

# 极端天气影响下城镇洪水水位快速估计与淹没分析

高晓路<sup>1,2,3</sup>, 李亦秋<sup>4</sup>, 张歆越<sup>2,3</sup>, 鲁春霞<sup>2,3</sup>

(1.北京建筑大学建筑与城市规划学院,北京 100044;

2.中国科学院地理科学与资源研究所,中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,

北京 100101;3.中国科学院大学,北京 100049;4.贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550025)

**摘要:** 由于城镇化的快速发展和极端天气影响,土地利用与防洪安全的矛盾日益突出,城镇洪涝风险增加。以四川省渠县为研究区域,综合运用历史洪水记录与多年水文观测数据重建洪水水位数据序列,快速估计城镇洪水水位并进行淹没分析。通过分析洪水频率与水位的关系、洪水水位差以及不同位置洪峰相关性,更新渠县沿江主要城镇各重现期洪水水位;结合沿江城镇发展定位和预期人口规模,重新核定防护等级和防洪标准。结果表明:渠县主要城镇的洪水水位较历史水平平均上升 40 cm,其中 100 年一遇、50 年一遇和 10 年一遇洪水水位分别上升至 254.75、253.48、250.54 m。根据国家防洪标准,渠县主城区和三汇镇的防洪重现期标准应分别提高至 50 年一遇和 20 年一遇,其他沿江城镇和乡村的防洪重现期标准保持为 10 年一遇。与现行防洪标准相比,提高设防标准可减少农地淹没面积超过 30 km<sup>2</sup>,减少建设用地淹没面积 7~8 km<sup>2</sup>。

**关键词:** 洪涝灾害; 水位估计; 防洪标准; 国土空间规划; 淹没分析

中图分类号:TV122.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0336-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.041

## Quick Estimation of Urban Flood Levels and Inundation Analysis Under the Impact of Extreme Weather

GAO Xiaolu<sup>1,2,3</sup>, LI Yiqiu<sup>4</sup>, ZHANG Xinyue<sup>2,3</sup>, LU Chunxia<sup>2,3</sup>

(1.School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,

Beijing 100044; 2.Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 3.University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049; 4.School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

**Abstract:** Due to the rapid development of urbanization and the impact of extreme weather, the conflict between urban land use and flood safety becomes prominent while the flooding risk increases. Taking Quxian of Sichuan Province as the study area, we updated the flood level and conduct inundation risk analysis. Using historical flood records and observation data over the past few decades, we established the flood level dataset and re-estimated the flood level in various recurrence intervals by analyzing the distribution of flood frequency and peak flood levels, and the correlation between flood levels at different locations. It was shown that, as a result of extreme weather, the flood levels of the main counties in Quxian have increased by an average of 40 cm compared with historical flood levels, i. e., those of the once-in-100-year, once-in-50-year, and once-in-10-year have risen to 254.75, 253.48 and 250.54 m, respectively. According to the national flood control standard, the central city of Quxian and Sanhui County should be able to resist flood with recurrence intervals of 50 and 20 years respectively, while other counties along the river remain at 10 years. Compared with the current flood control standard, the updated standards could potentially prevent agricultural and construction land from flooding by more than 30 and 7~8 km<sup>2</sup> respectively.

**Keywords:** flood disaster; flood level estimation; flood control; territory spatial planning; inundation analysis

收稿日期:2022-11-25

资助项目:国家自然科学基金项目(41871171);中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23100302)

第一作者:高晓路(1969—),女,博士,教授,主要从事城市地理、城乡规划与可持续发展等研究。E-mail:gaoxl@igsrr.ac.cn

通信作者:高晓路(1969—),女,博士,教授,主要从事城市地理、城乡规划与可持续发展等研究。E-mail:gaoxl@igsrr.ac.cn

在快速城镇化进程中,一些沿江沿河城镇受景观效益和土地开发利益的驱使,建设用地逐渐向河流逼近,导致河流缓冲区和行洪区范围缩小,防洪安全与土地利用的矛盾日益突出。具体而言,主要表现在2个方面:一是随着城镇规模扩大,原有设防标准逐渐难以满足安全要求,洪涝灾害潜在损失增加;二是全球气候变化使系统性环境风险加大,按照历史数据设计的防洪排涝工程失效概率上升<sup>[1]</sup>。近年来极端天气频发,城镇洪涝风险和防洪问题引发社会高度关注<sup>[2]</sup>。

