

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.011

# 长江中下游地区洪灾损失率函数构建及 洪涝灾害损失评估

王小杰<sup>1,2</sup>, 夏军强<sup>1</sup>, 李启杰<sup>1</sup>, 周美蓉<sup>1</sup>, 假冬冬<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;  
2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**采用 Spearman 相关系数和随机森林法分析了长江中下游各省市洪灾损失率与不同影响因素指标的相关性以及各指标的重要度,采用指数和乘幂 2 个多元回归函数构建了综合考虑降水、防洪减灾能力、社会经济发展与自然资源影响的洪灾损失率函数,通过对比 2 组函数的拟合结果选择最优函数作为预测模型,估算了 2030—2100 年 5 种共享社会经济路径(SSPs)下洪涝灾害损失。结果表明:长江中下游各省市洪灾损失率与降水总体呈正相关关系,与防洪减灾能力、社会经济发展和自然资源总体呈负相关关系;构建的多元回归函数曲线能较好地拟合洪灾损失率的变化规律,特别是上海、江苏、安徽和江西的经济损失率和死亡人口率函数曲线的拟合精度较高,决定系数大于 0.85;在 1991 年和 1998 年降雨情景下,长江中下游地区未来洪涝经济损失较历史损失呈增加趋势,且最高分别增长 603% 和 572%,受灾人口较历史损失呈减少趋势,且最低分别减少 72% 和 52%;该地区未来在以适应挑战为主的 SSP4 路径下洪涝经济损失和受灾人口数量均最小且呈减少趋势,以经济发展为主的 SSP5 路径下洪涝经济损失最大且呈增加趋势,以区域竞争发展为主的 SSP3 路径下洪涝受灾人口最多且呈先减少后增加趋势。

**关键词:**洪涝灾害;洪灾损失率函数;共享社会经济路径(SSPs);长江中下游地区

**中图分类号:**P429;TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0088-11

**Construction of flood loss rate function and flood loss assessment in middle and lower reaches of the Yangtze River**// WANG Xiaojie<sup>1,2</sup>, XIA Junqiang<sup>1</sup>, LI Qijie<sup>1</sup>, ZHOU Meirong<sup>1</sup>, JIA Dongdong<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The correlation between flood loss rates, different indexes of influencing factors, and important degree of different indexes were quantitatively analyzed using the Spearman's correlation coefficient and random forest methods. Flood loss rate functions for different provinces in middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR) were constructed using exponential and power multiple regression functions, comprehensively considering the impacts of rainfall, disaster prevention and mitigation ability, socio-economic development, and natural resources on the flood disaster. By comparing the fitting results of the two functions, the optimal function was selected as the prediction model, and flood loss of different provinces in MLRYR during the period 2030-2100 under five shared socioeconomic pathways (SSPs) was estimated. The results show that the flood loss rates of different provinces in MLRYR are positively influenced by rainfall, and negatively influenced by socio-economic development, natural resources, and disaster prevention and mitigation ability. The constructed multiple regression function curves can well fit the variation of flood loss rates, especially, the function curves of economic loss rate and death rate for Jiangsu, Anhui, and Jiangxi provinces and Shanghai municipality have high fitting precision, and the determination coefficients are greater than 0.85. Under the rainfall scenarios of 1991 and 1998, the flood economic loss in MLRYR in the future shows an increasing trend compared with the historical losses, with the maximum increasing rates of 603% and 572%, respectively, and the flood-affected population in the future shows a

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51725902,41890823);中英牛顿高级学者基金项目(NSFC52061130219+NAF\1\201156)

**作者简介:**王小杰(1995—),女,博士研究生,主要从事城市洪涝研究。E-mail: wangxiaojie@whu.edu.cn

**通信作者:**夏军强(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

decreasing trend, with the minimum decreasing rates of 72% and 52%, respectively. The flood economic loss and flood-affected population in MLRYR are the least, with decreasing trends under SSP4 that is characterized by adaptation challenges, the flood economic loss is the largest with an increasing trend under SSP5 that is dominated by economic development, and the flood-affected population is the largest with a trend to decrease and then increase under SSP3 that is characterized by regional rivalry.

**Key words:** flood disasters; flood loss rate function; shared socio-economic pathways (SSPs); middle and lower reaches of the Yangtze River

中国是暴雨洪涝灾害频发的国家,每年因洪涝灾害造成严重的经济损失和人员伤亡<sup>[1-2]</sup>。《中国水旱灾害公报》统计数据 displays, 1995—2018 年间全国年均均有 196 座城市、1 980 个县(市)发生洪涝灾害,平均每年因灾死亡 1 677 人,导致直接经济损失 1 662 亿元<sup>[3-4]</sup>。受全球气候变化和城市化发展的双重影响,极端天气频发,洪涝灾害发生的频率和强度正急剧增加<sup>[5-7]</sup>,且随着社会发展,单位面积固定资产增多,洪涝灾害损失呈上升趋势<sup>[8]</sup>。构建洪灾损失函数准确地评估灾害损失,对于科学开展区域防洪减灾和洪涝风险管理十分必要。

洪涝灾害损失受到区域降水、防洪减灾能力、社会经济发展和自然资源等多种因素综合影响,具有多维性和复杂性特点,评估手段形式多样<sup>[9]</sup>。根据历史洪灾统计资料,采用相关分析、回归函数、神经网络等,建立洪灾损失或洪灾损失率与致灾因子(降水或洪水特征)、社会经济发展和防洪减灾措施等因素的函数关系,是国际上广泛采用的洪灾损失评估方法<sup>[5,10-11]</sup>。例如:Peduzzi 等<sup>[13]</sup>在对全球洪灾死亡人口风险进行评价时,构建了死亡人口与洪水频次、暴露人口和脆弱性指标的多元回归模型;Brazdovai 等<sup>[14]</sup>针对中欧地区洪涝灾害,构建了死亡人口与财产损失、洪水管理因素和洪水预警因素的多元回归模型;王志军等<sup>[15]</sup>基于支持向量机法,构建了人口损失率与溃坝洪水严重程度、救援能力、警报时间、溃坝发生时间及风险人口对溃坝洪水严重性理解程度 5 个变量的回归模型;Jonkman 等<sup>[16]</sup>将生命损失与洪水特征以及疏散和避难的可能性联系起来,构建了人口死亡率函数。目前已有研究主要集中在以洪灾淹没水深为自变量、财产损失率或人口损失率为因变量构建洪灾损失率函数,适用于具体的洪涝灾害事件过程或较小的研究区域。对于大尺度范围受灾害形成机理的复杂性和数据获取的限制性,目前相关研究多关注单一指标<sup>[17-18]</sup>。例如:陈敏建等<sup>[19]</sup>分析了洪涝损失呈 S 形曲线,通过数学推导构建了基于双曲正切函数的洪涝损失模型,将汛期降水量作为自变量引入模型,构建了长江三角洲洪涝损失函数;李超超等<sup>[20]</sup>以降水重现期为自变量,构建了具有物理意义的 3 参数洪涝灾害损失 S

形曲线。洪涝灾害损失是由多种影响因素相互作用而形成的,因此有必要构建综合考虑不同影响因素的洪灾损失多元回归曲线,为防洪减灾措施的制定提供参考依据。

本文采用 Spearman 相关系数和随机森林法分析了长江中下游各省市洪灾损失率与不同影响因素指标的相关性以及各指标重要度,选取各影响因素中重要度最高的指标作为自变量,采用指数和乘幂 2 个多元回归函数,构建了综合考虑降水、防洪减灾能力、社会经济发展与自然资源影响的洪灾损失率函数,并对 2030—2100 年 5 种共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)下洪涝灾害损失进行预估。研究成果有助于合理把握长江中下游地区洪涝风险演变趋势,为区域防洪减灾和风险管理提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

