,这些历史洪水给重庆市民的日常生活造成了极大的影响,重庆市防洪防涝形势依然严峻。

表1 重庆市历年洪涝灾害及受灾情况

Table 1 The historical flood / waterlogging disasters in Chongqing

年份	类型	受灾情况
1870	暴雨洪水	1870年特大洪水是1153年以来长江上游的最大洪水
1954	暴雨洪水	1954年洪水是确定长江中下游堤防防洪标准和分蓄洪区划分的主要依据
1981	暴雨洪水	直接经济损失1.8亿元
1998	暴雨洪水	重庆市受灾人口达1 800多万,直接经济损失72.4亿元
2007	山洪	灾害引发大面积交通中断,重庆市4条通往市内和外省的高速公路全部中断
2009	暴雨洪水	受灾人口213.5万人,倒塌房屋2万间
2010	暴雨洪水	暴雨洪水造成酉阳、彭水、武隆等17个区县235个乡镇受灾
2011	暴雨洪水	重庆市5个区县50个乡镇26.15万人受灾,垮塌房屋570间
2012	山洪	三峡水库建成以来最大一次洪水
2014	山洪	重庆、湖北等省市251万人受灾,死亡46人,失踪18人
2015	暴雨洪水	161.8万人受灾,倒塌房屋9 200间,直接经济损失15.4亿元
2016	暴雨洪水	多处水利设施严重受损,直接经济损失1 195万元
2017	暴雨洪水	重庆市1.4万人受灾,直接经济损失2 500万元
2018	过境洪水	影响范围广、洪水量级高、水位涨幅大,直接经济损失3.6亿元
2020	暴雨洪水	受四川盆地持续强降雨影响,长江形成2020年第5号洪水,嘉陵江形成2020年第2号洪水
2021	暴雨洪水	9月嘉陵江形成2021年第2号洪水,10月嘉陵江形成2021年第3号洪水
2023	暴雨洪水	倒塌房屋50户138间,损坏房屋112户221间,万州区直接经济损失2.3亿元

生活造成了极大的影响,重庆市防洪防涝形势依然严峻。

2 重庆市洪涝灾害多发成因

从水文地理、人文因素、自然因素、孕灾环境与承灾体4个方面对重庆市洪涝灾害多发成因进行分析。如图1所示,人文因素方面具体考虑了城市化

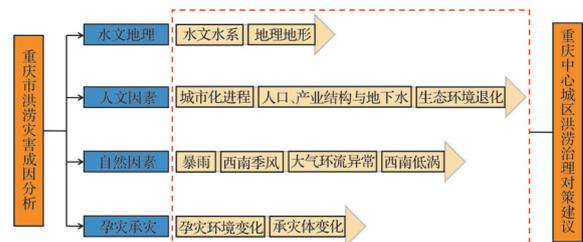


图1 重庆市洪涝灾害成因分析图

Fig. 1 Flood / waterlogging disasters cause analysis diagram of Chongqing

进程,人口、产业结构与地下水和生态环境退化的影响;自然因素方面主要考虑了暴雨、西南季风、大气环流异常和西南低涡的影响,在此基础上对城市洪涝灾害进行了孕灾分析,相关数据参考了《重庆统计年鉴·2021》^[35]。

2.1 重庆市水文地理特征

2.1.1 水文水系

20世纪末,中国提出西部大开发战略,推进中国社会经济均衡、全面发展。随着西南地区经济的发展,用水量激增,水资源开发和利用问题逐渐引起人们关注^[31]。《重庆市水资源公报 2021》统计数据显示,重庆全市水资源总量为 750.782 5 亿 m³。受降水因素影响,各地区水资源分布不均匀,呈由西向东逐渐增多的特征。重庆市水资源量年内分配多集中在 5—9 月,年际变化较大。

