

文章编号: 2097-096X(2023)-05-0403-09

长江中下游超标准洪水情景风险分析

李娜^{1,2}, 王静^{1,2}, 王艳艳^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 流域发生超过其时现状防洪标准洪水的可能性和不确定性长期存在。未来气候变化和社会经济发展共同作用下, 超标准洪水的影响会更加严重。本文针对长江中下游干流防洪区, 综合采用情景分析、水文分析、洪水淹没和影响分析等方法, 设定了未来到 2035 年、2050 年和 2100 年的 1000 年一遇超标准洪水共 9 个情景方案, 其中, 3 个未来年份情景下的降雨径流分别按较现状增加 5%、10% 和 15% 考虑。通过分析得出, 在未来气候变化和社会经济发展组合情景下, 长江中下游干流防洪区遇 1000 年一遇洪水, 2035 年、2050 年和 2100 年淹没区受影响人口将由基准年(2020 年)的 1768 万人分别增加到 2888 万人、3536 万人和 3065 万人, 经济损失将由基准年的 12669 亿元分别增加到 30533 亿元、52599 亿元和 87264 亿元。淹没区受影响人口最多可达现状的 1.52 倍, 直接经济损失最大可达现状的 6.89 倍。现状防御体系在面对未来超标准洪水情景时必将更加脆弱, 分析结果可以为流域制定长期可持续的应对未来变化条件下的防洪减灾策略提供参考。

关键词: 超标准洪水; 气候变化; 情景分析; 洪水风险分析; 长江中下游

中图分类号: TV877

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20230095

1 研究背景

流域超标准洪水是指超过其时防洪工程体系(包括水库、堤防、蓄滞洪区等在内)现状防洪标准的洪水。独特的地理环境和季风性气候决定了我国自古以来就是洪涝灾害频发的国家。我国七大流域不同历史时期的超标准洪水给人们留下了深刻印象, 如长江流域 1860 年、1870 年洪水, 20 世纪的 1931 年、1954 年和 1998 年洪水; 海河流域的 1917 年、1939 年、1956 年、1963 年和 1996 年洪水, 辽河流域的 1888 年、1951 年、1985 年、1995 年洪水等^[1-2]。

分析这些历史超标准洪水的发生发展过程, 可以总结出以下三方面主要特征: 一是超标准洪水多数由特大暴雨引发, 包括两种类型, 一类是流域性暴雨, 即短时段内的暴雨强度不一定很大, 但持续时间长、雨区范围广、总雨量很大, 易造成全流域大洪水。如 1954 年江淮大水^[3], 从 4 月份鄱阳湖水系出现暴雨开始, 5、6 月份暴雨集中在长江以南丘陵地区, 到 7 月份雨区北移到长江干流以北和淮河流域, 5—7 月 300 mm 以上雨区范围约为 74 万、71 万和 91 万 km², 相应总降水量分别达 3000 亿、3200 亿和 4280 亿 m³。另一类是区域性暴雨, 这类暴雨范围相对较小, 历时也相对较短, 但暴雨强度很大, 易引发局部灾害, 如 1870 年长江上游大水, 7 月 13 至 19 日, 暴雨主要集中在嘉陵江中下游、川东南和长江干流重庆至宜昌区间。据洪水调查和推算, 宜昌站洪峰流量达 105000 m³/s, 干流寸滩—宜昌站, 1870 年洪水位比 1954 年高出 3.8 米到 10 多米^[4]。二是超标准洪水往往是各种不利条件遭遇而成。如 1915 年珠江流域大洪水^[5], 西江、北江和东江均同时发生大洪水或特大洪水, 东江博罗站 7 月 9 日出现最高洪水位, 西、北江洪水接踵而至, 西江梧州和北江横石均在 7 月 10 日出现最大洪峰, 三江洪水在三角洲遭遇, 又适逢六月初一大潮, 几种不利因素组合在一起, 使得三角洲受到严重影响, 广州市被淹 7 天之久。三是工程出险或失事也会引起超标准洪水。受防洪工程设计标准低、工程

收稿日期: 2023-05-17; 网络首发时间: 2023-09-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20230912.1328.004>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3006400, 2022YFC3006403); 长江联合基金项目(U2240203)

作者简介: 李娜(1973-), 博士, 正高级工程师, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: lina@iwahr.com

老化、年久失修甚至人为扒口等影响，河道、库区高水位会引发堤防溃决、水库垮塌等破坏性事件发生，造成下游大面积和长时间淹没，如淮河流域“75.8”大水^[6]，受“7503号”台风暴雨影响，设计标准较低的板桥和石漫滩两座大型水库和其他60座中小型水库相继垮坝，溃坝洪水以6~8 m/s的速度冲出河道冲向下游，下游7座县城遭到毁灭性灾害。1133万hm²耕地受淹，1100万人受灾，京广线被冲毁102 km，中断行车18天，影响运输48天，是世界最为严重的溃坝事件之一。