不同再现期的洪水水位是开展防洪工程规划的重要依据。洪水水位分析与预测的常用方法包括相应水位法<sup>[3]</sup>和洪水演算法<sup>[4]</sup>。其中,水文模拟和水动力模拟是洪水演算的主要方法<sup>[5]</sup>;前者多利用历史水位、河床与水面比降较高等水文资料<sup>[6]</sup>建立“水位—流量”关系曲线<sup>[7]</sup>,或根据频率曲线类型对分期设计洪水、年极值设计洪水进行参数估计,从而推求分期汛限水位<sup>[8-9]</sup>;后者则综合地表径流、降水强度、管网排水、下垫面入渗、调蓄等水力特征<sup>[10-11]</sup>,从产流和汇流两方面建立 SWMM 模型、MIKE 系列模型和 HEC—HMS 模型等<sup>[4,5,10-13]</sup>。近年来,遥感<sup>[14-15]</sup>和机器学习等数据方法<sup>[16]</sup>的应用为洪水演算提供有力支撑。然而,这些系统分析与建模方法往往对水文资料与水力数据有很高要求,而在实际空间规划工作中,水文气象数据不完整、上下游水利设施和土地利用数据不全等情况使得模型分析存在困难,特别是在一些洪涝风险突出的小城镇,数据资料不足的情况普遍存在,由此影响城市建设和农业发展空间范围的划定以及防洪工程规划的制定。因此,及时更新适合城镇发展状况的防洪标准具有重要意义。

本文以四川省渠县国土空间总体规划(2021—2035)编制为背景,提出一种快速估计主要城镇洪水水位的方法,并修正现行防洪标准,在此基础上进行淹没分析,结合防洪规划要求划定洪涝风险区,为县域国土空间规划提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

1.1.1 渠县自然条件与洪涝特征 渠县位于四川盆地东部,华蓥山北段西侧,是川东平行岭谷区和川中紫色丘陵区的过渡地带,属亚热带四川气候区,受西太平洋副热带高压影响。据气象站观测资料<sup>[17]</sup>,县境多年平均降水量在 1 044~1 200 mm,暴雨集中在夏秋两季,占年降水量的 69%。渠县地形以浅丘、低山、河谷为主,境内水系发达,共有大小河流 306 条,总长度 504 km,过境河流主要是由北至南纵贯全县的渠江干流、在三汇镇汇入渠江干流的巴河和州河,

以及与渠江干流交汇于主城区中部的流江河(图 1)。渠江是嘉陵江下游左岸最大一级支流<sup>[18]</sup>,发源于米仓山,属于山区性河流,经大巴山脉自北向南海拔逐渐降低,全河道天然总落差 532 m,平均比降 0.17‰<sup>[19]</sup>。渠江上游山高谷深,坡陡流急,河谷多呈“V”形;中游河流曲折,河谷逐渐开阔,局部形成急流陡滩;行至三汇镇下游河段,河流迂回,河床形过渡到“U”形<sup>[19]</sup>。渠江流域整体呈北宽南窄的向心扇形,由于其特殊的地形条件,加之上游山区为米仓山—大巴山暴雨区,所以县域内暴雨山洪往往峰高量大、涨落率大、过程尖瘦、破坏强、历时短(一般 3~5 天)、汇流迅速<sup>[18-21]</sup>。历史上渠县是渠江流域历史洪涝灾害发生最频繁的地方,三汇镇以下江段经常发生洪水并引起嘉陵江干流洪灾,甚至危及重庆<sup>[22]</sup>。

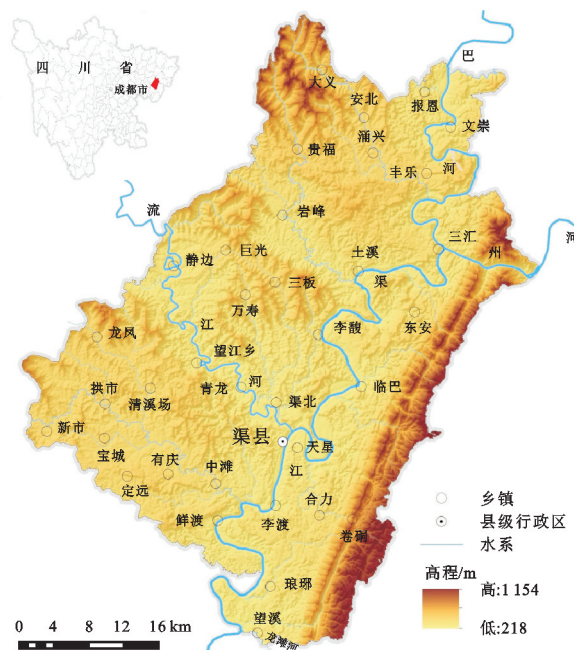


图1 渠县地形与河流水系

相关研究<sup>[23]</sup>表明,渠县 1958—2017 年降水极值波动上升,年均暴雨频次也逐渐增多,尤其 2010 年以来平均达 4.3 次/a。渠江流域暴雨洪水的特点包括:(1)汛期长,多出现在 5—10 月,其中 7—9 月为主汛期<sup>[18]</sup>;(2)降水和径流量年内分配不均,短时高强度降水频发<sup>[20]</sup>;(3)渠江上游河谷深切,河道两岸坡度陡,雨水产汇流时间短,极易形成灾害性洪水<sup>[18-20]</sup>;(4)近年来暴雨频次增加,洪涝灾害频发<sup>[20-21]</sup>,仅 2021 年就相继形成 5 次洪水,“7·11”和“8·8”洪水重现期均达到 20 年一遇<sup>[18]</sup>。而 2000 年以来,渠县共经历 5 次特大洪灾(2004 年、2007 年、2010 年、2011 年、2021 年),其中 2011 年“9·18”洪水和 2021 年“7·11”洪水中,渠江城区段水位相比多年平均水位分别上涨 25.36,21.08 m。