重庆水系发达,江河纵横。《重庆市水资源公报 2021》显示,重庆境内流域面积大于 1 000 km² 的河流有 42 条,如嘉陵江、乌江等,这些河流大部分在重庆境内汇入三峡水库。相关水利工程的修建改变了重庆市的河流水系。三峡大坝建成后,形成一个长达 600 km 的大型水库,大部分位于重庆境内,库区水位上升,水面面积增加,会对局部地区气候环境造成影响^[32]。受三峡水库蓄水影响的干流主要分布于低山丘陵区,长江及其支流形成增幅深切曲流^[33]。随着三峡水库蓄水水位的季节变化,加之局部强降雨影响,江河洪水、内涝复合型灾害风险高。

2.1.2 地理地形

重庆市都市区是典型的山地城市区,城市发展受地理地形的约束较强,人地矛盾突出。长江和嘉陵江汇聚于都市区内,土地利用结构复杂。重庆市平均高程为 400 m,由东南向东北逐渐升高^[34]。特殊的地理位置和山地城市地形条件决定了重庆防洪防涝任务的艰巨性。

从地理因素来看,重庆市地处三峡库区腹心,受到上游来水和三峡库区蓄滞水双重影响。一方面,上游“长嘉乌渠涪”等江河过境洪水峰高量大、持续时间长,而且破坏力强。另一方面,三峡水利枢纽工程建成运行后承担了长江中下游地区重要的防洪任务,使得重庆不可避免地面临着更为复杂的防洪形势。从地形因素来看,重庆境内山高谷深、沟壑纵横,地貌类型以山地(占 76%)、丘陵(占 22%)为主,地势起伏很大。鉴于重庆市以山地为主的地貌特征及降雨集中的特点,境内支流水系具有汇流快、冲袭力强、洪峰流量集中的特点。

2.2 人文因素

从人文因素来看,随着社会的不断发展,桥梁

隧道、高楼大厦等工程的修建改变了原本的地形地貌,同时,不透水下垫面面积显著增加,原有的绿地面积发生改变。不透水下垫面的增加对自然水循环系统影响很大,并引发洪灾和生态等一系列问题。不透水下垫面增加、地面道路硬化、下渗水量减少、地面粗糙率降低,使得大部分降雨形成地面径流。暴雨汇流速度也会加快,洪峰流量增大。随着城市化的发展,城区面临着严重的洪涝灾害威胁^[36-37]。现今,河道管辖范围内仍然存在许多废弃物,还存在许多违建的建筑物与构筑物,对泄洪十分不利。

2.2.1 城市化进程

随着社会发展和科技进步,重庆市城区面积不断扩大,城区人口数量剧增,工业占地面积大量增加,生活用水和工业用水明显增多,污水排放量也同时增加。暴雨来临时,排水系统排放能力不足,易导致城市洪灾的发生。表 2 表明,近年来重庆市的城市化水平不断提高,城镇化率由 2011 年的 54.5% 上升到 2020 年的 69.5%。

表 2 2011—2020 年重庆市发展概况统计表

Table 2 Chongqing's development from 2011 to 2020

年份	城镇化率/%	降水量/mm	常住人口/万人	地下水量/亿 m ³	房屋建筑竣工面积/万 m ²
2011	54.5	992.8	2 944.4	98.3	8 989.6
2012	56.7	1 104.4	2 974.9	97.8	11 601.8
2013	58.4	1 026.9	3 011.0	96.4	12 240.3
2014	59.8	1 452.5	3 043.5	121.8	12 815.6
2015	61.5	1 448.7	3 070.0	103.3	13 542.6
2016	63.3	1 345.8	3 110.0	112.3	13 751.6
2017	65.0	1 196.2	3 143.5	116.1	13 448.2
2018	66.5	1 128.2	3 163.1	104.0	13 780.1
2019	68.2	1 333.8	3 187.8	98.5	13 618.3
2020	69.5	1 181.4	3 208.9	128.7	14 050.1