在全球气候变化和人类活动共同影响背景下，极端降水事件频率和强度增加，洪水本身的重现期降低，相应地防洪工程体系的防御能力可能会被动下降^[7]。同时，未来我国城镇化进程将持续推进，据预测，到2050年我国城镇化率将达到78.3%^[8]，人口和资产将有可能快速向高风险区集中，一旦超标洪水发生，损失和影响将更为严重。因此，研究未来洪水风险如何变化，对清楚认识现状防御体系的问题与短板，明确未来超标洪水防御重点，提出具有针对性、可持续性的防御措施具有重要支撑作用。

长江流域中下游是我国经济社会发展最迅速、最具活力的重要防洪区之一。依靠流域防洪体系，长江中下游干流荆江河段防洪标准达到100年一遇，配合荆江地区蓄滞洪区的运用，可防御历史上发生的1860年、1870年特大洪水；城陵矶及以下干流河段通过干支流水库调蓄，考虑蓄滞洪区的运用，可防御新中国成立以来发生的最大洪水（1954年洪水，最大30天洪量约200年一遇）^[9]。本文以长江中下游干流防洪区为研究区域，综合采用情景分析^[10]、水文分析和洪水风险分析等方法，分析多种情景下流域超标洪水可能造成的影响损失及变化趋势，为流域制定长期可持续发展的应对未来变化条件下的防洪减灾策略提供参考。

2 流域未来超标洪水情景设定

2.1 未来气候变化预估结果 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次评估报告^[11]中CMIP5气候模式(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 国际耦合模式比较计划5)共设定了四种典型浓度路径，即RCP 2.6(Representative Concentration Pathway 2.6, 低排放，严格减缓情景)、RCP 4.5和RCP 6.0(中排放)、RCP 8.5(高排放)。根据该报告对我国所在的东亚区域到21世纪末的气候预估结果，在RCP 4.5排放情景下，与1986—2005年期间相比，到2035年，6—8月降水可能会增加-3%~6%，到2065年增加-2%~18%，到2100年增加1%~24%。在RCP 8.5排放情景下，增加的比例会更大。2016—2035年期间的年平均径流量在长江上游地区可能增加0~10%，中下游地区可能减少0~10%。到2081—2100年，年平均径流量在四种排放情景下变化的幅度逐渐变大，RCP 2.6情景下变化趋势为-0.1~0.2 mm/d，RCP 4.5和6.0情景下，中下游地区径流呈减小趋势，上游部分区域变化趋势增大为0.2~0.3 mm/d，在RCP 8.5情景下，这种趋势更加明显，尤其在上游部分区域，出现超过0.5 mm/d的情况。

我国研究学者应用全球气候模式的预估结果数据，针对长江流域进一步耦合不同的区域气候模式，并驱动水文模型，研究结果显示，RCP 4.5情景下，极端降雨量(指每年日降雨量大于1961—1990年第90个百分位值的总降雨量)和降雨强度(雨天平均降雨量，即总降雨量/降雨天数)在长江中下游北部地区呈显著下降趋势；而在长江中下游南部地区则呈显著上升趋势，极端降雨量变化幅度为4.40 mm/10 a，降雨强度变化幅度为13.63 mm/10 a；连续一天和五天最大降雨量在长江中西北部和长江中下游南部地区均表现出减少趋势，其余地区则以增加趋势为主。RCP 8.5情景下，各极端降水指标在2020—2099年均表现出微弱增加趋势，而以长江中下游地区的增加趋势最明显^[12]。在空间上，降水量增加较大的区域主要位于长江上游和东北部^[13]。

IPCC第六次评估报告^[7]继续预测，在全球变暖4℃条件下(相对于1850—1900年)，长江流域河流流量总体呈增加趋势，增加比例的中位数为16%。部分区域最大1日降雨量较1995—2014年增加20%~40%。到2071—2100年，低(SSP1-2.6, Shared Socioeconomic Pathways1-2.6)、中(SSP2-4.5)和高(SSP5-8.5)三种排放情景下我国长江中下游地区的河流洪水频率相对于1970—2000年基本呈现

增加趋势,在中排放情景下,近一半区域的河流洪水重现期减小幅度达到5~25年(即洪水频率增加0.2~0.04)。这意味着在不采取任何干预或提升措施的情况下,现状100年一遇的设防标准在未来50年后可能降低为约5~20年一遇,超标准洪水更加易发频发。

