

基于CMIP6的多情景上海雨洪风险
时空格局评价及规划响应对策

Spatial-temporal Pattern Evaluation and Planning
Solution of Urban Flood Risk in Shanghai Based on
CMIP6

吴昊
秦弋丰
谢长坤
车生泉*

WU Hao
QIN Yifeng
XIE Changkun
CHE Shengquan

摘 要: 气候变化带来的雨洪灾害是城市发展的巨大挑战之一, 评估城市未来的雨洪风险并开展有效的规划应对是目前城市发展的重大需求。未来气候情景下上海极端降水的时空格局还未得到充分研究。利用第六次耦合模式比较计划(CMIP6)中12个全球模式气候数据耦合上海市10个气象站点历史数据, 选用Delta降尺度方法预测上海市SSP245、SSP585情景下的2025—2055和2070—2100年重现期为5、10、20、50、100年的降水。使用SCS-CN模型模拟得到了多情景下上海市径流深度, 结果表明21世纪末期比21世纪中期最大径流深度最高增加100%。结合各区域排水能力, 划分了上海市多情景下的雨洪风险等级。结果表明, 上海市中心城区排涝标准较高, 雨洪风险较低, 而中心城区以外区域风险相对较高。针对不同风险等级区域, 从流域视角统筹城市雨洪设施建设, 合理布局, 提出防洪、除涝、雨水排水相互协调的规划响应对策。

关 键 词: 风景园林; 气候变化; CMIP6; 雨洪风险评价; 规划对策

文章编号: 1000-6664(2023)06-0026-07
DOI: 10.19775/j.cla.2023.06.0026
中图分类号: TU 986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-03-24
修回日期: 2023-04-10
基金项目: 上海市绿化和市容管理局科学技术项目(编号J202102)和上海市科学技术委员会科技计划项目(编号22230750500)共同资助

Abstract: One of the major challenges for urban development brought by climate change is urban flooding caused by heavy rainfall. Evaluating future rainfall risks in cities and implementing effective planning and response measures is a critical need for urban development. Currently, there is not enough research on the spatiotemporal pattern of extreme precipitation in Shanghai under future climate scenarios. Using data from 12 global climate models in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) and historical data from 10 meteorological stations in Shanghai, the Delta downscaling method was employed to predict precipitation with a return period of 5, 10, 20, 50, and 100 years under the SSP245 and SSP585 scenarios for the periods of 2025-2055 and 2070-2100. The SCS-CN model was used to simulate the runoff depth in different scenarios, and the results indicate that the maximum runoff depth at the end of the 21th century is 100% higher than that in the middle of the 21th century. Based on the drainage capacity of different regions, rain-flood risk levels were divided in Shanghai under different scenarios. The results show that the central urban area of Shanghai has a higher drainage standard and lower rain-flood risk, while the risk in other areas outside the central urban area is relatively higher. In response to different risk levels, a watershed perspective was used to coordinate the construction and layout of urban rain-flood facilities, and response measures were proposed to coordinate flood control, drainage, and rainwater drainage.

Keywords: landscape architecture; climate change; CMIP6; risk assessment of urban flooding; planning solution

城市洪涝灾害是当前社会发展面临的重大挑战之一, 对社会经济和城市服务造成巨大的负面影响, 如交通、通信、供水和电力系统的中断, 并破坏城市的基础设施, 对城市的安全和发展构成了严重威胁^[1]。造成城市内涝的内因是城镇化带来的下垫面形态改变, 外因则是气候, 而日益严峻的气候变化问题加剧了城市的雨洪风险, 也是挑战当前和未来城市洪水管理战略的重要

问题。气候变化对水循环、极端降水事件概率、降雨时空格局有显著影响, 从而直接导致地表径流、洪水频率和水量的改变。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC AR6)指出, 从1850—1900年以来, 地球的表面平均温度已上升1.1℃, 而未来20年全球气温预计将上升达到或超过1.5℃, 复合极端天气事件发生的概率将会增加^[2]。