城市化会使不同类型降雨发生次数均增加,其中对暴雨发生次数影响最大^[38]。在城市化发展过程中,下垫面因素变化和人类活动会改变大气边界层的特性,影响城市的降雨量。城市化不仅影响城区降水,产生“雨岛效应”,同时在快速城市化的过程中,产水量会增加,使得径流系数增大,洪涝灾害发生的频率和强度加大。从重庆市每年平均降水量来看,随着城市化的发展,70 多年来降水量总体变化趋势不明显,1958 年降水量最少(740.7 mm),1998 年降水量最多(1 508 mm),2020 年降水量为 1 181.4 mm。

2.2.2 人口、产业结构与地下水

地下水是城市人口主要的饮用水源,对城市发展至关重要。正常天气条件下,水被吸收到地下与

地下水汇合,当地面饱和时低洼地区会出现积水。城市化引起的土地利用与覆被变化会改变地下水循环过程^[39]。从人口方面来看,重庆市常住人口总体呈增加趋势,2020年常住人口达到3 208.9万。根据重庆市近年的三次产业贡献率来看(图2),大部分年份第二产业占比最多,第三产业呈现扩张趋势。由于重庆市常住人口激增及产业转型,农业种植面积和工业用地面积发生改变,势必会引起城市规划分区的变化,也会对城市的防洪防涝造成影响。由表2可知,重庆市的地下水量有所波动,2020年地下水量达到最大值128.7亿 m³。

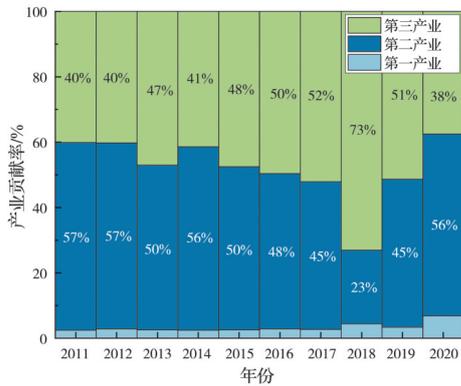


图2 2011—2020年重庆市三次产业贡献率

Fig. 2 Contribution rate of three industries in Chongqing from 2011 to 2020

2.2.3 生态环境退化

生态环境退化是人类对自然资源的不合理利用造成的。随着城市化工程活动范围逐渐扩大,人类过度利用自然资源,比如破坏植被、侵占河道等活动,严重破坏了生态系统。一方面,自然植被具有很好的蓄水作用,对防御洪涝灾害有着积极的作用,同时对水土保持也非常重要。水土流失会造成河流淤积,蓄水能力下降,降低河流调节的能力,对防洪减涝不利。另一方面,植被可以提高土壤渗透率,还可以截留雨水,减少地表径流量。

2.3 自然因素

中国受东亚季风影响较为显著,每年汛期常受到暴雨洪水危害,其中长江流域较为严重。重庆市汛期暴雨频繁,降雨量多集中在汛期。暴雨是洪涝灾害的主要致灾因子,是洪涝灾害的直接原因。此外,受特殊地理地形的影响,西南季风、大气环流异常及西南低涡均会对重庆市的降雨产生影响,增大了极端暴雨天气发生的可能性。

2.3.1 暴雨

暴雨是引发洪涝灾害的主要原因。暴雨是在大尺度环流背景下,多种尺度天气系统作用的结

果。从2019—2021年来看,重庆市气候极端性愈发突出,气候形势复杂多变。2020年8月中旬,受上游区域降雨量大、洪水前后重叠等因素影响,先后形成了2020年嘉陵江第1号、长江第4号洪水与嘉陵江第2号、长江第5号洪水^[40]。2021年有汛期区域性暴雨13场,“2021.8.25”区域性暴雨持续时间长、影响范围广,长江、嘉陵江共出现4次编号洪水。

2.3.2 西南季风

西南地区的季风现象较为复杂,季风是西南地区气候形成的基本因素。西伯利亚偏北季风、南亚次大陆干热气团、印度季风系统和东亚季风系统均会对西南地区的气候产生影响^[41]。夏季时西南地区的降雨水汽来自四大季风源区,对降雨水汽贡献最大的是西南季风区^[42],印度洋水汽就是降雨水汽的一部分。重庆市处于典型的西南季风区,季风在很大程度上影响了局部地区的降水分布。