2.2 未来经济社会发展预测

2.2.1 未来经济预测 我国在2010年进入上中等收入国家之后,经济增速开始出现放缓,增速已经从前三十年年均10%以上放缓至近三年平均4.5%。据预测,未来经济增速继续放缓是必然,但增速放缓的幅度和程度取决于通过深化改革开放和鼓励创新等措施提升全要素生产率带来的经济潜力释放的情况。并按基准、积极及消极三种情景来模拟未来2020—2050年的中国经济发展趋势^[14]。本文引用被认为是出现概率较高(50%以上)的社会经济基准趋势预测成果开展超标准洪水的未来情景分析。在基准情况下,预计2021—2035年均经济增速为5%,2035—2050年均经济增速为3.8%。对于2100年的经济预测引用联合国预测数据^[15],并考虑物价的变动情况,折算2050—2100年的年均经济增速为1.2%左右。

2.2.2 未来人口发展预测 对于我国未来人口预测的成果相对较多,本文引用中国宏观经济研究院社会发展研究所赵玉峰的中长期人口发展趋势研究成果^[16]。其对于人口预测数据主要来源于三方面,一是中国人口与发展研究中心研发的人口预测软件PADIS-INT对我国中长期人口发展变动情况的预测结果;二是联合国人口司每隔两年发布的《世界人口展望》,该报告对2019—2100年的全球及国家、地区层面的人口变化趋势进行了预测;三是国内知名专家学者进行的人口预测。综合三类人口预测数据并通过比对得出具有较好代表性的预测结果。中方案的人口预测显示,现有人口政策下,未来我国人口(不包括香港、澳门特别行政区和台湾省,下同)将持续增长一段时期,2035年将达到14.3亿人,2050年降至13.7亿人,2100年为9.8亿人。

2.3 未来超标准洪水情景设定

2.3.1 气候变化影响下的未来超标准洪水情景 根据气候变化预估结果中到21世纪末各阶段降雨和径流的变化情况,针对长江中下游干流防洪区的1000年一遇超标准洪水,在现有洪水风险评估的边界条件下,拟定三种不同程度的径流量增加结果,即30天洪量分别增加5%、10%和15%,分别对应未来气候变化条件下到2035年、2050年和2100年的三个典型情景。长江中下游不同河段现状300年一遇和1000年一遇设计洪量^[17]及未来情景下拟定增加的洪量见表1和表2。四个控制站在现状条件下的1000年一遇洪量较300年一遇增加的比例介于7.53%~10.34%之间。这也从量级上反映出本文基于IPCC5的预测结果拟定的30天洪量增加5%、10%和15%的情景属于较为极端且影响较大的未来情景。

表1 长江中下游干流防洪区现状条件下不同控制站30天设计洪量表

Table 1 30-day design flood volume of different control stations under the current conditions of the flood control areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River

河段	控制站	300年一遇洪量/亿 m ³	1000年一遇	
			洪量/亿 m ³	较300年一遇增加比例/%
荆江河段	枝城站	1487	1599	7.53
城陵矶河段	螺山站	2088	2304	10.34
武汉河段	汉口站	2296	2497	8.75
湖口河段	大通站	2759	3001	8.77

2.3.2 基于社会经济发展的超标准洪水情景 有关长江流域经济和人口发展的预测研究成果较少。本研究中采用2.2节所述全国的经济平均增长率和人口平均变化幅度来表示长江中下游干流防洪区的未来经济人口发展状况。与气候变化情景相对应,社会经济发展也选择2035年、2050年和2100年三个时间点拟定未来经济发展情景,具体方案为评估在现状气象水文和工况条件下的1000年一遇超标准

洪水的淹没，若经济状况为 2035 年、2050 年和 2100 年时其造成的洪灾损失及人口影响，也即评估未来仅考虑经济社会的发展变化下超标准洪水的影响趋势。

2.3.3 气候变化和社会经济发展组合影响下的超标准洪水情景 组合未来气候变化和经济社会发展的预测进行超标准洪水情景的设定。同样选择 2035 年、2050 年和 2100 年三个时间点拟定未来超标准洪水情景。具体方案为评估在各时间点气象水文及经济发展条件下，发生 1000 年一遇洪水的淹没造成的洪灾损失及人口影响。综上，共设定了 9 个未来超标准洪水情景(见表 3)进行洪水风险评估。方案一为现状基准情景方案。

表 2 未来气候变化条件下长江中下游干流防洪区 1000 年一遇超标准洪水新增淹没洪量计算结果(单位: 亿 m³)

Table 2 Calculation results of the increased inundated flood volume in the flood control area of the middle and lower reaches of the Yangtze River for 1000 years return period under the condition of future climate change(Unit: 10⁸ m³)