1.1.2 渠县城镇建设和人口规模 渠县现有 37 个乡镇,其中渠江沿岸有 17 个,包括主城区(渠江街道、

渠南街道、天星街道)、副中心三汇镇、临巴镇、土溪镇以及文崇镇、丰乐镇、李馥镇、李渡镇等。据七普数据统计文献,2020 年全县常住人口约 92 万,城镇化率 41.9%;建设用地规模约 192 km<sup>2</sup>。同时,超过 1/2 的县域人口居住在渠江两岸的乡镇。目前,渠县的城镇化水平明显滞后于四川省和达州市平均水平(四川省和达州市 2020 年人口城镇化率分别为 56.7%和 47.14%),基于城镇发展潜能的分析,渠县在 2021—2035 年国土空间规划期内将建设包括主城区和 3 个副中心(三汇镇、土溪镇和临巴镇)的城镇结构体系,其中,主城区和三汇镇的人口规模预计会有较大增长,到 2035 年,常住人口规模将分别由 2020 年 23 万和 5.7 万增长到 35 万和 10 万。

## 1.2 研究数据

渠县主要河流历史水文资料见表 1。四川省《渠江流域防洪规划(2009—2020 年)》<sup>[24]</sup>提出,渠县县城防洪标准按 20 年一遇设防,相应城区段洪水水位标高为 252.30 m;河流沿岸建制镇规划防洪标准为 20 年一遇,一般乡镇规划防洪标准为 10 年一遇,沿江公路、铁路、重要企业达到规定的防洪标准,沿江农村相对集中居民区及农田采用 10 年一遇防洪标准。《渠县城市总体规划(2011—2030 年)》<sup>[25]</sup>提出,县城应按 50 年一遇的标准设防,相应洪水水位标高为 253.02 m。规划标准的提高虽然对渠县防洪安全发挥一定作用,但在极端天气频发与城市快速扩张的背景下仍然明显不足,沿江城镇防洪安全态势严峻。为保证城区安全,渠县出台一系列的补救措施,如 2011 年“9·18 洪灾”后,提出新建城市用地的防洪高程要达到 257 m,沿江新建的建(构)筑物原则上后退至洪水淹没线以外,在后退用地上建设生态滨江走廊。在这种情况下,亟须从核定防洪安全标准入手,解决防洪规划效果减弱的问题。

本研究的基础数据来源包括:(1)历史史料,即根据《四川省近五百年旱涝史料》中 1568—1949 年渠县洪灾记录推算的最高洪水水位,包括渠江镇 1568 年、

1724 年、1770 年、1818 年 4 次特大洪灾、土溪镇 1568 年和 1847 年 2 次特大洪灾及三汇镇和临巴镇 1568 年特大洪灾水位;(2)1950 年以来,渠江干流上 4 个主要水文站的最高洪水水位观测数据,由渠县水利部门提供;(3)研究团队于 2021 年“7·11”特大洪水后开展实地调研,对主城区和主要城镇的洪水淹没线标高进行实测,核实 2021 年的水文观测数据。表 2 按照城镇(水文站)对上述数据进行整理。其中,渠江镇水文站(位于主城区渠江街道)的数据序列最为完整,包含自 1956 年至今历年最高洪水水位观测数据。位于临巴镇的原苟渡口水文站因大面积滑坡于 1989 年撤站,洪水水位观测数据仅更新至 1989 年;三汇镇水文站观测数据由 1990 年逐年更新至今,土溪镇则只有 1952—2010 年的部分观测记录。

在洪水水位估计中,上游水利水电工程削峰作用也是重要影响因素之一。目前,位于渠江干流上游的南阳滩电站、凉滩电站和四九滩电站以及上游支流的多个水利水电工程均为径流式电站,没有调控削峰的能力。州河上游的江口电站(总库容 2.77 亿 m<sup>3</sup>,滞洪库容 1.33 亿 m<sup>3</sup>)和通江河上的双滩电站(总库容 3.0 亿 m<sup>3</sup>,滞洪库容 1.34 亿 m<sup>3</sup>)虽然具有一定的调洪削峰能力,但相比渠江的洪峰流量(10 年一遇洪水流量为 2.42 万 m<sup>3</sup>/s)和洪水总量(如 2011 年“9·18”洪水为 55 亿 m<sup>3</sup>)<sup>[18,21]</sup>,其调洪削峰能力有限;而《渠江流域防洪规划》<sup>[18]</sup>中规划的土溪口、鲜家湾等大型水电工程尚未建成投产。据此,本文估计渠县洪水水位时将水利水电工程的削峰作用忽略不计。