2.3.3 大气环流异常

大气环流异常是导致部分地区降雨量增加的一个关键因素。1—5月南半球的环流异常会影响东亚地区的环流,进而影响重庆的汛期降水^[43]。受环流异常的影响,三峡地区会出现暖湿水汽和冷空气聚集的现象,在雨涝年夏季作用明显,气流辐合明显,有利于降水的发生^[44]。大气环流的异常变化又与ENSO现象、太阳黑子异常活动等有关。ENSO现象表现为热带东太平洋海表温度每隔2~7 a大范围变暖或变冷^[45],通常开始形成于春季,持续时间约1 a,在年底达到盛期,之后逐渐减弱^[46]。2020年末结束的弱中部型厄尔尼诺事件对重庆夏季降水的具体影响表现为重庆东南部附近的降水偏多区域明显向东南部扩展。ENSO暖事件发生时,重庆大部分地区降水偏多的概率较大^[47]。

2.3.4 西南低涡

西南低涡产生于西南地区,一年四季均会发生,夏季时易在西南地区引发暴雨。西南低涡降水水汽主要来自南海和东海,水汽的主要输送载体为四川东南部反气旋的边缘气流^[48]。西南低涡对降水的频次和量级会造成影响,也与受影响地区的地理地形有关^[49]。乌拉尔山高压脊增强,在西北气流引导下冷空气进入四川盆地,有利于西南低涡的发展。冷空气还会继续向南移动,到达长江中上游地区。同时,暖湿气流移动到内陆地区,在三峡地区与南下的冷空气汇合,增大了三峡地区发生洪涝灾害的风险,重庆市也会受到影响。

2.4 孕灾环境与承灾体

洪涝灾害的形成必须满足以下条件:一方面,

存在致灾因子和孕灾环境;另一方面,洪涝灾害的影响范围内有人类活动和房屋、路网建设(承灾体)。从灾害的影响角度来看,洪灾的危害是致灾因子(暴雨、台风等)在特定的环境下(地形、河网等)作用于承灾体(房屋、桥梁、地下工程等)形成的^[37]。在详细梳理重庆市洪涝灾害成因的基础上,需进一步阐明洪涝灾害的孕灾环境与承灾体。

2.4.1 孕灾环境

孕灾环境包括大气环境、水文气象环境和下垫面环境,大致由天气、地形、河网、水库及地下水等组成^[37]。地形对洪水的形成起着关键性的作用。重庆是典型的山城城市,地形复杂,高差大。不仅降水会受到地形的影响,而且由于地势的高低,水流具有较大的势能差,从高处向低处汇聚时,形成了向心状的水网。当遇暴雨时,地势较低的地区积水,支流水系急涨急落,为暴雨洪涝灾害的发生提供了充分的条件^[50]。河网对洪水的影响较大,离河道越近,遭受洪水侵袭的可能性就越大。因此,对于江河纵横、山高谷深且受上游来水和三峡库区蓄滞水双重影响的重庆而言,完全具备发生洪涝灾害的孕灾条件。而且随着城市化的发展,不透水面积增大,同强度暴雨形成的地表径流和径流总量增加,洪水危险性增大。

2.4.2 承灾体

承灾体包括居民、工业、农业、交通设施及环境。重庆市年平均降水量较大,洪涝灾害多为暴雨引发。雨季时暴雨频繁,强度大,导致交通中断、房屋倒塌,甚至造成人员伤亡。降雨强度和降水频次在一定程度上反映了暴雨洪涝灾害的危险性^[50]。随着经济社会不断发展,相关民生工程建设逐步推进,大型工程建设数量显著增加。2020年重庆市全市道路总长度为12 099 km,道路总面积约为2.58亿 m^2 ,桥梁总数达2 458座,轻轨通车里程达343 km,排水管道总长度为26 398 km^[35]。从图3可以看出,重庆中心城区两江穿越,沿江地带开发强度大,人地矛盾突出,众多居民、基础设施分布于滨江沿河低洼地带。表2表明,2020年重庆市房屋建筑竣工面积已达1.4亿 m^2 ,如遇较大洪水,由此导致的应急管理压力很大。2016年重庆暴雨洪灾造成多处水利设施严重受损,还出现了山体滑坡现象,严重威胁居民的生命财产安全。因此,对于重庆市防洪防涝而言,必须结合历年洪涝灾害受灾情况和现阶段城市承灾能力,动态优化城市洪涝灾害防御体系。