评估气候变化背景下城市雨洪风险, 制定相应的规划对策需要掌握区域降水规律并对未来降雨做出预测, 预测的尺度及精确度直接影响城市雨洪安全及管理策略。在未来气候变化的模拟方面, 全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)是在国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)框架下开发的用于研究历史、现在和未来气候演变的

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: chsq@sjtu.edu.cn

重要工具。使用GCMs模拟未来降水的情况对于气候变化背景下区域的水文研究至关重要^[3]。由于GCMs在空间分辨率上的限制，因此需要通过降尺度方法提高较小分辨率流域尺度水文模拟的精确性^[4]。常用的降尺度方法有动力降尺度和统计降尺度2种，其中统计降尺度所需计算量更小，结果通常更为可靠，因此被广泛应用^[5]。使用单站点进行统计降尺度只能模拟单个点的气候变化情景或数个点的独立情景^[6]，因此许多研究者都使用多站点降尺度方法模拟降水，并研究气候变化对水文影响的空间变异性^[7-8]。

全球模式数据已经成为气候变化下城市雨洪风险研究的重要手段，Zahmatkesh等使用CMIP5中的降雨预测评估了美国纽约市低影响开发(Low Impact Development, LID)实施对于城市内涝的缓解效果^[9]。杨辰等评估了CMIP5的RCP4.5和RCP8.5情境下上海市暴雨内涝的适应性，模拟了极端降雨条件下上海中心城区的内涝情景，分析了气候变化对上海排涝的影响^[10]。谢烨使用CMIP5的HadGEM2-ES，NorESM1-M以及MPI-ESM-LR3个全球气候模式和REMO区域气候模式进行降尺度后，模拟了上海地区在RCP8.5情景下21世纪中远期的极端降雨变化趋势，并评估了气候变化对上海区域的都市内涝影响^[11]。王轩使用统计降尺度模型(SDSM)，利用CGCM3_MEAN和NCARPCM模型的降水预测数据，评估了上海市21世纪的雨洪风险^[12]。

这些研究对制定城市雨洪管理策略及规划相应策略具有一定的参考价值。但是受限于全球模式的精度和尺度，在未来降水模拟方面还存在准确性不高、趋势分析多、定量分析少的问题。全球模式耦合比较计划已经进行到了第六阶段(CMIP6)，与CMIP5及以前的模式相比，CMIP6对中国东部区域的降水模拟精度有了很大的提高^[13-14]。但是目前少有将CMIP6模式应用于城市雨洪风险的研究，大多研究应用CMIP5或更早以前的模式数据进行趋势分析，结合水文模型分析城市雨洪风险，并未针对区域降尺度，体现降水的空间变异性，无法准确预测气候变化下城市降水的空间格局。