表 1 渠县城区段主要河流水文资料

| 河流名称 | 洪水再现频率  | 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 洪水水位/m |
|------|---------|---------------------------------------|--------|
| 渠江   | 10 年一遇  | 24200                                 | 250.30 |
|      | 20 年一遇  | 26900                                 | 252.30 |
|      | 50 年一遇  | 30100                                 | 253.02 |
|      | 100 年一遇 | 32300                                 | 254.28 |
| 流江河  | 20 年一遇  | 3750                                  | 251.28 |
|      | 50 年一遇  | 4390                                  | —      |

表 2 渠县各水文站历史记载洪水数据与水文观测数据时间

| 水文站(位置)  | 历史资料记载数据                    | 水文观测数据                                                  |
|----------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| 渠江镇(主城区) | 1568 年、1724 年、1770 年、1818 年 | 1956—2021 年                                             |
| 苟渡口(临巴镇) | 1568 年、1847 年               | 1956—1989 年                                             |
| 三汇镇      | 1568 年                      | 1990—2021 年                                             |
| 土溪镇      | 1568 年                      | 1952 年、1975 年、1982 年、1986 年、1989 年、2004 年、2007 年、2010 年 |

## 1.3 分析方法

1.3.1 概率插值估计 依据水文资料推求汛限洪水水位的关键是推算不同水位高度的再现频率。传统的洪水频率计算一般假设分期洪水之间相互独立,且分期洪水和年极值洪水参数满足特定的分布函数<sup>[9]</sup>;

通常用实线法估计洪水频率,即首先确定洪水频率曲线线型,通过数据拟合求取与经验频率点匹配的最优参数,从而得到设计洪水值。由于洪水频率曲线所要求的洪峰流量序列数据年份不连续,本文以实线法的一般假设为基础,采用概率插值法进行洪水水



位估计。渠江主城区 1956—2021 年的连续水文监测数据时间序列较短( $N=65$ ),尽管可以较为准确地估计高频率洪水水位,但是不足以估计 100 年一遇洪水水位。本研究首先运用 1568 年以来的长时序数据进行估算,然后以短时序水文数据为参照对高频率洪水水位进行调整,最终确定主城区的洪水水位。同时,由于三汇镇、土溪镇和临巴镇的水文数据序列较短或存在间断不足以做出洪水水位的准确估计,因此,在渠江主城区概率插值法估算的基础上,根据上下游水文站之间的水位相关性与水位差值,采用水位关联法进行估计。

(1)长时序水文数据补全。1568—1956 年仅有数次特大洪水水位记录,需要对资料不全年份进行数据填补。根据 1956—2021 年的短时序数据分析可得渠江镇历史水位基本符合正态分布(图 2),其参数估计为:

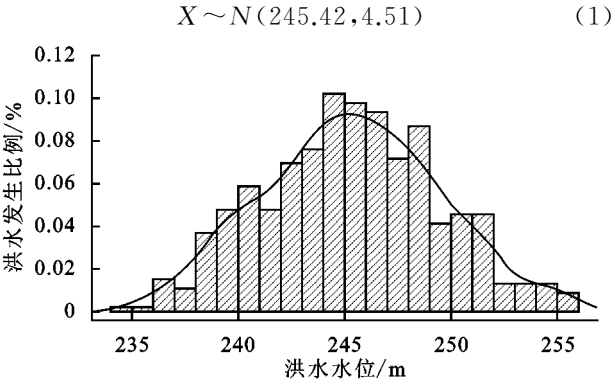


图 2 渠江镇短时序历史洪水位的统计分布

由于有明确记载的历史特大洪水已纳入正态分布估计,可以认为其他年份历史水位数据均未超过上述数值。考虑到 1818 年渠江洪水水位 253.6 m 为数次历史特大洪水水位的最低值,而其对应所估计的正态分布概率为 0.98,故在(0,0.98)的概率范围内按公式(1)的正态分布随机生成洪水水位值,对缺失年份数据进行填补。

(2)洪水发生频率及洪水水位估计。根据经验频率计算公式<sup>[9]</sup>,对填补后的水位数据降序排列并计算对应洪水发生频率( $p$ ):

$$p = \text{rank} / (N + 1) \quad (2)$$

式中: $N$  为水文资料所含年数; $\text{rank}$  是各年洪峰对应的序号。2011 年、1770 年、1724 年是所记录水位最高的 3 次洪水,其估计再现频率分别为 0.22%,0.44%,0.66%。