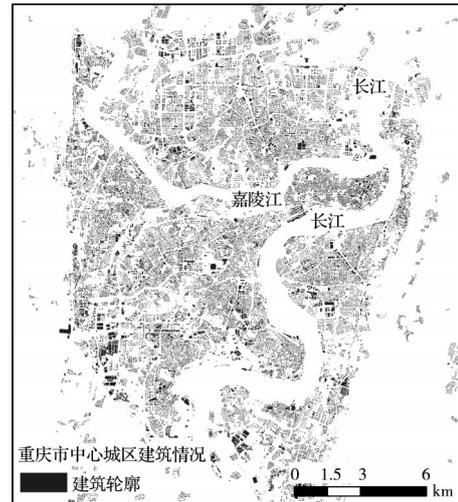


图3 重庆市中心城区建筑轮廓图

Fig. 3 Outline map of buildings in the main urban area of Chongqing

3 重庆中心城区洪涝治理问题与对策建议

3.1 重庆中心城区洪涝治理面临的形势和问题

近年来,重庆市在洪涝防治方面取得了显著成效,成功应对了2020年长江大洪水和山洪灾害。但重庆中心城区防御江河洪水仍然存在短板,内涝治理能力不足。从中心城区防洪情况看,现行防洪标准为100 a一遇,但实际防洪能力仅5~50 a一遇,仍有菜园坝等10处防洪薄弱风险点。此外,重庆中心城区的降雨量75%以上集中在汛期,暴雨多发。居民、房屋和基础设施集聚性强(图3),内涝隐患整治尚不到位,地下公共设施、低洼居民区易涝点较多,城市暴雨内涝灾害时有发生。另外,重庆中心城区河流发达,山洪突发性强,汛期强降水监测预报、预警能力不足。在变化环境下,城市不仅要确保标准内洪涝安全防御,还需要有效协同工程和非工程措施,以确保在遭遇超标准洪涝事件时经济损失最小化。

3.2 提升重庆中心城区防洪防涝能力的对策建议

深刻吸取郑州“7·20”等暴雨洪涝事件教训,提高生命线工程的防灾韧性,提升重庆中心城区洪涝灾害防御能力,减轻衍生灾害造成的损失。提升配电设施设备的防洪建设标准,对低于设计防洪防涝水位的地下供电设备、配电房进行搬迁或者采取防洪加固措施,提高电力设施应急保障能力。强化长江上游水库群联合防洪优化调度方式,以长江、嘉陵江等河流为重点,实施河道综合治理措施。推进“两江四岸”防洪工程建设,通过新改建河道护岸、

防汛通道、完善雨洪拦蓄设施,增强重庆中心城区洪水调蓄能力^[51]。以地下空间^[52]、低洼易涝区域等为重点,开展内涝风险隐患排查整治工作。推动建设水文站和水文巡测基地,增强水文监测、洪水预报预警能力,提升城市生命线工程保障能力。

4 结论

以重庆市历年洪涝灾害事件为基础,总结了重庆市洪涝灾害的影响因素,提出了针对重庆中心城区洪涝治理的对策建议。

1)从水文地理方面来看,重庆市河流纵横、山高谷深,长江、嘉陵江过境洪水常与本地持续强降雨遭遇,且受到上游来水和三峡库区水位的双重影响,洪涝灾害频发。

2)从自然因素和人文因素来看,城市化进程改变了洪涝灾害的孕灾环境和承灾体。重庆市处于西南季风区,局部地区的降水分布受季风区影响很大,进而影响洪涝灾害发生的频率和强度。重庆市沿河区域高强度开发,特殊的地理位置和山地城市的地形条件决定了重庆防洪防涝问题的复杂性。