长江中下游地区(图 1)位于我国中东部,地跨长江中游 3 省(湖北、湖南和江西)和长江下游 3 省 1 市(安徽、江苏、浙江和上海),是我国人口资产密集、经济最发达、河网密度最大的地区之一。据统计,2020 年该地区国内生产总值约占全国的 35%,人口约占全国的 29%。长江中下游地区属亚热带季风气候,研究区年平均气温为 14 ~ 18℃,年降水量为 1 000 ~ 1 500 mm,是中国暴雨多发区和暴雨强度最大的区域之一,也是洪涝灾害威胁最严重的地区<sup>[4]</sup>。

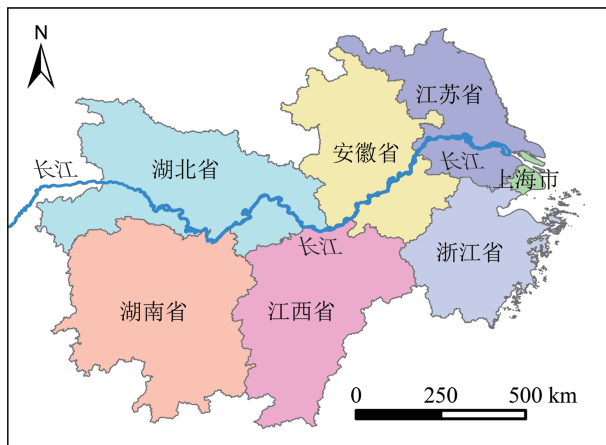


图 1 研究区区划

Fig. 1 Sketch of study area

长江中下游各省市 1990—2020 年洪涝灾害损失、日降水、人口、地区生产总值(GDP)、城市化率、建城区面积、耕地面积、森林覆盖率、堤防长度、水利建设防洪投资(以下简称“水利防洪投资”)、水利基本建设投资(以下简称“水利建设投资”)和排水管道长度等数据参考文献[4]。长江中下游各省市 2030—2100 年社会经济预估数据来源于姜彤等<sup>[21-22]</sup> 开源发布的中国人口和经济预估数据集(<https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.01683>),格点尺度数据空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,土地利用预估数据来源于政府间气候变化专门委员会(IPCC)排放情景特别报告(SRES)([http://sres.ciesin.org/final\\_data.html](http://sres.ciesin.org/final_data.html))。

对于相同强度下的暴雨,洪涝灾害损失随时间和区域变化很大,而洪灾损失率能够直接体现研究区域受影响的程度,且由历史灾情预测未来灾害损失时,已率定的洪灾损失率参数可推广使用<sup>[23]</sup>。因此,引入洪灾损失率来表征洪涝灾害的影响程度,包括经济损失率  $E$ (经济损失与地区 GDP 之比)、受灾人口率  $P$ (受灾人口与总人口之比)和死亡人口率  $D$ (死亡人口与总人口之比)<sup>[4]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 洪灾损失率函数构建

洪涝灾害损失受到多种因素综合影响,损失率关系曲线可以根据历史洪涝灾害数据,利用多元回归分析方法拟合得出<sup>[19]</sup>。洪灾损失率曲线常用指数和乘幂 2 个多元回归函数<sup>[12-15]</sup>。本文采用不同类型的多元回归函数拟合洪灾损失率分布,选择拟合效果最佳的曲线作为损失率函数,并给出相应的拟合精度。

乘幂和指数函数表达式分别为

$$y = kx_1^{\alpha_1}x_2^{\alpha_2}x_3^{\alpha_3}x_4^{\alpha_4} \quad (1)$$

$$y = k\exp(\alpha_1x_1 + \alpha_2x_2 + \alpha_3x_3 + \alpha_4x_4) \quad (2)$$

式中: $y$  为洪灾损失率,包括经济损失率、受灾人口率和死亡人口率; $k$  为常数; $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为降水指标、防洪减灾能力指标、社会经济发展指标和自然资源指标; $\alpha_i$  为  $x_i$  的指数或系数。

### 2.2 指标选取

洪涝灾害损失是气候变化、社会经济发展、防洪减灾能力和自然资源环境等多种影响因素相互作用的结果。降水是洪涝灾害的主要致灾因素,包括降水量和降雨强度;防洪减灾能力的提升可有效降低洪涝灾情,堤防长度、水利建设投资、水利防洪投资、排水管道长度是反映防洪减灾能力的主要指标;人口、GDP、城市化率和建城区面积是反映社会经济发

展的常用指标;而耕地面积和森林覆盖率是影响洪涝灾害常用的自然资源指标。计算洪灾损失率时已考虑了人口和 GDP 的影响,故指标选取时不再考虑。

采用 Spearman 相关系数<sup>[24]</sup> 分析洪灾损失率与不同影响因素指标的相关性,剔除各影响因素中相关性较小的指标,进行指标初步筛选,需要注意的是指标初步筛选时各影响因素中至少要保留两项指标。在此基础上,采用随机森林法<sup>[25-26]</sup> 计算不同指标的重要度,对各指标重要度进行排序,选取各影响因素重要度最高的指标,作为洪灾损失率函数的自变量。

### 2.3 未来情景设定

采用 IPCC 发布的 5 种 SSPs<sup>[27]</sup>,对长江中下游各省市 2030—2100 年社会经济数据(人口、城市化率和 GDP)进行预估。其中,SSP1 为可持续发展,政府和机构致力于实现发展目标和解决问题,面临较低的气候变化减缓与适应挑战;SSP2 为中度发展,维持当前的发展态势继续发展,面临中等的气候变化减缓与适应挑战;SSP3 为区域竞争发展,区域差异特征明显,发展水平较低,依赖化石能源,面临高的气候变化减缓与适应挑战;SSP4 为不均衡发展,国家内部和国家间高度不平等,以适应挑战为主,面临较低的气候变化减缓挑战;SSP5 为常规发展,强调传统的以经济发展为导向的方式,面临较高的气候变化减缓挑战<sup>[21-22]</sup>。此外,本文假设建成区面积和城市化率同速率增长,根据不同 SSPs 路径下城市化率推求得到建成区面积。对长江中下游 6 省 1 市 GDP 与水利防洪投资和水利建设投资的相关性进行分析可知,GDP 与水利防洪投资相关系数为 0.81~0.95,与水利建设投资相关系数为 0.87~0.98,且在 0.01 显著性水平下显著相关。因此,基于 5 种 SSPs 路径下的 GDP 数据,采用 GDP 与水利防洪投资和水利建设投资的线性函数关系确定长江中下游各省市 2030—2100 年水利防洪投资和水利建设投资。本文假设堤防长度与建成区面积和耕地面积的总和同速率增长,根据不同 SSPs 路径下建成区面积和耕地面积的总和推求得到堤防长度。

采用 SRES 中提供的 4 种情景(B1、B2、A2 和 A1FI)数据降尺度分析<sup>[28]</sup>,确定长江中下游各省市 2030—2100 年土地利用。其中,B1 情景相当于 SSP1,B2 情景相当于 SSP2,A2 情景相当于 SSP3 或 SSP4,A1FI 情景相当于 SSP5<sup>[27]</sup>。采用线性降尺度方法,将 SRES 中提供的 1990—2100 年亚洲土地利用数据先从亚洲尺度降到国家尺度,再由国家尺度降到省市尺度。线性降尺度表达式<sup>[28]</sup> 为

$$r_s = \frac{\ln(A_{s_t}/A_{s_0})}{Y_t - Y_0} \quad (3)$$

$$A_{H_t} = A_{H_0} \exp[r_s(Y_t - Y_0)] \quad (4)$$

式中： $Y_0$  为基准年； $r_s$  为基准年到  $Y_t$  年亚洲耕地面积增长率； $A_{s_0}$  为基准年亚洲实测耕地面积； $A_{s_t}$  为  $Y_t$  年亚洲预测耕地面积； $A_{H_0}$  为基准年国内实测耕地面积； $A_{H_t}$  为  $Y_t$  年国内预测耕地面积。