河段	现状	按比例增加洪量			新增淹没洪量		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
荆江河段	1599	80.0	159.9	239.9	80.0	159.9	239.9
城陵矶河段	2304	115.2	230.4	345.6	115.2	230.4	345.6
武汉河段	2497	124.9	249.7	374.6	124.9	249.7	374.6
湖口河段							
湖口以下河段	3001	150.1	300.1	450.2	150.1	300.1	450.2

表 3 未来超标准洪水情景方案设定

Table 3 Scenarios of future excessive flood

方案	说明
方案一	现状防洪工程体系条件下的 1000 年一遇洪水
方案二	未来到 2035 年气候变化影响下 1000 年一遇洪水
方案三	未来到 2050 年气候变化影响下 1000 年一遇洪水
方案四	未来到 2100 年气候变化影响下 1000 年一遇洪水
方案五	未来到 2035 年经济社会发展情景下 1000 年一遇洪水
方案六	未来到 2050 年经济社会发展情景下 1000 年一遇洪水
方案七	未来到 2100 年经济社会发展情景下 1000 年一遇洪水
方案八	未来到 2035 年气候变化和经济社会发展组合情景下 1000 年一遇洪水
方案九	未来到 2050 年气候变化和经济社会发展组合情景下 1000 年一遇洪水
方案十	未来到 2100 年气候变化和经济社会发展组合情景下 1000 年一遇洪水

3 未来超标准洪水风险分析

3.1 情景方案淹没分析 针对长江中下游干流防洪区，分四个河段分别估计未来气候变化情景下增加的超额洪量对防洪保护区淹没程度和范围的影响，即荆江河段、城陵矶河段、武汉河段和湖口河段、湖口以下河段。采用定性和半定量化的概化分析方法，假定增加的洪量中超过河道泄洪能力和蓄滞洪区分蓄洪能力的超额洪量，将会加剧防洪保护区的淹没范围。每个河段的超额洪量只淹没于该河段外的防洪保护区内，且假定最终状态下的平均淹没水深较现状防洪体系下的超标准洪水(超一个量级)基本不变，淹没面积相应增大。以荆江河段为例，由于目前遇 1000 年一遇或 1870 年同大洪水，通过三峡水库的调节，可控制枝城泄量不超过 80000 m³/s，配合荆江地区蓄滞洪区的运用，可控制沙市水位不超过 45.0 m，保证荆江河段行洪安全。未来气候变化条件下，随着长江上游降雨和径流的增加，按 1000 年一遇的 30 日洪量将增加 10%估计，为 159.9 亿 m³，已远远超过该河段 4 个分蓄洪区^[18](即荆

江分洪区、浈市扩大分洪区、虎西预备区和人民大院)的设计蓄洪容积(约 72 亿 m³),所以增加后的洪量中超过 1000 年一遇设计洪量的部分将可能淹没荆江河段外 5 个防洪保护区(即荆江大堤保护区、松滋江堤保护区、荆南长江干堤保护区、下百里洲江堤保护区和南线大堤保护区)的部分区域,水深按洪水风险图编制成果中该区域溃堤后平均淹没水深约 5 m 估计。其淹没分析主要采用一、二维水力学模型方法,模拟保护区在长江干流发生超规划防洪标准对应量级的洪水条件下,溃堤洪水的演进过程、淹没范围、最大淹没水深、淹没历时等水力要素。

不同河段对应的防洪保护区及整个中下游防洪区在现状条件下的淹没总面积和未来情景下的淹没情况见表 4 和表 5。现状和未来不同情景下,洪泛区和蓄滞洪区的总淹没面积均为 11567.8 km²。经分析得出:

表 4 长江中下游干流分河段防洪保护区现状和未来情景下的 1000 年一遇超标准洪水淹没情况表
Table 4 Flood inundation of flood control protection areas in different main river sections of the middle and lower reaches of the Yangtze River in current and future scenarios of 1000 years return period

分类	河段	区域面积/km ²	淹没面积/km ²			
			现状条件下	未来情景下		
				方案二	方案三	方案四
防洪保护区	荆江河段	16059.2	0	1599	3198	4797
	城陵矶河段	11855.8	5772.7	7444.7	9116.7	10788.7
	武汉、湖口河段	15419.6	4962	7777.5	10708.2	13639
	湖口以下河段(不含江苏、上海)	28692.4	11610.1	12786	16734.7	20683.4
合计		72027	22344.8	29607.2	39757.6	49908.1

表 5 长江中下游干流防洪区现状和未来情景下的 1000 年一遇超标准洪水淹没情况表
Table 5 Flood inundation of flood control area of the middle and lower reaches of the Yangtze River in current and future scenarios of 1000 years return period