3)重庆地形复杂,高差大,完全具备发生洪涝灾害的孕灾条件。重庆防洪治涝短板仍然存在,汛期强降雨监测预报能力不足,内涝治理能力偏低。对于重庆市防洪防涝而言,应该以三峡库区为基点,结合“城在山下”的格局和当前城市承灾能力,通过新改建河道护岸、完善雨洪拦蓄设施等措施,动态优化城市洪涝灾害防御体系,系统提升防洪防涝能力。

参考文献

- [1] ZHANG Y, HONG Y, WANG X G, et al. Hydrometeorological analysis and remote sensing of extremes: Was the July 2012 Beijing flood event detectable and predictable by global satellite observing and global weather modeling systems? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 381-395.
- [2] LANE K, CHARLES-GUZMAN K, WHEELER K, et al. Health effects of coastal storms and flooding in urban areas: A review and vulnerability assessment [J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2013: 1-13.
- [3] XIE X L, TIAN Y Z, WEI G. Deduction of sudden rainstorm scenarios: Integrating decision makers' emotions, dynamic Bayesian network and DS evidence theory [J]. *Natural Hazards*, 2023, 116(3): 2935-2955.
- [4] LI Y, YE S S, WU Q Z, et al. Analysis and countermeasures of the "7.20" flood in Zhengzhou [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2023: 1-17.
- [5] 王堯,刘新荣,周小涵,等.特大暴雨城市地下空间防灾体系构建的思考[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(1): 28-34.
WANG Y, LIU X R, ZHOU X H, et al. Consideration on construction of disaster prevention system in urban underground space after heavy rainstorm [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(1): 28-34. (in Chinese)
- [6] ZHANG S H, JING Z, LI W D, et al. Study of the flood control scheduling scheme for the Three Gorges Reservoir in a catastrophic flood [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(11): 1625-1634.
- [7] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2022 年前三季度全国自然灾害情况 [EB/OL]. (2022-10-10) [2022-11-03]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202210/t20221010_423761.shtml.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. The Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China released the national natural disaster situation in the first three quarters of 2022 [EB/OL]. (2022-10-10) [2022-11-03]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202210/t20221010_423761.shtml. (in Chinese)
- [8] SUN Q Y, LI X Y, YU F. Designing an emergency continuity plan for a megacity government: A conceptual framework for coping with natural catastrophes [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2016, 13: 28-35.
- [9] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [N]. *人民日报*, 2021-03-13(1).
The outline of the 14th five-year plan for economic and social development and long-range objectives through the year 2035 of the People's Republic of China [N]. *People's Daily*, 2021-03-13(1). (in Chinese)
- [10] LIU L, XU Z X. Regionalization of precipitation and the spatiotemporal distribution of extreme precipitation in southwestern China [J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 1195-1211.
- [11] CHEN X B, GUO Z P, ZHOU H Y, et al. Urban flood resilience assessment based on VIKOR-GRA: A case study in Chongqing, China [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(9): 4178-4194.
- [12] 重庆市人民政府办公厅. 重庆市人民政府办公厅关于印发重庆市水安全保障“十四五”规划(2021—2025年)的通知 [J]. *重庆市人民政府公报*, 2021(22): 14-50.
General Office of Chongqing Municipal People's Government. Notice of the general office of Chongqing Municipal People's Government on printing and distributing the 14th five-year plan for water security in Chongqing