以 2050 年长江中下游地区为例，5 种 SSPs 路径下人口、GDP、城市化率、建成区面积、水利建设投资、水利防洪投资和耕地面积的预测值如表 1 所示。

### 3 结果与分析

#### 3.1 洪灾损失率函数指标选取

##### 3.1.1 相关性分析

采用 Spearman 相关系数  $r$  分析长江中下游各

省市洪灾损失率和不同指标的相关性，结果如表 2 所示。取显著性水平  $\alpha$  为 0.10 和 0.05，查表得  $r$  临界值分别为 0.30 和 0.36。可以看出，长江中下游各省市洪灾损失率与降水指标总体呈正相关关系，而与防洪减灾能力指标、社会经济发展指标和自然资源指标总体呈负相关关系。根据洪灾损失率与不同指标的相关系数显著性检验进行指标初筛，如果各省市洪灾损失率与同一影响因素中的不同指标相关性均显著或均不显著，则不进行剔除，否则剔除相关性不显著的指标。由于自然资源和社会经济发展仅包含了两个指标，则不进行指标初步筛选。对于防洪减灾能力指标来说，上海和江苏洪灾损失率仅与堤防长度呈不显著性相关关系，因此两省剔除堤防长度；安徽（除受灾人口率）、浙江和湖南洪灾损失率与防洪减灾能力 4 个指标均呈显著性负相关关系，且安徽受灾人口率与 4 个指标均呈不显

表 1 2050 年不同 SSPs 路径下长江中下游地区社会经济数据预测

Table 1 Predictions of socio-economic data in middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR) under different SSPs in 2050

SSPs	人口/万人	GDP/亿元	城市化率/%	建成区面积/km <sup>2</sup>	水利建设投资/亿元	水利防洪投资/亿元	耕地面积/km <sup>2</sup>
SSP1	38090.1	703032	77.4	16612.9	5088.9	2134.0	234236
SSP2	39853.2	677156	76.9	16545.7	4868.9	2043.8	253646
SSP3	41515.5	558295	66.3	14471.7	3992.5	1677.6	258615
SSP4	36773.4	666598	77.9	16735.2	4823.9	2024.6	
SSP5	38174.1	789189	84.9	18186.7	5740.0	2401.5	217811

表 2 洪灾损失率与不同指标的相关性分析

Table 2 Correlations between flood loss rates and different indexes

省市	洪灾损失率	$r$													
		耕地面积	森林覆盖率	城市化率	建成区面积	堤防长度	水利防洪投资	水利建设投资	排水管道长度	年降水量	年暴雨量	汛期降水量	年降雨强度	年暴雨强度	汛期降雨强度
上海	经济损失率	0.477	-0.508	-0.282	-0.475	-0.042	-0.496	-0.559	-0.464	0.022	0.426	0.138	0.214	0.120	0.359
	受灾人口率	0.420	-0.395	-0.204	-0.396	-0.242	-0.415	-0.450	-0.378	0.088	0.447	0.167	0.164	0.115	0.308
	死亡人口率	0.466	-0.451	-0.314	-0.523	-0.101	-0.518	-0.521	-0.517	-0.321	-0.059	-0.245	-0.060	-0.174	0.033
江苏	经济损失率	0.233	-0.716	-0.742	-0.721	0.172	-0.740	-0.715	-0.743	0.365	0.376	0.234	0.143	-0.069	0.195
	受灾人口率	0.252	-0.627	-0.627	-0.598	0.062	-0.635	-0.614	-0.629	0.417	0.415	0.248	0.197	0.043	0.296
	死亡人口率	0.167	-0.834	-0.843	-0.826	0.181	-0.830	-0.821	-0.842	0.167	0.184	-0.020	0.030	-0.039	0.128
浙江	经济损失率	-0.121	-0.770	-0.803	-0.805	-0.803	-0.757	-0.805	-0.803	0.072	0.347	-0.029	-0.014	0.091	0.143
	受灾人口率	-0.102	-0.624	-0.661	-0.654	-0.661	-0.691	-0.671	-0.665	-0.060	0.156	-0.203	-0.023	0.106	0.102
	死亡人口率	-0.335	-0.741	-0.781	-0.784	-0.781	-0.686	-0.789	-0.778	0.169	0.279	0.100	-0.021	-0.080	0.085
安徽	经济损失率	-0.100	-0.542	-0.518	-0.510	-0.517	-0.552	-0.522	-0.526	0.415	0.554	0.472	0.535	0.060	0.471
	受灾人口率	-0.241	-0.099	-0.084	-0.078	-0.090	-0.160	-0.118	-0.096	0.631	0.779	0.688	0.750	0.249	0.703
	死亡人口率	-0.121	-0.568	-0.549	-0.542	-0.548	-0.551	-0.547	-0.559	0.244	0.430	0.324	0.455	-0.042	0.389
江西	经济损失率	-0.393	-0.532	-0.497	-0.493	-0.362	-0.510	-0.496	-0.497	0.362	0.329	0.344	0.340	-0.157	0.346
	受灾人口率	-0.250	-0.376	-0.347	-0.329	-0.275	-0.394	-0.375	-0.347	0.408	0.379	0.376	0.442	0.073	0.431
	死亡人口率	-0.453	-0.710	-0.709	-0.682	-0.545	-0.725	-0.749	-0.709	0.209	0.116	0.184	0.137	-0.004	0.121
湖北	经济损失率	-0.226	-0.640	-0.610	-0.548	-0.701	-0.597	-0.604	-0.598	0.438	0.309	0.375	0.331	0.156	0.406
	受灾人口率	-0.282	-0.288	-0.222	-0.206	-0.346	-0.302	-0.235	-0.209	0.608	0.487	0.565	0.559	0.323	0.649
	死亡人口率	-0.333	-0.718	-0.683	-0.617	-0.763	-0.678	-0.666	-0.655	0.339	0.231	0.290	0.198	0.247	0.303
湖南	经济损失率	-0.764	-0.714	-0.715	-0.706	-0.719	-0.740	-0.710	-0.692	0.254	0.194	0.265	0.243	0.150	0.229
	受灾人口率	-0.669	-0.593	-0.578	-0.580	-0.616	-0.637	-0.600	-0.572	0.194	0.218	0.241	0.315	0.256	0.321
	死亡人口率	-0.801	-0.859	-0.869	-0.867	-0.879	-0.805	-0.859	-0.856	0.039	-0.019	0.074	0.042	0.113	0.044

著性负相关关系,因此3省无指标剔除;江西和湖北洪灾损失率(除受灾人口率)与防洪减灾能力4个指标呈显著性负相关关系,且湖北受灾人口率仅与水利建设投资和排水管道长度呈不显著性相关关系,而江西受灾人口率仅与堤防长度呈不显著性相关关系,因此对于受灾人口率,两省分别剔除水利建设投资、排水管道长度和堤防长度。在降水指标方面,筛选出与洪灾损失率正相关关系最高的降水量和雨强进行重要度分析(如上海为年暴雨量和汛期降雨强度),且两变量相关系数相近则均保留。

### 3.1.2 重要度分析

经过相关系数筛选后,采用随机森林法分析长江中下游各省市洪灾损失率指标的重要度,结果如图2所示。从自然资源、社会经济发展、防洪减灾能力和降水因素中各选取重要度最高的指标进行分析。在自然资源方面,长江中下游各省市洪灾损失