1.3.2 淹没分析 以渠县 30 m DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 10.2 软件进行栅格计算,依据表 1 中 4 种不同重现期的洪水水位模拟淹没范围,并将其与现状土地利用数据叠加,得到不同洪水淹没情景下的影响范围。

2 结果与分析

2.1 主城区与主要沿江城镇洪水水位更新

在主城区(渠江镇水文站),洪水发生频率与洪水水位关系见图 3。与概率为 0.50%,1%,2%,5%,10%所对应的洪水水位分别为 255.05,254.75,253.48,251.74,250.67 m,也即 200,100,50,20,10 年再现期的洪水水位。

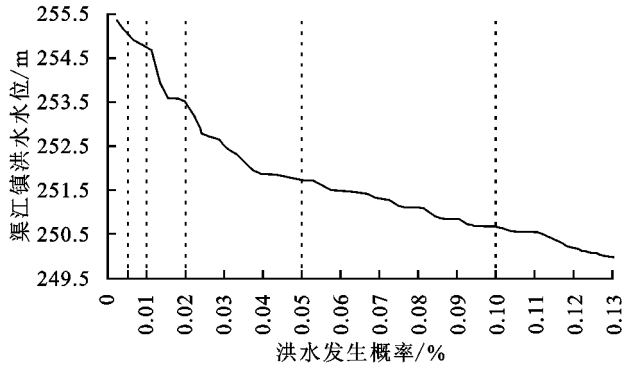


图 3 渠江镇主要再现频率的洪水水位估算

利用 1956—2021 年短时序水文资料对以上洪水水位校核,估算得 10 年一遇、20 年一遇和 50 年一遇洪水水位分别为 250.54,252.10,255.18 m。比较可见,2 类数据对 10 年一遇洪水水位的估计结果十分相近,然而重现期越长,短时序数据所估计的洪水水位越高。考虑到短时序数据对高频洪水的估计精度较高,而长时序数据对低频洪水估计结果较为可靠,所以仅利用短时序数据对 10 年和 20 年重现期洪水水位进行校正。修订后的渠县主城区洪水水位按 100,50,20,10 年再现期分别为 254.75,253.48,252.10,250.54 m(表 3)与表 1 中渠江镇历史水文资料相比,估算所得的洪水水位标高明显上升。10,50,100 年再现期洪水水位平均升高约 40 cm,20 年一遇洪水水位则有所下降。

据水文资料,三汇镇和渠江镇水文站多年平均水位分别为 242,230 m,土溪镇约为 242~243 m。统计年度最高水位数据可知,三汇镇和渠江镇的洪峰水位高度相关(Pearson 相关系数 0.99),其水位差收敛于+12.0 m(平均值和中值分别为+11.92 m,+11.97 m)。土溪镇和渠江镇洪峰水位相关性同样较强(Pearson 相关系数 0.92),其水位差收敛于+12.40 m(平均值和中值分别为+12.42 m,+12.38 m)。1989 年临巴镇苟渡口水文站撤站后缺失近期洪水水位记录,就 1989 年前历史数据而言,苟渡口与渠江镇的年度洪水水位同样高度相关(Pearson 相关系数 0.99),其水位差收敛于+3.40 m(平均值和中值分别为+3.42,+3.44 m)。据此估计并更新三汇镇、土溪镇和临巴镇原苟渡口站的洪水水位(表 3)。

表 3 渠县主城区和主要城镇洪水水位估计结果

| 单位:m         |              |                 |                 |                |
|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 渠江洪水<br>再现频率 | 主城区<br>(渠江镇) | 三汇镇<br>(+12.00) | 土溪镇<br>(+12.40) | 临巴镇<br>(+3.40) |
| 200 年一遇      | 255.05       | 267.05          | 267.45          | 258.45         |
| 100 年一遇      | 254.75       | 266.75          | 267.15          | 258.15         |
| 50 年一遇       | 253.48       | 265.48          | 265.88          | 256.88         |
| 20 年一遇       | 252.10       | 264.10          | 264.50          | 255.50         |
| 10 年一遇       | 250.54       | 262.54          | 262.94          | 253.94         |

## 2.2 渠县主要城镇涝灾害设防标准更新

渠县洪水淹没风险较高的区域集中在渠江、巴河、州河和流江河两岸,而流江河的洪水淹没往往由渠江洪水倒灌引起,因此可以依据渠江洪水水位进行防洪工程设计。现行《国家防洪标准 GB 50201—2014》<sup>[26]</sup>规定,城市防护区应根据政治、经济地位的重要性、常住人口或当量经济规模指标确定防护等级和防洪标准,乡村防护区则主要以人口或耕地面积为依据。渠县本轮(2020—2035)国土空间规划预测,到2035年渠县主城区和三汇镇常住人口规模将分别达到35万和10万,其他乡镇的常住人口规模在10万以下。因此,主城区和三汇镇的设防标准应为50年一遇和20年一遇。