- (2021-2025) [J]. *Gazette of Chongqing Municipal People's Government*, 2021(22): 14-50. (in Chinese)
- [13] RAIKES J, SMITH T F, JACOBSON C, et al. Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 38: 101207.
- [14] 刘永志, 唐雯雯, 张文婷, 等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 20-27.
LIU Y Z, TANG W W, ZHANG W T, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese)
- [15] LIU Y L, CHEN Z L, WANG J, et al. Large-scale natural disaster risk scenario analysis: A case study of Wenzhou City, China [J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(3): 1287-1298.
- [16] 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 J, WEI H, WU W H, 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]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3741-3755. (in Chinese)
- [17] 胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1148-1162.
HU P, CHEN B, SHI P J. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1148-1162. (in Chinese)
- [18] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 713-724.
XU Z X, CHEN H, REN M F, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese)
- [19] 任宏昌, 张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 1-9.
REN H C, ZHANG H D. Refined characteristics and main causes of “July 20” rainstorm in Zhengzhou [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(5): 1-9. (in Chinese)
- [20] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605.
ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese)
- [21] LIU Y S, YANG Z S, HUANG Y H, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(12): 1804-1817.
- [22] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [23] XIA J, CHEN J. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(1): 1-9.
- [24] JIA H C, CHEN F, PAN D H, et al. Flood risk management in the Yangtze River Basin— Comparison of 1998 and 2020 events [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 68: 102724.
- [25] CHAN F K S, YANG L E, SCHEFFRAN J, et al. Urban flood risks and emerging challenges in a Chinese delta: The case of the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science & Policy*, 2021, 122: 101-115.
- [26] 夏军, 陈进, 王纲胜, 等. 从2020年长江上游洪水看流域防洪对策[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(1): 1-8.
XIA J, CHEN J, WANG G S, et al. Flood control strategies for the river basin enlightened by the 2020 Upper Yangtze River floods [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- [27] 陈敏. 2020年长江暴雨洪水特点与启示[J]. *人民长江*, 2020, 51(12): 76-81.
CHEN M. Characteristics and enlightenment of rainstorm and flood in Yangtze River in 2020 [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(12): 76-81. (in Chinese)
- [28] ZHANG H R, DOU Y H, YE L, et al. Realizing the full reservoir operation potential during the 2020 Yangtze River floods [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2822.
- [29] 杜朝阳, 于静洁. 西部水资源开发利用风险现状评价 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(10): 59-66.
DU C Y, YU J J. Risk evaluation of water resources exploration and utilization in western China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(10): 59-66. (in Chinese)
- [30] DONG Q J, ZHANG X, LALL U, et al. An improved nonstationary model for flood frequency analysis and its implication for the Three Gorges Dam, China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, 64(7): 845-855.
- [31] 重庆市水利局. 重庆市水资源公报(2021年)[EB/OL]. (2022-10-13) [2022-11-03]. http://slj.cq.gov.cn/zwgk_250/fdzdgknr/tjgb/szygb/202210/t20221013_11183898.html.
Chongqing Water Resources Bureau. *Chongqing Water Resources Bulletin (2021)* [EB/OL]. (2022-10-13) [2022-11-03]. http://slj.cq.gov.cn/zwgk_250/fdzdgknr/tjgb/