分类	内容	现状条件下	未来情景下		
			方案二	方案三	方案四
防洪保护区	淹没面积/km ²	22344.8	29607.1	39757.5	49908
	较现状淹没面积增加比例/%	-	32.5	77.9	123.4
防洪区(含防洪保护区、洪泛区和蓄滞洪区)	淹没面积/km ²	33912.7	41174.9	51325.3	61475.8
	较现状淹没面积增加比例/%	-	21.4	51.3	81.3
	占防洪区面积比例/%	24.2	29.3	36.6	43.8

(1) 未来洪量增加 5% 的情景下(到 2035 年), 1000 年一遇洪水防洪保护区淹没面积由现状的 22344.8 km² 增加到 29607.2 km², 增加了 32.5%。针对整个中下游防洪区(含洪泛区、蓄滞洪区和防洪保护区, 下同), 1000 年一遇洪水淹没面积由 33912.7 km² 增加到 41174.9 km², 增加比例为 21.4%, 占防洪区面积的比例为 29.3%。

(2) 未来洪量增加 10% 的情景下(到 2050 年), 1000 年一遇洪水防洪保护区淹没面积由现状的 22344.8 km² 增加到 39757.6 km², 增加了 77.9%。针对整个中下游防洪区, 1000 年一遇洪水淹没面积的增加比例超过了 50%, 达 51325.3 km², 占防洪区面积比例为 36.6%。

(3) 未来洪量增加 15% 的情景下(到 2100 年), 1000 年一遇洪水防洪保护区淹没面积由现状的 22344.8 km² 增加到 49908.1 km², 增加了 123.4%。针对整个中下游防洪区, 1000 年一遇洪水淹没面积的增加比例超过了 80%, 达 61475.8 km², 占防洪区面积的比例达 43.8%。

未来随着长江中下游河道进一步冲刷, 到 2032 年, 干流宜昌至大通河段累积总冲刷量为 20.91 亿 m³,

从而引起河道槽蓄容增加，河道安全泄量增大，长江中下游地区总超额洪量将会减小^[19-20]。同时，随着长江上游乌东德、白鹤滩，雅砻江两河口、大渡河双江口、资水金塘冲、澧水宜冲桥等长江干支流规划水库的建设，调蓄能力也会显著增加，超标准的洪量有可能被水库拦蓄或调节，在一定程度上可以减轻防洪区的淹没和影响程度。本文按最不利的情景进行计算和分析。

3.2 情景方案影响损失分析 结合现状社会经济情况，参考洪水风险图编制成果^[21-22]，分别确定长江流域防洪保护区、洪泛区及蓄滞洪区单位面积上的洪灾损失值和受影响人口，根据未来洪水情景的淹没分析结果(方案二、方案三和方案四，表4和表5)，采用大尺度的洪水影响及损失评估方法^[23]，评估长江中下游干流防洪区在未来不同情景下洪水造成的影响及损失情况见图1和表6。经分析得出：

(1) 未来到2035年，防洪保护区1000年一遇洪水淹没区人口将由现状的1767.56万增加到2177.37万，增加了23.2%；洪灾损失则由现状的11207.54亿元增加到15277.56亿元，增加了36.3%。针对整个中下游防洪区，1000年一遇淹没区人口由2326.38万增加到2736.19万，增加了17.6%；经济损失由12669.23亿元增加到16739.25亿元，增加了32.1%。

(2) 未来到2050年，防洪保护区1000年一遇洪水淹没区人口将增加到2937.79万，较现状增加了66.2%；经济损失增加到20281.92亿元，较现状增加了81.0%。针对整个中下游防洪区，1000年一遇淹没区人口增加比例达50.3%，洪灾经济损失的增加比例达到71.6%。

(3) 未来到2100年，防洪保护区1000年一遇洪水淹没区人口将增加到3698.22万，较现状增加了109.2%；经济损失增加到25286.33亿元，较现状增加了125.6%。针对整个中下游防洪区，1000年一遇淹没区人口增加比例达到83.0%，洪灾经济损失增加了111.1%。

根据未来社会经济预测成果，对防洪区现状单位面积淹没区人口和单位面积损失值进行调整得到未来不同年份相应指标值，同时考虑未来洪水情景的分析结果，评估在未来气候变化和社会经济发展组合情景下(方案八、方案九和方案十)，长江中下游干流防洪区1000年一遇超标洪水造成的影响损失情况如下：

(1) 在2035年气候变化与经济社会发展组合情景下，防洪区内的淹没区人口将由2326.38万增加到2887.75万，增加了24.1%；经济损失由12669.23亿元增加到30532.84亿元，增加了141%。

(2) 在2050年气候变化与经济社会发展组合情景下，防洪区内的淹没区人口将增加到3535.64万，较现状增加52.0%；洪灾经济损失将增加到52598.78亿元，增加了315.2%。