根据更新后的洪水水位重新计算主城区和三汇镇、土溪镇等沿江乡镇的洪水淹没范围,结果见图3。其中,渠县主城区设防标准由原20年一遇洪水水位252.30 m(表1)提高至50年一遇洪水水位253.48 m,设计水位升高1.18 m;三汇镇洪涝设防标准由原10年一遇洪水水位更新为20年一遇洪水水位264.10 m,设计水位需升高1.80 m,其他乡镇的设防标准仍按照10年一遇洪水水位,但根据新的测算设计洪水水位高度提高约20~30 cm。

## 2.3 新旧防洪标准下主要城镇淹没范围对比

表4为表1中原有洪水水位下渠县主城区淹没面积的模拟结果。按照原有的20年一遇设防标准,

渠县主城区淹没范围总面积84.35 km<sup>2</sup>,其中,26.98 km<sup>2</sup>的农田和4.62 km<sup>2</sup>的城镇与村庄建设用地位面临淹没风险。

表 4 原有洪水水位下渠县主城区洪水模拟淹没面积

| 设防标准    | 淹没总                | 淹没                 | 淹没建设               |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
|         | 面积/km <sup>2</sup> | 农地/km <sup>2</sup> | 用地/km <sup>2</sup> |
| 100 年一遇 | 99.55              | 35.71              | 6.60               |
| 50 年一遇  | 91.87              | 31.39              | 5.55               |
| 20 年一遇  | 84.35              | 26.98              | 4.62               |
| 10 年一遇  | 69.71              | 19.36              | 3.07               |

根据估算所得洪水水位重新分析主城区、三汇镇和土溪镇等沿江乡镇的洪水淹没范围,更新后的洪水淹没风险范围与淹没面积统计见表5。防洪标准提高后,主城区、三汇镇和其他乡镇在不同标准下,洪水淹没面积分别为15.93,21.21,79.81 km<sup>2</sup>。经测算,相比原有防洪标准下的淹没范围,提高设防标准可减少全县农地和建设用地淹没面积分别达30,7~8 km<sup>2</sup>。

表 5 洪水淹没风险范围内面积统计

| 区域   | 设防标准   | 淹没总面积/km <sup>2</sup> | 淹没农地/km <sup>2</sup> | 淹没建设用地/km <sup>2</sup> |
|------|--------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 主城区  | 50 年一遇 | 15.93                 | 4.56                 | 2.62                   |
| 三汇镇  | 20 年一遇 | 21.21                 | 6.91                 | 1.70                   |
| 其他乡镇 | 10 年一遇 | 79.81                 | 44.49                | 6.75                   |
| 县域合计 |        | 116.95                | 55.96                | 11.07                  |

由图4可知,从空间分布来看,渠县老城区洪涝灾害风险最高。2010年以前,渠县城市建设以旧城改造为主,老城区人口稠密、房屋建筑密集、道路狭窄、市政道路管网不配套,防洪安全隐患突出。作为四川省农业大县,渠县境内、渠江两岸分布着大量农田,洪涝灾害对渠县农业经济的威胁不可小觑。同时,洪水淹没风险区还影响到位于土溪镇的全国重点文物保护单位城坝遗址保护区,该遗址是西南地区保存最好、内涵最丰富的汉晋县城遗址之一。因此,加强防洪标准更新与工程建设,对渠县城市经济和文化建设具有重要意义。