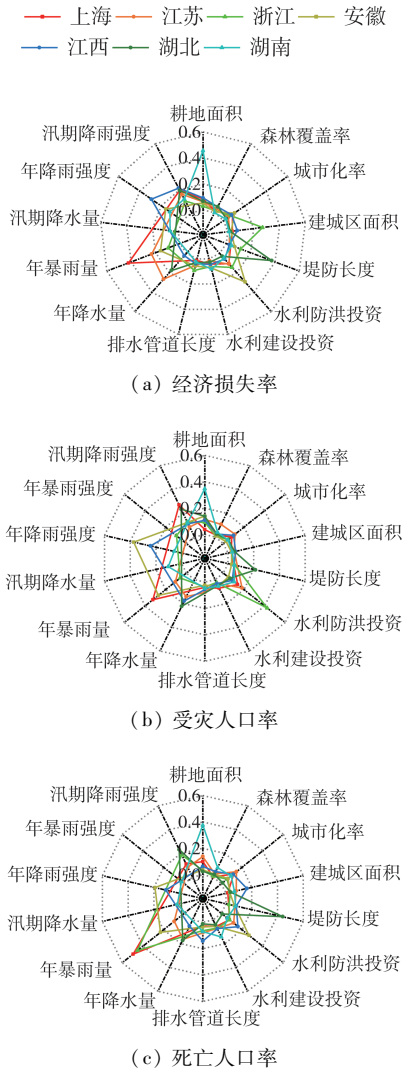


图2 洪灾损失率指标的重要度

Fig.2 Importance degrees of different indexes to flood loss rates

率均受耕地面积影响最大。在社会经济发展指标方面,上海、江苏和湖南洪灾损失率均受城市化率影响最大,而浙江经济损失率、安徽受灾人口率、江西死亡人口率、湖北受灾人口率和死亡人口率则受建成区面积影响最大。在防洪减灾能力指标方面,除湖北洪灾损失率受堤防长度影响最大外,其余省市均受水利防洪投资或水利建设投资影响最大。在降水指标方面,经济损失率主要受暴雨量和汛期降雨强度影响,受灾人口率主要受降雨强度影响,死亡人口率则主要受暴雨量影响;洪灾损失率在上海受暴雨量影响最大,在江苏受年降水量影响最大,在江西受年降雨强度影响最大,而在湖北则受汛期降雨强度影响最大。

### 3.2 洪灾损失率函数构建

以各影响因素中重要度最高的指标作为自变量,采用指数和乘幂2个多元回归函数拟合1990—2020年长江中下游各省市洪灾损失率分布,对比曲线拟合情况,选择拟合效果最佳的曲线作为损失率函数,结果如表3所示。本文采用决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)两个指标来评价函数曲线拟合的优劣, $R^2$ 越接近1、RMSE越接近0,函数对样本的拟合效果越好。从表3可以看出,不同地区和不同洪灾损失率选取的函数类型不同。对于经济损失率

表3 长江中下游各省市洪灾损失率函数

Table 3 Flood loss rate functions for different provinces in MLRYR

省市	洪灾损失率函数
上海	$E = 200.8A_C^{0.27}R_U^{-6.30}I_F^{-0.28}R_S^{2.91}$
	$P = 2.78 \times 10^{14}A_C^{-5.55}R_U^{-3.73}I_F^{-1.16}R_S^{3.75}$
	$D = 1.82 \times 10^{-42}\exp(-0.03A_C + 0.27R_U - 6.44 \times 10^{-5}I_F + 0.16R_S)$
江苏	$E = 5.63 \times 10^{-19}A_C^{-1.04}R_U^{-1.00}I_F^{-0.38}R_A^{7.59}$
	$P = \exp(-8.91 \times 10^{-4}A_C + 0.006R_U - 2.00 \times 10^{-6}I_F + 0.002R_A)$
	$D = 6.95 \times 10^{-32}A_C^{6.69}R_U^{-3.37}I_F^{-0.46}R_A^{2.46}$
浙江	$E = 6 \times 10^{-4}A_C^{-0.60}A_U^{-1.72}I_F^{-0.05}R_{ID}^{7.98}$
	$P = 0.048\exp(-5.83 \times 10^{-4}A_C + 0.002R_U - 8.29 \times 10^{-7}I_F + 0.21R_{ID})$
	$D = 469.35\exp(-0.012A_C - 0.068R_U - 4.86 \times 10^{-6}I_F + 0.011R_S)$
安徽	$E = 8.01 \times 10^{-10}A_C^{0.01}R_U^{-1.50}I_F^{-0.26}R_S^{4.28}$
	$P = 1.00 \times 10^{-4}A_C^{-0.71}A_U^{0.91}I_W^{-0.40}R_{IA}^{5.20}$
	$D = 1.79 \times 10^{-16}A_C^{1.59}R_U^{-0.97}I_F^{-0.69}R_S^{3.40}$
江西	$E = 6.8 \times 10^{-13}A_C^{-0.27}R_U^{-0.005}I_F^{-0.71}R_{IA}^{14.17}$
	$P = 1.21 \times 10^{-4}A_C^{-0.62}R_U^{0.31}I_F^{-0.34}R_{IA}^{6.18}$
	$D = 2.18 \times 10^{-8}A_C^{-2.14}A_U^{0.47}I_F^{-0.86}R_{IA}^{11.24}$
湖北	$E = 0.02A_C^{3.61}R_U^{-2.10}L_E^{-4.30}R_{ID}^{7.37}$
	$P = 4.46A_C^{2.00}A_U^{-0.66}L_E^{-2.90}R_{ID}^{5.16}$
	$D = 2.95 \times 10^{11}A_C^{6.67}A_U^{-0.95}L_E^{-12.08}R_{ID}^{10.66}$
湖南	$E = 7.01 \times 10^5A_C^{-2.85}R_U^{-1.86}I_W^{-0.0001}R_{ID}^{5.31}$
	$P = 0.25\exp(-8.43 \times 10^{-4}A_C + 0.02R_U - 1.21 \times 10^{-6}I_F + 0.21R_{ID})$
	$D = 0.036\exp(-0.004A_C + 0.10R_U - 1.39 \times 10^{-6}I_W + 0.021R_{IS})$

注: $A_C$ 为耕地面积, $10^3 \text{ hm}^2$ ;  $R_U$ 为城市化率,%;  $A_U$ 为建成区面积, $\text{km}^2$ ;  $I_F$ 为水利防洪投资,万元;  $I_W$ 为水利建设投资,万元;  $L_E$ 为堤防长度,km;  $R_A$ 为年降水量,mm;  $R_S$ 为年暴雨量,mm;  $R_{IA}$ 为年降雨强度,mm/d;  $R_{IS}$ 为年暴雨强度,mm/d;  $R_{ID}$ 为汛期降雨强度,mm/d。



来说,乘幂函数的拟合效果较好。长江中下游各省市经济损失率多元回归函数拟合的  $R^2 \geq 0.51$ , RMSE 最大值为 0.032,表明函数曲线与实际数据拟合的效果较好,特别是上海、江苏、安徽和江西,函数拟合的  $R^2 > 0.90$ 。对于受灾人口率来说,上海、安徽、江西和湖北乘幂函数的拟合效果较好;而江苏、浙江和湖南指数函数的拟合效果较好。长江中下游各省市受灾人口率多元回归函数拟合的  $R^2 \geq 0.51$ , RMSE 最大值为 0.121,说明函数曲线与实际数据拟合的效果较好,特别是上海、江苏和湖南,函数拟合的  $R^2 \geq 0.70$ 。对于死亡人口率来说,上海、浙江和湖南指数函数的拟合效果较好;而江苏、安徽、江西和湖北乘幂函数的拟合效果较好。长江中下游各省市死亡人口率多元回归函数拟合的  $R^2 \geq 0.64$ ,均方根误差 RMSE 最大值为  $1.85 \times 10^{-6}$ ,说明函数曲线与实际数据拟合的效果较好,特别是江苏、浙江、安徽和江西函数拟合的  $R^2 > 0.90$ 。此外,由洪灾损失率函数可知,长江中下游各省市洪涝经济损失率、受灾人口率和死亡人口率与降水指标均呈正相关关系,而与防洪减灾能力指标均呈负相关关系,说明降水越大洪涝灾害越严重,防洪减灾能力越强则洪涝灾害越轻。