(3) 未来到2100年气候变化与经济社会发展组合情景下，防洪区内的淹没区人口为3064.93万，较现状增加31.8%；洪灾经济损失将增加到87263.95亿元，增加比例达588.8%。

各情景下长江中下游干流防洪区受灾人口和经济损失主要发生在荆州、岳阳、仙桃、武汉、黄冈、黄石、九江、池州、安庆、芜湖、铜陵、马鞍山等地区。

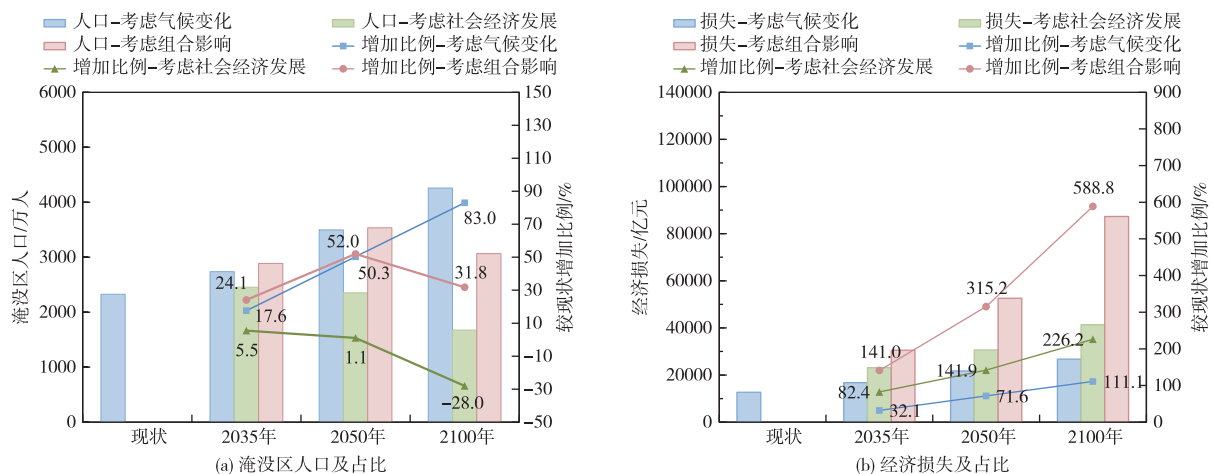


图1 各情景方案下的淹没区人口和经济损失变化

Fig.1 Population and economic loss changes in inundated areas under each scenarios

表 6 长江中下游干流防洪区各方案的洪水影响损失分析结果
Table 6 Analysis results of flood impacts and losses for each scenario

方案编号	影响人口			经济损失		
	淹没区人口 /万人	较现状增加值 /万人	较现状增加比例 /%	经济损失 /亿元	较现状增加值 /亿元	较现状增加比例 /%
一	2326.38(1767.56)	-	-	12669.23(11207.54)	-	-
二	2736.19(2177.37)	409.81(409.81)	17.6(23.2)	16739.25(15277.56)	4070.01(4070.01)	32.1(36.3)
三	3496.61(2937.79)	1170.23(1170.23)	50.3(66.2)	21743.61(20281.92)	9074.38(9074.38)	71.6(81.0)
四	4257.04(3698.22)	1930.66(1930.66)	83.0(109.2)	26748.03(25286.33)	14078.79(14078.79)	111.1(125.6)
五	2455.24(1865.47)	128.86(97.91)	5.5(5.5)	23109.03(20442.87)	10439.79(9235.33)	82.4(82.4)
六	2352.35(1787.29)	25.97(19.73)	1.1(1.1)	30647.46(27111.56)	17978.23(15904.02)	141.9(141.9)
七	1674.92(1272.59)	-651.46(-494.97)	-28.0(-28.0)	41332.67(36563.99)	28663.44(25356.45)	226.2(226.2)
八	2887.75(2297.98)	561.37(530.42)	24.1(30.0)	30532.84(27866.68)	17863.61(16659.14)	141.0(148.6)
九	3535.64(2970.59)	1209.26(1203.03)	52.0(68.1)	52598.78(49062.88)	39929.55(37855.34)	315.2(337.8)
十	3064.93(2662.60)	738.55(895.04)	31.8(50.6)	87263.95(82495.27)	74594.72(71287.73)	588.8(636.1)

注：表中括号内数据为防洪保护区的洪水影响损失分析结果。

4 结论

本研究基于 IPCC 气候变化预估结果和国内外机构或学者对我国人口和经济的预测数据，综合采用情景分析、水文分析、洪水淹没和影响分析等方法，对长江中下游干流防洪区到未来 2035 年、2050 年和 2100 年遭遇 1000 年一遇超标准洪水情景进行了风险分析，得到以下结论：