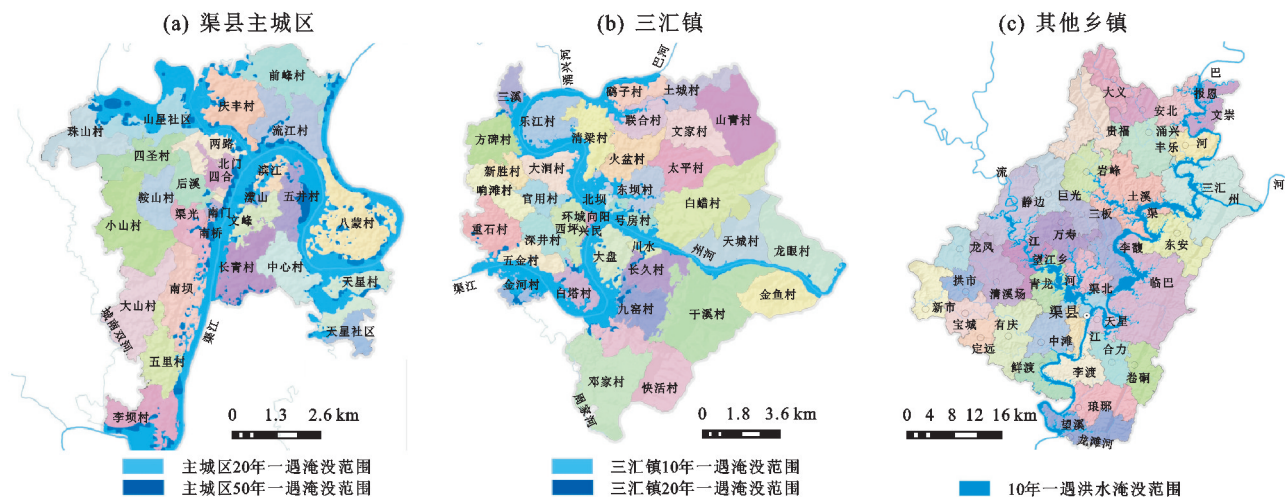


图 4 设防标准修正前后主城区、三汇镇和其他乡镇洪水淹没范围的变化

### 3 讨论

尽管现有研究在洪水预报、洪峰传播、实时监测等方面有了长足进步,构建了许多精确的流域或河段洪水水位模拟模型。但是这些研究多以河湖洪水调度和城市管网建设为主,更多地聚焦于城市内涝治理;而很多容易遭受洪水灾害影响的小城镇往往受限于自身水文资料与观测数据的缺乏,难以在实践中应用分析模型,因此实际工作中多以水利专项或市政工程为导向,缺乏统一的规划思路,容易在人口规模、农业发展、经济建设等方面造成工作协调上的困难。本研究以渠县国土空间规划为背景,采用概率插值法分析渠江历史洪水记载资料和多年水文观测数据,形成了快速、简便并较为可靠的洪水水位估计方法,为国土空间规划中统筹县域土地利用和防灾减灾工程提供了参考依据。结合短时序水文观测数据,尤其是2021年汛期渠县洪水记录进行校验可以发现,本研究估计渠县洪水水位基本满足洪水变幅需求,且修订后的防洪标准可有效减少洪水淹没范围内的农地和建设用地面积;这对于提升渠县防灾减灾能力具有十分重要的意义。

### 4 结论

安全是国土空间开发利用和保护的先决条件,也是区域可持续发展的重中之重。由于气候变化和城镇化发展,很多地区的河流水文条件、河道工程及河流周边的土地利用正在发生剧烈变化。本文以渠县历史洪水记载资料和水文观测数据为基础,采用概率插值法对主要城镇洪水水位和淹没范围进行分析,发现:(1)相比于以往的设防标准,渠江洪水水位有明显升高,10年、50年和100年重现期洪水水位平均升高约40 cm;(2)利用近50年短时序数据得到的洪水水位估计结果相比长时序水位数据估计结果更高,反映渠江流域大洪水发生频率增加的趋势;(3)国土空间规划为百年计,根据未来人口和城市发展规划提高洪水设防标准,渠县主城区和三汇镇防洪水位应分别提高1.18、1.44 m,以有效减少洪水淹没范围。

渠县洪灾的发生频繁与严重损失是由其流域自然地理环境、城乡建设格局与工程建设水平共同决定的。在国土空间规划中,应当统筹渠江流域防洪规划和防洪治理,注重流域生态修复和治理,加大水利设施规划建设。今后,应按县城已建区域和规划新建区的不同需要采用相应治理措施解决城市防洪排涝问题,建设项目选址、灾后重建安置必须达到新的防洪安全标准。城市规划区和重要场镇应结合滨河绿地打造设置防洪堤,以城区、重要基础设施、重要文化遗址保护区和永久基本农田为防护重点,加大河道整治力度,

排除行洪隐患,有效提高城区河段河道行洪能力。老城区应将工程措施建设、生命线通道建设与人口疏散有机结合起来,加强绿地和避难公共建筑物等应急避难空间的建设。此外,还需要充分借鉴“设计结合自然”的流域生态规划理念,在规划中合理预留多功能生态空间,从而实现防洪排涝、水质提升、生态基流保障、生物多样性保护等多重目标。

#### 参考文献:

- [1] Bi J, Yang J X, Liu M M, et al. Toward systemic thinking in managing environmental risks[J]. Engineering, 2021, 7(11): 1518-1522.
- [2] 城市防洪问题与对策调研组. 我国城市防洪问题与对策[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 24(3): 46-48, 65.
- [3] 方思和. 浅谈相应水位法在洪水预报中的应用[J]. 广西水利水电, 2009(1): 40-42.
- [4] 胡琳. 钱塘江河口段水位实时预报[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [5] 赵刚, 徐宗学, 庞博, 等. 基于改进填洼模型的城市洪涝灾害计算方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 20-30.
- [6] 茹伏高. 无水文资料中小河流的设计洪水水位计算方法[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(11): 68-69.
- [7] 李琼, 张幼成, 王洪心, 等. 洪水涨落水位-流量分布规律及应用[J]. 河海大学学报, 2019, 47(6): 507-513.
- [8] 曹亮. 北京市大中型水库洪水调度及汛限水位的研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [9] 张娜, 郭生练, 刘攀, 等. 基于 Copula 函数法推求分期设计洪水和汛限水位[J]. 武汉大学学报, 2008, 41(6): 33-36, 40.
- [10] 刘家宏, 梅超, 向晨瑶, 等. 城市水文模型原理[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 1-5, 13.
- [11] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [12] Bulti D T, Abebe B G. A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6: 1293-1302.
- [13] Fang G, Yuan Y, Gao Y, et al. Assessing the effects of urbanization on flood events with urban agglomeration polders type of flood control pattern using the HEC-HMS model in the Qinghai river basin, China[J]. Water, 2018, 10(8): e1003.
- [14] Yan, K, Di Baldassarre G, Solomatine D P, et al. A review of low-cost space-borne data for flood modeling: Topography, flood extent and water level[J]. Hydrological Process, 2015, 29: 3368-3387.
- [15] Grimaldi S, Li Y, Pauwels V R N, et al. Remote sensing-derived water extent and level to constrain hydraulic flood forecasting models: opportunities and challenges [J]. Surveys in Geophysics, 2016, 37(5): 977-1034.