图 3~5 给出了长江中下游各省市 1990—2020 年洪灾损失率实际统计值和最佳函数拟合曲线。可以看出,长江中下游各省市洪涝经济损失率、受灾人口率和死亡人口率函数拟合曲线与实际统计值变化趋势较为一致,特别是上海、江苏、安徽、江西经济损失率和上海、江苏、浙江、安徽、江西死亡人口率的计算值与实际值分布基本一致,函数曲线拟合的  $R^2 > 0.85$ 。个别计算值与实际统计值偏离较大,影响了评估精度,如上海 2005 年受灾人口率,其原因是上海 2005 年发生了大台风,导致受灾人口较多。尽管如此,函数曲线拟合的  $R^2 > 0.50$ ,反映出计算值的偏差仍在合理范围之内。对于大尺度区域洪灾损失评估而言,其精度满足“量级不错,趋势一致,分布合理”,即符合要求<sup>[19]</sup>,表明本文所构建的多元回归函数能较好地拟合长江中下游各省市洪灾损失率的变化规律。此外,1990—2020 年长江中下游各省市洪涝经济损失率、受灾人口率和死亡人口率总体呈下降趋势,且在 20 世纪 90 年代各省市洪涝经济损失率、受灾人口率和死亡人口率均最大,在 21 世纪 10 年代均最小,特别是死亡人口率在 2010 年以后基本接近于 0。长江中游湖北、湖南和江西洪灾损失率在 1996 年和 1998 年较大;下游安徽、江苏和上海洪灾损失率在 1991 年较大,浙江则在 1994 年较大。总的来说,长江中下游地区在 20 世纪 90 年代发生了

严重的洪涝灾情,且中游地区在 1996 和 1998 年受灾较重,下游地区在 1991 年受灾较重。

### 3.3 未来洪灾损失评估

长江中下游地区在 20 世纪 90 年代发生了严重的暴雨洪涝,中游地区在 1998 年受灾最重,下游地区在 1991 年受灾最重。因此,在对未来洪涝灾害损失进行预估时,降水数据分别采用 1991 年和 1998 年的降水量和降雨强度。联合未来不同社会经济情景下的防洪减灾、社会经济和自然资源数据,采用表 3 建立的多元回归损失率函数,对长江中下游各省市 2030—2100 年不同情景下洪涝灾害损失进行预估。

图 6 和图 7 分别为 2030—2100 年 5 种 SSPs 路径下长江中下游地区洪涝经济损失和受灾人口。可以看出,在不同 SSPs 路径下,长江中下游地区洪涝经济损失和受灾人口变化差异较为显著。洪涝经济损失在 SSP1 路径下呈先增加后减少趋势,在 SSP2 和 SSP3 路径下呈波动增加趋势,在 SSP4 路径下呈波动减少趋势,在 SSP5 路径下呈增加趋势。此外,SSP4 路径下洪涝经济损失最小,SSP5 路径下洪涝经济损失最大,这可能是因为以经济发展为主的 SSP5 路径下对自然生态环境治理未能采取有效措施,且快速的经济增长和较高的 GDP,使得遭遇洪涝灾害时经济损失较大<sup>[21,27]</sup>。该地区 2100 年 SSP5 路径下洪涝经济损失最大,分别为 4 618 亿元(1991 年降雨情景)和 8 392 亿元(1998 年降雨情景),与 1991 年和 1998 年实际经济损失相比,分别增加了 603% 和 572%;2100 年 SSP4 路径下洪涝经济损失最小,分别为 1 659 亿元(1991 年降雨情景)和 2 152 亿元(1998 年降雨情景),与实际经济损失相比,分别增加了 153% 和 72% (图 6)。洪涝受灾人口在 SSP1、SSP2、SSP4 和 SSP5 路径下均呈减少趋势,在 SSP3 路径下呈现先减少后增加趋势,且 SSP4 路径下洪涝受灾人口最少,SSP3 路径下洪涝受灾人口最多,这可能是因为以区域竞争发展为主的 SSP3 路径下生育率最高、总人口最多,且技术变革缓慢、居民生活水平较差、社会经济发展水平较低,使大部分群体容易受到气候变化影响且适应能力低<sup>[22,27]</sup>。该地区 2100 年在 SSP4 路径下洪涝受灾人口最少,分别为 1 274 万人(1991 年降雨情景)和 1 903 万人(1998 年降雨情景),与 1991 年和 1998 年实际受灾人口相比,分别减少了 89% 和 82%;2030 年在 SSP3 路径下洪涝受灾人口最多,分别为 3 195 万人(1991 年降雨情景)和 4 996 万人(1998 年降雨情景),与实际受灾人口对比,分别减少了 72% 和 52% (图 7)。

○ 实际值 — 计算值

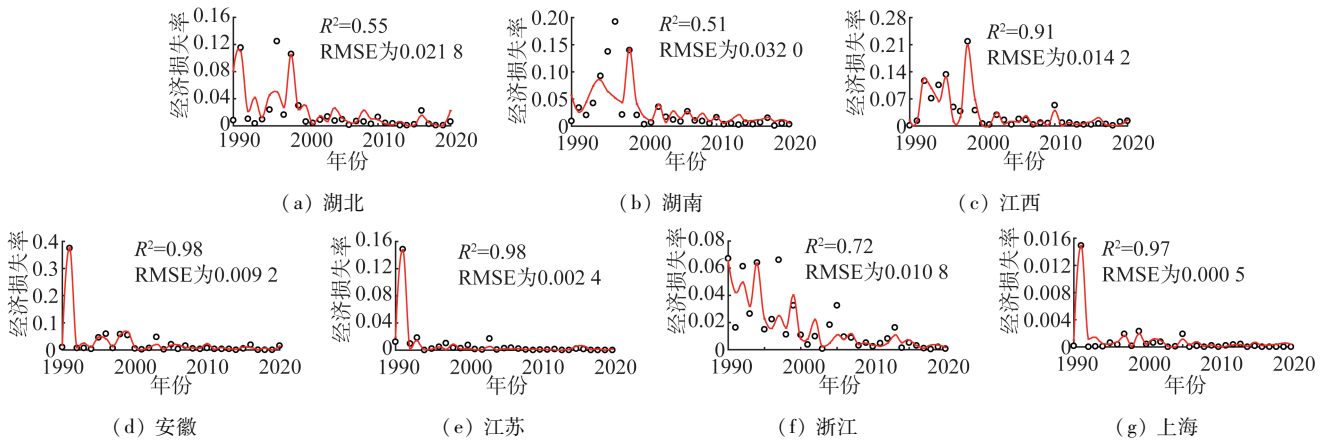


图3 长江中下游各省市洪涝经济损失率实际统计值和拟合曲线

Fig. 3 Statistical values and fitting curves of flood economic loss rate for different provinces in MLRYR

○ 实际值 — 计算值

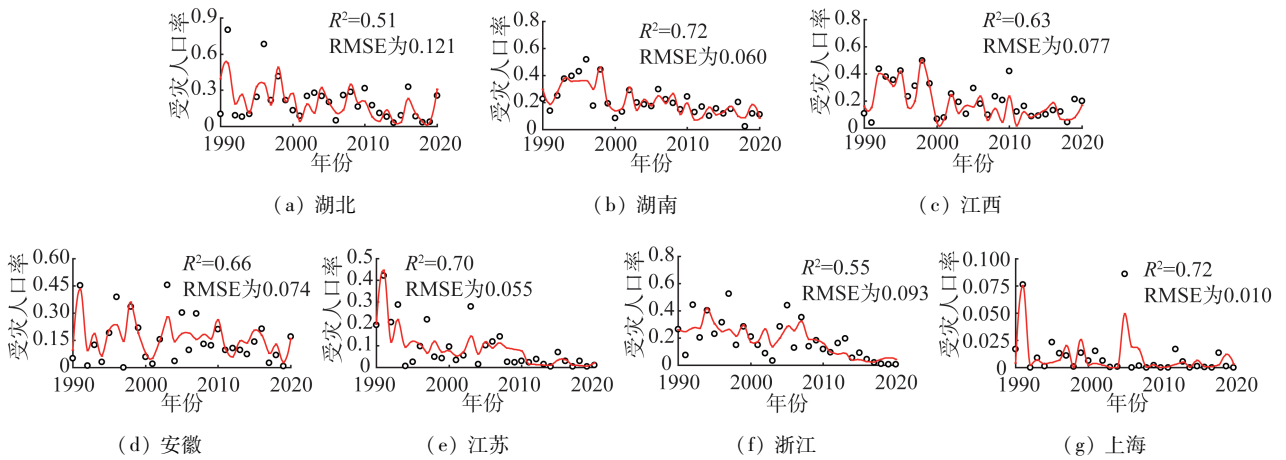


图4 长江中下游各省市洪涝受灾人口率实际统计值和拟合曲线

Fig. 4 Statistical values and fitting curves of flood-affected population rate for different provinces in MLRYR