(1) 仅考虑气候变化影响时，长江中下游干流防洪区的淹没区面积有可能由现状的 33912.7 km² 增加到 61475.8 km²，占防洪区面积的 43.8%。对应受影响人口将可能达 4257.04 万，较现状增加 83%，洪灾经济损失较现状增加 1.1 倍，达 26748.03 亿。

(2) 当综合考虑气候变化和社会经济发展的共同影响时，防洪区受影响人口最多是现状的 1.52 倍，直接经济损失最高是现状的 6.89 倍，超过 8.7 万亿。由此可见，现状防御体系在面对未来极端的超标准洪水情景时更加脆弱。

(3) 考虑到未来长江中下游河湖水系的蓄泄关系变化，总超额洪量将会有所减小。另外，随着长江干支流规划水库建设，调蓄能力显著增加，超标准的洪量有可能通过水库拦蓄或调节，进而减轻对中下游的淹没和影响。

参 考 文 献：

- [1] 骆承政. 中国历史大洪水调查资料汇编 [M]. 北京：中国书店，2006. (LUO Chengzheng. Compilation of historical flood survey data in China [M]. Beijing: China Bookstore Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 吕娟，凌永玉，姚力玮. 新中国成立 70 年防洪抗旱减灾成效分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报，2019，17(4)：242-251. (LÜ Juan, LING Yongyu, YAO Liwei. Analysis on the effect of flood and drought disaster prevention in the 70 years since the founding of New China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 242-251. (in Chinese))
- [3] 长江水利委员会水文局. 1954 年长江的洪水 [M]. 武汉：长江出版社，2004. (Hydrological Bureau of the Yangtze River Water Resources Commission. The Flood of the Yangtze River in 1954 [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 胡明思，骆承政. 中国历史大洪水(下卷) [M]. 北京：中国书店，1989. (HU Mingsi, LUO Chengzheng. The Flood of the Yangtze River in 1954 [M]. Beijing: China Bookstore Press, 1989. (in Chinese))

- [5] 人民珠江编辑部. 1915 年珠江流域大洪灾[J]. 人民珠江, 2006(5): 38. (Pearl River Editorial Department. The Flood of the Pearl River Basin in 1915[J]. Pearl River, 2006(5): 38. (in Chinese))
- [6] 河南省水利厅. 河南“75·8”大洪水灾害[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (Henan Provincial Department of Water Resources. ‘75·8’ Flood Disaster in Henan Province[M]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2005. (in Chinese))
- [7] PÖRTNER H O, ROBERTS D C, TIGNOR M, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[C]// Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [8] 乔文怡, 李玟, 管卫华, 等. 2016—2050 年中国城镇化水平预测[J]. 经济地理, 2018, 38(2): 51–58. (QIAO Wenyi, LI Le, GUAN Weihua, et al. Prediction of urbanization level in China: 2016–2050[J]. Economic Geography, 2018, 38(2): 51–58. (in Chinese))
- [9] 胡维忠, 王乐, 刘佳明. 长江流域防洪工程体系能力提升建设思路[J]. 中国水利, 2022, 935(5): 31–34. (HU Weizhong, WANG Le, LIU Jiaming. Ideas of capacity building for flood control engineering system in the Yangtze River Basin[J]. China Water Resources, 2022, 935(5): 31–34. (in Chinese))
- [10] 王艳艳, 梅青, 程晓陶. 流域洪水风险情景分析技术简介及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 56–65. (WANG Yanyan, MEI Qing, CHENG Xiaotao. Introduction and application of river basin flood risk scenario analysis technique[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 56–65. (in Chinese))
- [11] PACHAURI R K, MEYER L A, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report[C]//Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014.
- [12] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. (GUAN Yinghui. Extreme Climate Change and Its Trend Prediction in the Yangze River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese))
- [13] 吴健, 夏军, 曾思栋, 等. CMIP6 全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1): 137–150. (WU Jian, XIA Jun, ZENG Sidong, et al. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(1): 137–150. (in Chinese))
- [14] 连平, 周昆平, 唐建伟, 等. 新时代中国经济发展趋势[J]. 中国经济报告, 2018(1): 30–33. (LIAN Ping, ZHOU Kunping, TANG Jianwei, et al. Economic development trend of China in the new era[J]. China Policy Review, 2018(1): 30–33. (in Chinese))
- [15] DELLINK R, CHATEAU J, LANZI E, et al. Long – term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways [J]. Global Environmental Change, 2017(42): 200–214.
- [16] 赵玉峰, 杨宜勇. 我国中长期人口发展趋势及潜在风险[J]. 宏观经济管理, 2019, 429(8): 11–17, 24. (ZHAO Yufeng, YANG Yiyong. The trends and potential risks of medium and long-term population development in China[J]. Macroeconomic Management, 2019, 429(8): 11–17, 24. (in Chinese))
- [17] 张明波, 陈剑池, 秦智伟, 等. 长江中下游设计洪水分析[J]. 人民长江, 2006(9): 31–34, 111. (ZHANG Mingbo, CHEN Jianchi, QIN Zhiwei, et al. Analysis of design flood in middle and lower reach of the Yangtze River[J]. Yangtze River, 2006(9): 31–34, 111. (in Chinese))
- [18] 张睿, 李爱丽, 喻杉, 等. 长江中下游水工程联合防洪调度研究[C]//中国大坝工程学会 2019 学术年会, 武汉, 2019. (ZHANG Rui, LI Aili, YU Shan, et al. Study on joint flood control operation of water projects in the middle and lower reaches of the Yangtze River[C]//2019 Annual Conference of China National Committee on Large Dams, Wuhan, 2019. (in Chinese))
- [19] 徐照明, 徐兴亚, 李安强, 等. 长江中下游河道冲淤演变的防洪效应[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 366–376. (XU Zhaoming, XU Xingya, LI Anqiang, et al. Flood control effect of the fluvial process in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 366–376. (in Chinese))
- [20] 方春明, 毛继新, 陈绪坚. 三峡工程蓄水运用后荆江三口分流河道冲淤变化模拟[J]. 中国水利水电科学