(下转第350页)



- quality in a composite pecan orchard agroforestry system based on the smallest data set[J]. Sustainability, 2022, 14(17): e10665.
- [10] Guo J X, Luo Z W, Tao J X, et al. Soil chemical quality assessment and spatial distribution of pomelo orchards in acidic red soil hilly regions of China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(6): 2613-2622.
- [11] Ashley-Hammack W, Diane E S, Douglas L K, et al. Crop, tillage and landscape effects on near-surface soil quality indices in Indiana[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(6): 1638-1652.
- [12] 宋鸽, 史东梅, 朱红业, 等. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 610-622.
- [13] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [14] Jahany M, Salar R. Assessment of the quality indices of soils irrigated with treated wastewater in a calcareous semi-arid environment[J]. Ecological Indicators, 2020, 109: e105800.
- [15] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-267.
- [16] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 30-35.
- [17] 刘鑫, 王一博, 杨文静. 青藏高原植被退化背景下土壤质量评价方法研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 143-153.
- [18] Edmundo B. Soil biota, ecosystem services and land productivity[J]. Ecological Economics, 2007, 64(2): 269-285.
- [19] 哈里·阿力腾别克, 孙宗玖, 何盘星, 等. 封育对蒿类荒漠草地土壤氮素含量及其组分特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 222-230, 240.
- [20] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 101-107.
- [21] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682-689.
- [22] 于天一, 逢焕成, 唐海明, 等. 不同母质类型水稻土酶活性及其与理化性质的关系[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1043-1047.
- [23] 薛莲, 刘国彬, 张超, 等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 310-316.
- [24] Arnáez J, Lana-Renault N, Lasanta T, et al. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review[J]. Catena, 2015, 128: 122-134.
- [25] 周欣花. 黄土丘陵沟壑区坡改梯土壤质量效应研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 74-78.
- [26] 汪三树, 刘德忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的蓄水保土效应[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 4091-4100.
- [27] 程谅, 焦雄, 邸涵悦, 等. 不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1423-1435.
- [28] 邱悦, 杨晓燕, 李天胜, 等. 减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶活性和氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 294-302.
- [29] 张庆, 尹本丰, 李继文, 等. 荒漠藓类植物死亡对表层土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 350-361.
- (上接第 341 页)
- [16] Noor F, Haq S, Rakib M, et al. Water level forecasting using spatiotemporal attention-based long short-term memory network[J]. Water, 2022, 14: e612.
- [17] 马建堂. 民国时期渠江流域自然灾害探析[J]. 兰州文理学院学报, 2015, 31(4): 116-121.
- [18] 蒋大成, 牟伦武. 渠江流域“7·11”暴雨洪水特性分析及防洪对策研究[J]. 四川水利, 2022, 43(1): 53-56.
- [19] 徐伟. 渠江行洪能力及预防措施浅析[J]. 陕西水利, 2010(4): 134-135.
- [20] 袁梦, 马力. 渠江流域汛期强降水时空分布特征[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(1): 15-21.
- [21] 李学通, 陈光洪, 张星荣. 渠江流域洪水特性及防洪对策措施[J]. 四川水利, 2013, 34(1): 19-22, 44.
- [22] 李卫朋, 伏润得, 梁七丹, 等. 基于碑刻记录的嘉陵江清代洪水发生规律及成因研究[J]. 地球环境学报, 2017, 8(5): 384-396.
- [23] 王英, 张利平. 渠县 1958—2017 年气候特征分析[J]. 农业技术与装备, 2019(9): 55-56.
- [24] 四川省水利水电勘测设计研究院, 四川省水文水资源勘测局. 四川省渠江流域防洪规划[Z]. 2011.
- [25] 渠县住房和城乡建设局. 渠县城市总体规划(2011—2030 年)[Z]. 2012.
- [26] 国家住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 防洪标准(GB 50201—2014) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.