○ 实际值 — 计算值

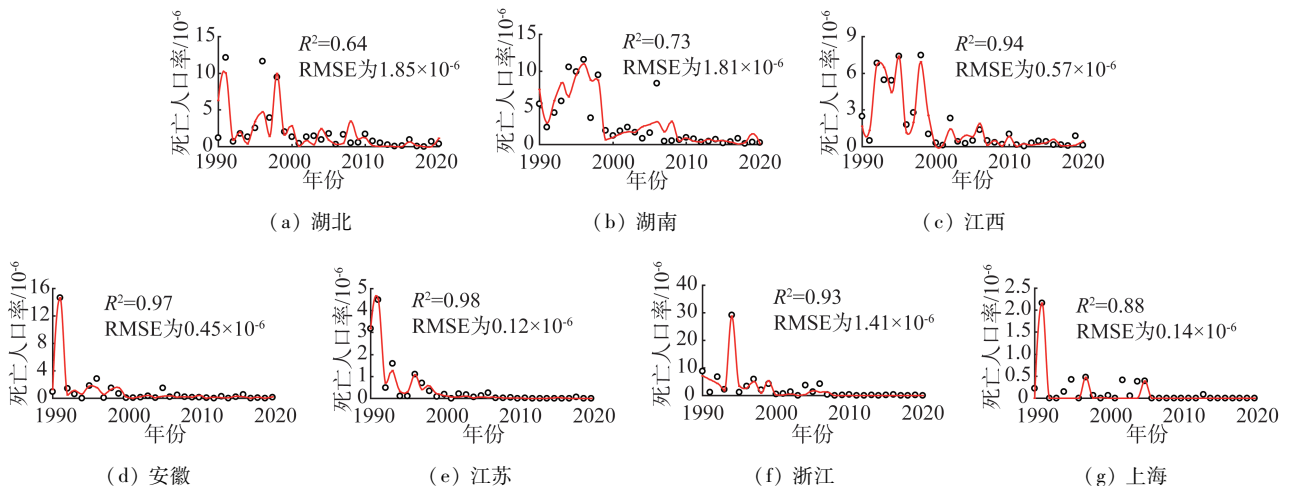


图5 长江中下游各省市洪涝死亡人口率实际统计值和拟合曲线

Fig. 5 Statistical values and fitting curves of flood-induced death rate for different provinces in MLRYR

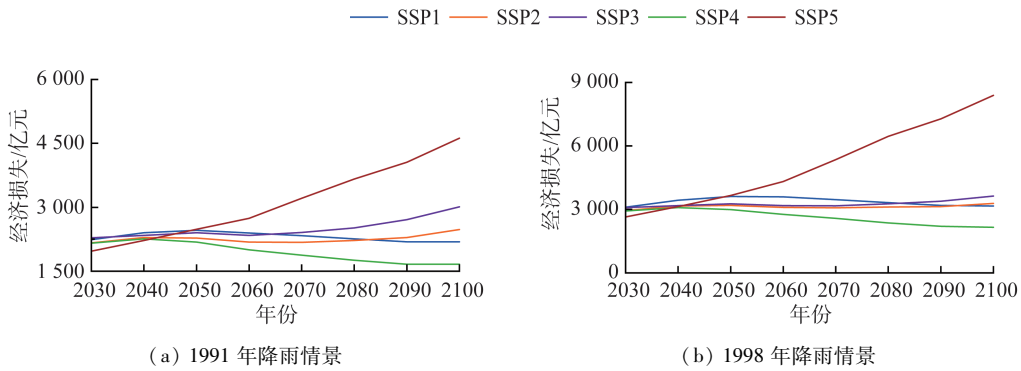


图 6 2030—2100 年 5 种 SSPs 路径下长江中下游地区洪涝经济损失

Fig. 6 Flood economic loss in MLRYR during period 2030-2100 under five SSPs

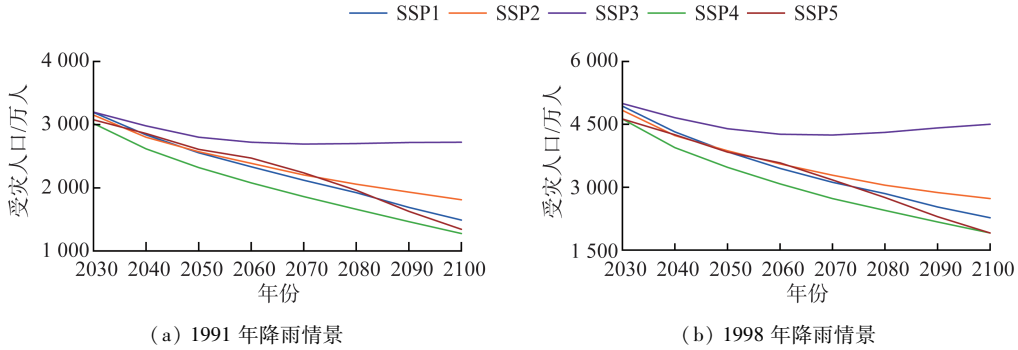


图 7 2030—2100 年 5 种 SSPs 路径下长江中下游地区洪涝受灾人口

Fig. 7 Flood-affected population in MLRYR during period 2030-2100 under five SSPs

将同一降雨情景下 2030—2100 年长江中下游各省市洪涝经济损失与历史实际数据进行对比,分析洪涝经济损失增长倍数,结果如图 8 所示。可以看出,在 1991 年和 1998 年降雨情景下,长江中下游各省市洪涝经济损失增长倍数大于 0,且下游地区经济损失增长倍数总体大于中游地区,表明随着经

济发展、社会财富积累,未来洪涝经济损失总体呈增加趋势,且经济越发达的省市遭遇洪涝时经济损失将更严重。其中,浙江和江苏两省洪涝经济损失增长倍数最大,这可能是因为两省 GDP 总量增长较快,浙江省 2030—2100 年 GDP 相较于 1991 年和 1998 年将分别增长 88 ~ 382 倍和 19 ~ 82 倍,江苏