- szygb/202210/t20221013_11183898.html. (in Chinese)
- [32] 张树奎, 鲁子爱, 张楠. 三峡水库蓄水对库区降水量的影响分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 21-23, 62.
ZHANG S K, LU Z A, ZHANG N. Analysis of influence of Three Gorges Dam storage on reservoir region precipitation [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 21-23, 62. (in Chinese)
- [33] 邵景安. 三峡水库蓄水后长江水系重庆段河道形态的变化特征[J]. 资源科学, 2008, 30(9): 1431-1436.
SHAO J A. Characteristics of shape changes of riverway in the Chongqing reaches of the Yangtze River after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Resources Science, 2008, 30(9): 1431-1436. (in Chinese)
- [34] 周启刚, 陈丹. 重庆山地都市区土地利用地形特征分异研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 86-91.
ZHOU Q G, CHEN D. Researched on the topographic differentiation of land use in Chongqing mountainous metropolitan area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 86-91. (in Chinese)
- [35] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队编. 重庆统计年鉴·2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Chongqing Municipal Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics (Chongqing). Chongqing statistical yearbook, 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)
- [36] WU M M, WU Z N, GE W, et al. Identification of sensitivity indicators of urban rainstorm flood disasters: A case study in China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 599: 126393.
- [37] 许有鹏. 流域城市化与洪涝风险[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.
XU Y P. River basin urbanization and flood risk [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012. (in Chinese)
- [38] 李娜, 许有鹏, 陈爽. 苏州城市化进程对降雨特征影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 335-339.
LI N, XU Y P, CHEN S. Influence of urbanization on precipitation in Suzhou city [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 335-339. (in Chinese)
- [39] 黄婉彬, 鄢春华, 张晓楠, 等. 城市化对地下水水量、水质与水热变化的影响及其对策分析[J]. 地球科学进展, 2020, 35(5): 497-512.
HUANG W B, YAN C H, ZHANG X N, et al. The impact of urbanization on groundwater quantity, quality, hydrothermal changes and its countermeasures [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(5): 497-512. (in Chinese)
- [40] ZHANG L X, ZHAO D, ZHOU T J, et al. Moisture origins and transport processes for the 2020 Yangtze River valley record-breaking Mei-yu rainfall [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(12): 2125-2136.
- [41] QIAO P J, GONG Z Q, LIU W Q, et al. Extreme rainfall synchronization network between Southwest China and Asia-Pacific region [J]. Climate Dynamics, 2021, 57(11/12): 3207-3221.
- [42] 张弛, 吴绍洪. 西南地区夏季极端降水的水汽来源分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1186-1194.
ZHANG C, WU S H. An analysis on moisture source of extreme precipitation in Southwest China in summer [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1186-1194. (in Chinese)
- [43] 周浩, 唐红玉, 程炳岩, 等. 南半球前期环流异常与重庆汛期降水的关系研究[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 174-181.
ZHOU H, TANG H Y, CHENG B Y, et al. Relationship between flood period precipitation in Chongqing and previous circulation anomaly in southern hemisphere [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 174-181. (in Chinese)
- [44] 李强, 李永华, 周锁铨, 等. 三峡地区旱涝多时间尺度变化特征及旱涝年大气环流异常[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 243-254.
LI Q, LI Y H, ZHOU S Q, et al. Variation characteristics of multiple time scales of drought/flood and atmospheric circulation anomaly in drought/flood years in the Three Gorges area [J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(2): 243-254. (in Chinese)
- [45] ZENG Z X, SUN J Q. Influence of different configurations of western North Pacific anticyclone and Siberian high on spring climate over China [J]. International Journal of Climatology, 2023, 43(6): 2699-2718.
- [46] XIANG B, ZHOU J E, LI Y H. Asymmetric relationships between El Niño/La Niña and floods/droughts in the following summer over Chongqing, China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(2): 171-178.
- [47] 唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等. 2020年夏季重庆降水异常偏多成因分析[J]. 气象, 2022, 48(9): 1116-1129.
TANG H Y, WU Y, DONG X N, et al. Cause analysis of abnormal precipitation in Chongqing in summer of 2020 [J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(9): 1116-1129. (in Chinese)
- [48] 赵思雄, 傅慎明. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1059-1075.
ZHAO S X, FU S M. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1059-1075. (in Chinese)
- [49] 李强, 王秀明, 周国兵, 等. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 960-972.

- LI Q, WANG X M, ZHOU G B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall during southwest vortex rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 960-972. (in Chinese)
- [50] 梅勇, 唐云辉, 况星. 基于GIS技术的重庆市暴雨洪涝灾害风险区划研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(32): 287-293.
- MEI Y, TANG Y H, KUANG X. The study of risk zoning of rainstorm and flood disaster based on GIS in Chongqing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(32): 287-293. (in Chinese)
- [51] XIAN X D, FENG Y L, MARTIN WILLISON J H, et al. Restoring ecosystem services to littoral zones of rivers in the urban core of Chongqing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(16): 12576-12584.
- [52] JIAO L D, ZHU Y H, HUO X S, et al. Resilience assessment of metro stations against rainstorm disaster based on cloud model: A case study in Chongqing, China [J]. Natural Hazards, 2023, 116(2): 2311-2337.

(编辑 胡英奎)