- 研究院学报, 2007, 5(3): 181-185. (FANG Chunming, MAO Jixin, CHEN Xujian. Simulation of erosion and sedimentation at triple-branches of the Jingjiang River after operation of the Three Georges Project [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(3): 181-185. (in Chinese))
- [21] 江浩, 江炎生, 郑治军, 等. 湖北省洪水风险图成果报告中的关键问题探讨[J]. 人民长江, 2016, 47(14): 11-14, 18. (JIANG Hao, JIANG Yansheng, ZHENG Zhijun, et al. Discussion on key issues in result report of Hubei flood risk map[J]. Yangtze River, 2016, 47(14): 11-14, 18. (in Chinese))
- [22] 刘心愿, 朱勇辉, 姚仕明, 等. 湖泊分蓄洪区洪水风险图编制探讨—以湖北武湖、涨渡湖为例[J]. 人民长江, 2017, 48(14): 9-11, 22. (LIU Xinyuan, ZHU Yonghui, YAO Shiming, et al. Discussion on flood risk mapping for flood diversion and storage area: Case of Wuhu and Zhangduhu Lakes area, Hubei Province[J]. Yangtze River, 2017, 48(14): 9-11, 22. (in Chinese))
- [23] 王艳艳. 不同尺度的洪涝灾害损失评估模式述评[J]. 水利发展研究, 2002, 2(12): 66-69. (WANG Yanyan. Review on flood damage assessment modes of different scale[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(12): 66-69. (in Chinese))

Risk analysis of extraordinary flood scenarios in the middle and lower reaches of the Yangtze River

LI Na^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, WANG Yanyan^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of MWR, Beijing 100038, China)

Abstract: The possibility and uncertainty of occurrence of floods beyond the current flood control engineering system standard of river basin or extraordinary floods will exist for a long time. Under the combined impacts of climate change and socio-economic development in the future, the consequence of extraordinary floods will be more serious. Taking the flood control area of the middle and lower reaches of the Yangtze River as study area, nine scenarios for the 1000-year return period exceeding flood control standard in 2035, 2050 and 2100 are calculated, using scenario analysis, hydrological analysis, flood inundation and impacts analysis methods. Among them, the flood amount in the three periods are increased by 5%, 10% and 15% respectively compared to current situation. According to the analysis results, the affected population in the inundated area in the flood control area of the middle and lower reaches of the Yangtze River will increase from 17.68 million in the base year(2020) to 28.88 million, 35.36 million and 30.65 million respectively, and the economic losses will increase from 1266.9 billion RMB in the base year to 305.33 billion RMB, 525.99 billion RMB and 872.64 billion RMB respectively, under the combined scenarios of future climate change and socio-economic development with 1000-year return period floods in 2035, 2050 and 2100. The affected population and the maximum direct economic loss in the flood inundated area can reach up to 1.52 and 6.89 times the current situation respectively. The existing flood prevention system will be more vulnerable when facing future extraordinary flood scenarios. The analysis results can provide reference for the river basin to formulate long-term sustainable flood control and disaster reduction strategies to cope with the future changing conditions.

Keywords: excessive floods; climate change; scenario analysis; flood risk analysis; the middle and lower reaches of Yangtze River

(责任编辑: 祁伟)