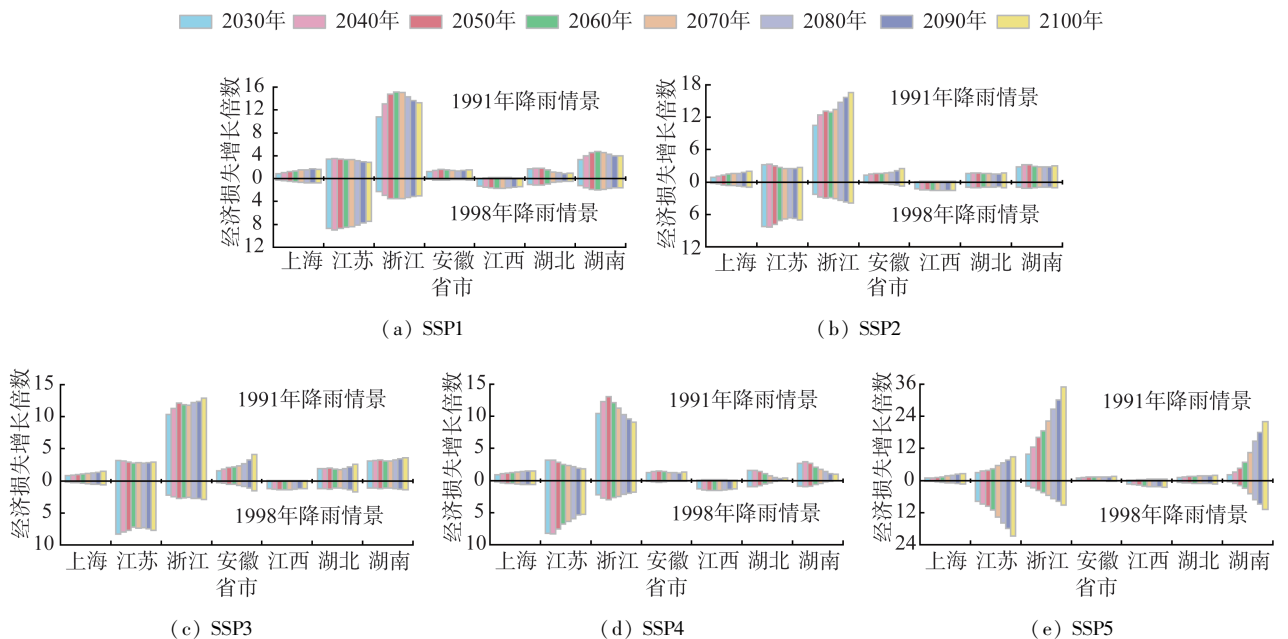


图 8 2030—2100 年 5 种 SSPs 路径下长江中下游各省市洪涝经济损失变化

Fig. 8 Variations of flood economic loss for different provinces in MLRYR during period 2030-2100 under five SSPs



省则将分别增长 104 ~ 286 倍和 23 ~ 64 倍, GDP 增长倍数大于洪涝经济损失增长倍数, 表明未来洪涝经济损失率呈下降趋势。长江中下游各省市洪涝经济损失在 SSP1 ~ 4 路径间相差较小, SSP5 路径与其他路径洪涝经济损失差异在 2030 年较小, 2050 年后差异逐渐显现, 到 2100 年差异较大。这可能是因为 2030 年不同 SSPs 路径下 GDP 相差不大, 且 SSP1 ~ 4 路径下 GDP 增速随时间逐渐放缓, SSP5 路径下则保持较快增长, 至 21 世纪中后期 GDP 差异较大, 导致遭遇洪涝时经济损失差异也较大<sup>[21]</sup>。

将同一降雨情景下 2030—2100 年长江中下游各省市洪涝受灾人口与历史实际数据进行对比, 分析洪涝受灾人口减少率, 结果如图 9 所示。可以看出, 长江中下游各省市洪涝受灾人口减少率在不同 SSPs 路径下相差较小, 且变化趋势也比较相似。在 1991 年和 1998 年降雨情景下, 长江中下游各省市洪涝受灾人口减少率大于 0, 且下游地区受灾人口减少率总体大于中游地区, 表明随着社会经济的发展, 防洪减灾能力提高, 未来洪涝受灾人口呈减少趋势, 且经济越发达的省市具有更强的防洪治涝能力。

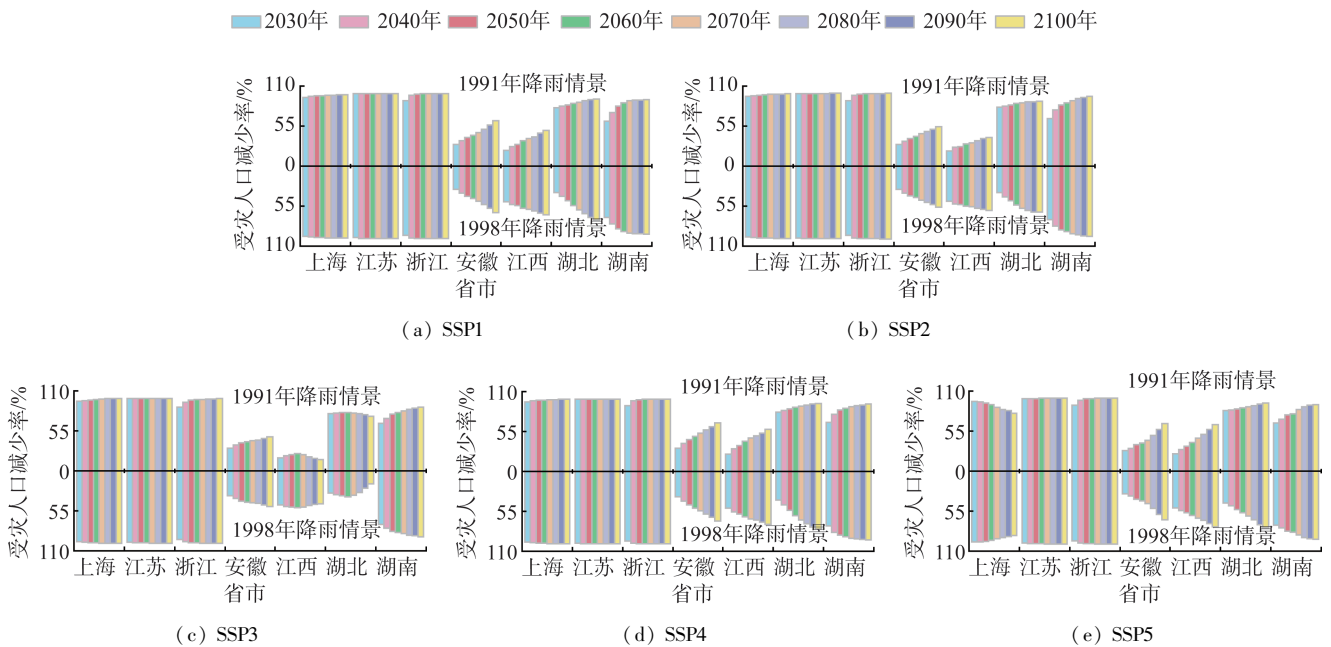


图 9 2030—2100 年 5 种 SSPs 路径下长江中下游各省市洪涝受灾人口变化

Fig. 9 Variations of flood-affected population for different provinces in MLRYR during period 2030-2100 under five SSPs

## 4 结论

**a.** 1990—2020 年长江中下游各省市洪灾损失率总体呈下降趋势。长江中下游各省市洪灾损失率与降水总体呈正相关关系, 而与防洪减灾能力、社会经济发展和自然资源总体呈负相关关系。耕地面积、城市化率和水利防洪投资分别是影响洪灾损失率较为重要的自然资源、社会经济发展和防洪减灾能力指标。

**b.** 考虑降水、防洪减灾能力、社会经济发展和自然资源影响构建的长江中下游各省市洪灾损失率多元回归函数拟合结果的  $R^2 \geq 0.51$ , 表明函数可以较好地拟合洪灾损失率的变化规律。特别是上海、江苏、安徽和江西的经济损失率和死亡人口率函数曲线的拟合精度较高,  $R^2 > 0.85$ 。

**c.** 在 1991 年和 1998 年降雨情景下, 长江中下游地区 2030—2100 年洪涝经济损失较 1991 年和

1998 年实际历史损失呈增加趋势, 且分别增长 153% ~ 603% 和 72% ~ 572%; 受灾人口较 1991 年和 1998 年实际受灾人口呈减少趋势, 且分别减少 72% ~ 89% 和 52% ~ 82%。该地区未来洪涝灾害损失在 5 种 SSPs 路径下变化差异较为显著, 其中以适应挑战为主的 SSP4 路径下洪涝经济损失和受灾人口均最小且呈减少趋势, 以经济发展为主的 SSP5 路径下洪涝经济损失最大且呈增加趋势, 以区域竞争发展为主的 SSP3 路径下洪涝受灾人口最多且呈先减少后增加趋势。

## 参考文献:

[1] 王小杰, 夏军强, 董柏良, 等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 196-207. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))

- [ 2 ] 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 Yongzhi, TANG Wenwen,ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 1 ) : 20-27. ( in Chinese ))
- [ 3 ] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报:2018 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [ 4 ] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护,2023,39(2):78-86. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023,39(2):78-86. (in Chinese))
- [ 5 ] 吕鸿,吴泽宁,管新建,等. 缺资料城市洪灾损失率函数构建方法及应用[J]. 水科学进展,2021,32(5):707-716. (LYU Hong, WU Zening, GUAN Xinjian, et al. Construction methods and applications of flood loss rate functions for cities lacking data[J]. Advances in Water Science,2021,32(5):707-716. (in Chinese))
- [ 6 ] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2022, 50 ( 3 ) : 1-8. ( in Chinese ))
- [ 7 ] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaorong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 ( 1 ) : 33-39. ( in Chinese ))
- [ 8 ] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护,2022,38(5):58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):58-64. (in Chinese))
- [ 9 ] CARISI F, SCHRÖTER K, DOMENEGHETTI A, et al. Development and assessment of uni-and multivariable flood loss models for Emilia-Romagna (Italy)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18 ( 7 ) : 2057-2079.
- [ 10 ] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展,2019,30(2):153-165. (SONG Xiaomeng,ZHANG Jianyun,HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 ( 2 ) : 153-165. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 尹卫霞,余瀚,崔淑娟,等. 暴雨洪水灾害人口损失评估方法研究进展[J]. 地理科学进展,2016,35(2):148-158. (YIN Weixia, YU Han, CUI Shujuan, et al. Review on methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods[J]. Progress in Geography,2016,35(2):148-158. (in Chinese))
- [ 12 ] 刘希林,尚志海. 自然灾害风险主要分析方法及其适用性述评[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1486-1497. (LIU Xilin, SHANG Zhihai. Risk analysis methods of natural disasters and their applicability [J]. Progress in Geography,2014,33(11):1486-1497. (in Chinese))
- [ 13 ] PEDUZZI P, DAO H, HEROLD C, et al. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the disaster risk index[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2009,9(4):1149-1159.
- [ 14 ] BRAZDOVA M, RIHA J. A simple model for the estimation of the number of fatalities due to floods in Central Europe [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2014,14(7):1663-1676.
- [ 15 ] 王志军,顾冲时,娄一青. 基于支持向量机的溃坝生命损失评估模型及应用[J]. 水力发电,2008,34(1):67-70. (WANG Zhijun, GU Chongshi, LOU Yiqing. Model for evaluation of loss-of-life caused by dam breach based on support vector machine [J]. Water Power, 2008, 34 ( 1 ) : 67-70. ( in Chinese ))
- [ 16 ] JONKMAN S N, VRIJLING J K, VROUWENVELDER A C W M. Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method [J]. Natural Hazards,2008,46(3):353-389.
- [ 17 ] 刘耀龙,陈振楼,王军,等. 经常性暴雨内涝区域房屋财产脆弱性研究:以温州市为例[J]. 灾害学,2011,26(2):66-71. (LIU Yaolong, CHEN Zhenlou, WANG Jun, et al. Study on property ( capital ) vulnerability of houses in regular rainstorm waterlogging areas: taking Wenzhou City as example [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26 ( 2 ) : 66-71. ( in Chinese ))
- [ 18 ] 王艳艳,韩松,喻朝庆,等. 太湖流域未来洪水风险及土地风险管理减灾效益评估[J]. 水利学报,2013,44(3):327-335. (WANG Yanyan, HAN Song, YU Chaoqing, et al. The flood risk and flood alleviation benefit of land use management in Taihu Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 ( 3 ) : 327-335. ( in Chinese ))
- [ 19 ] 陈敏建,周飞,马静,等. 水害损失函数与洪涝损失评估[J]. 水利学报,2015,46(8):883-891. (CHEN Minjian, ZHOU Fei, MA Jing, et al. Water-induced disaster damage function and flood and waterlogging damage assessment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 ( 8 ) : 883-891. ( in Chinese ))

- [20] 李超超,程晓陶,王艳艳,等. 洪涝灾害三参数损失函数的构建: I. 基本原理[J]. 水利学报,2020,51(3):349-357. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, WANG Yanyan, et al. A three-parameter flood damage function: I. theory and development [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(3):349-357. (in Chinese))
- [21] 姜彤,赵晶,曹丽格,等. 共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测[J]. 气候变化研究进展,2018,14(1):50-58. (JIANG Tong, ZHAO Jing, CAO Lige, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China [J]. Climate Change Research,2018,14(1):50-58. (in Chinese))
- [22] 姜彤,赵晶,景丞,等. IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估[J]. 气候变化研究进展,2017,13(2):128-137. (JIANG Tong, ZHAO Jing, JING Cheng, et al. National and provincial population projected to 2100 under the shared socioeconomic pathways in China [J]. Climate Change Research, 2017, 13 (2): 128-137. (in Chinese))
- [23] 石勇,许世远,石纯,等. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(1):41-46. (SHI Yong, XU Shiyuan, SHI Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods [J]. Progress in Geography,2009,28(1):41-46. (in Chinese))
- [24] WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Spatiotemporal distribution of flood disasters in Asia and influencing factors in 1980-2019 [J]. Natural Hazards, 2021,108(3):2721-2738.
- [25] 王盼,陆宝宏,张瀚文,等. 基于随机森林模型的需水预测模型及其应用[J]. 水资源保护,2014,30(1):34-37. (WANG Pan, LU Baohong, ZHANG Hanwen, et al. Water demand prediction model based on random forests model and its application [J]. Water Resources Protection,2014,30(1):34-37. (in Chinese))
- [26] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [27] 姜彤,王艳君,苏布达,等. 全球气候变化中的人类活动视角:社会经济情景的演变[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(1):68-80. (JIANG Tong, WANG Yanjun, SU Buda. Perspectives of human activities in global climate change: evolution of socio-economic scenarios [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(1):68-80. (in Chinese))
- [28] GAFFIN S R, ROSENZWEIG C, XING X S, et al. Downscaling and geo-spatial gridding of socio-economic projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) [J]. Global Environmental Change, 2004,14(2):105-123.

(收稿日期:2022-10-04 编辑:施业)

(上接第 31 页)

- [16] RIBAS L V D S, COUTINHO A P, LASSABATERE L, et al. Effect of the choice of different methods on the permeable pavement hydraulic characterization and hydrological classification [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics,2021,69(3):332-346.
- [17] RICKS M D, HORNE M A, FAULKNER B, et al. Design of a pressurized rainfall simulator for evaluating performance of erosion control practices [J]. Water, 2019, 11 (11):2386.
- [18] 杜晓丽,郑泽东,尹子杰,等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响[J]. 水资源保护,2022,38(1):73-81. (DU Xiaoli, ZHENG Zedong, YIN Zijie, et al. Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):73-81. (in Chinese))
- [19] LIU Q, LIU S, HU G, et al. Infiltration capacity and structural analysis of permeable pavements for sustainable urban: a full-scale case study [J]. Journal of Cleaner Production,2021,288:125111.
- [20] CHAI T, DRAXLER R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): arguments against avoiding RMSE in the literature [J]. Geoscientific Model Development,2014,7(3):1247-1250.
- [21] KRAUSE P, BOYLE D, BASE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences,2005,5:89-97.
- [22] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology,1970,10(3):282-290.
- [23] SHUKLA M, LAL R, UNLEFER P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems [J]. Soil Science, 2003, 168 (3): 178-191.
- [24] 吴冰,朱元骏,邵明安,等. 降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):87-91. (WU Bing, ZHU Yuanjun, SHAO Mingan, et al. Effect of rainfall intensity on sediment yield and infiltration on stony soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(6):87-91. (in Chinese))
- [25] MEININGER R C. No-fines pervious concrete for paving [J]. Concrete International,1988,10(8):20-27.
- [26] MONTES F, HASELBACH L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete [J]. Environmental Engineering Science,2006,23(6):960-969.

(收稿日期:2022-10-24 编辑:王芳)