因此，利用CMIP6多模式数据对气候变化下城市尺度的雨洪风险进行研究，提出一套模式数据与城市气象站点数据耦合的方法，预测

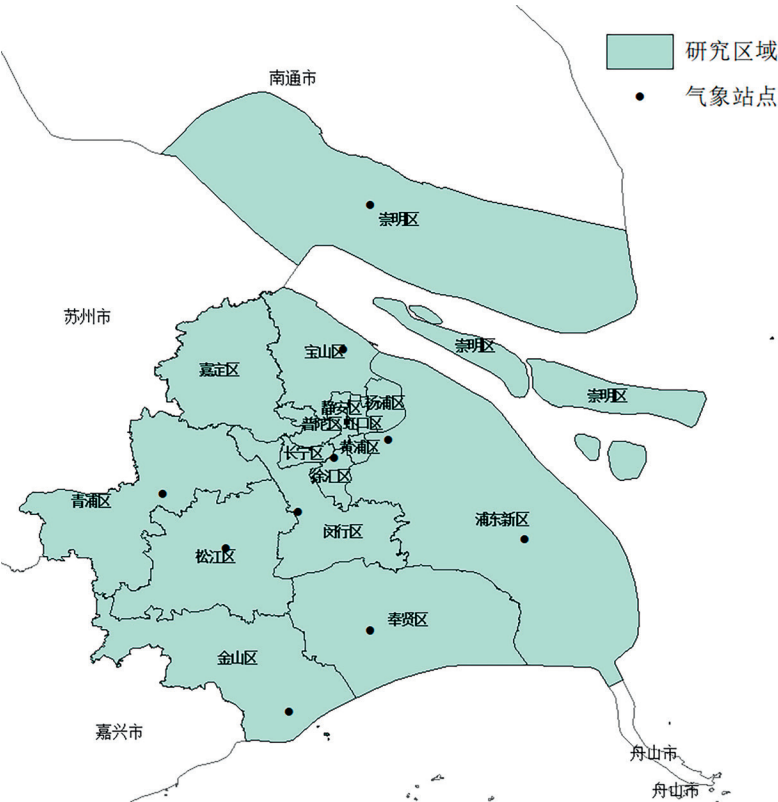


图1 研究区域

城市极端降水量，以此驱动水文模型模拟城市雨洪风险的时空分布。并根据模拟结果制定相应的规划响应策略，不仅有助于在气候变化背景下构建更高的城市洪水安全格局，同时也为我国城市化过程中加强水管理、提升城市韧性提供一定的指导。

1 研究区域概况

上海位于中国华东地区，地处太平洋西岸，亚洲大陆东沿，是长江三角洲冲积平原的一部分。上海市平均海拔高度2.19m，大金山岛为上海最高点，海拔高度103.7m，属亚热带季风气候，气候湿润，全年降雨量1 173.4mm，夏季降水量大，全年50%~60%的降水集中在6—8月。目前，上海市共有11个气象站点，分别是奉贤站、松江站、青浦站、金山站、浦东站、南汇站、徐家汇站、崇明站、宝山区、闵行区嘉定站。其中嘉定站为新建站，缺少历史数据，因此选用其余10个气象站点数据(图1)。

为研究方便，本文将上海市除崇明区和其他小岛以外的区域称为上海市陆域，将杨浦区、虹口区、闸北区、普陀区、长宁区、静安区、徐汇区称为中心城区。

2 数据来源

本研究的数据包含气象数据、地理数据、CMIP6全球模式数据等。具体包括上海市10个气象站点1965—2015年6—8月逐日降水数据，数据精度为0.1mm，数据来源为中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)；2020年上海市土地利用数据，数据分辨率30m，数据来源为中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)；上海市12.5m分辨率数字高程(DEM)地图，数据来源为美国国家航空航天局(NASA)数据开放共享平台EARTHDATA(<https://search.asf.alaska.edu/>)；上海市土壤类型数据，数据来源为中国科学院南京土壤研究所1:400万中国土壤图(2000)；CMIP6全球模式数据(包含历史、SSP245和SSP585情景)，数据来源为(<https://aims2.llnl.gov/search>)，详细信息见表1，所有全球模式数据均采用双线性插值法(Bilinear Interpolation)插值到上海市10个气象站。

3 模型与方法

3.1 统计降尺度方法

全球模式数据空间分辨率较高，在应用到

区域气候预测时需要经过降尺度。统计降尺度主要包含概率偏差订正、分位数订正、Delta等。相比于其他统计降尺度方法，Delta降尺度能够有效减少全球模式与区域气候的系统偏差，同时保留全球模式基于陆面过程和全球环流物理参数化过程的波动特征。因此本文选择Delta法降尺度^[15]，该方法通过比较全球模式历史数据和观测数据之间的差异来订正全球模式的预测数据。计算方法见公式(1)(2)。

$$\text{delta}_{\text{ymoni}_p} = \text{obs}_{\text{ymoni}_p} / \text{gcm}_{\text{ymoni}_p} \quad (1)$$

$$\text{gcm}_{\text{daily}_d} = \text{gcm}_{\text{daily}_d} \times \text{delta}_{\text{ymoni}_p} \quad (2)$$

式中， $\text{obs}_{\text{ymoni}_p}$ 为气象站点观测数据率定期的多年月平均值； $\text{gcm}_{\text{ymoni}_p}$ 为全球模式历史数据率定期的多年月平均值； $\text{delta}_{\text{ymoni}_p}$ 为率定期的比例因子； $\text{gcm}_{\text{daily}_p}$ 为全球模式预测数据的日降水量； $\text{gcm}_{\text{daily}_d}$ 为全球模式降尺度之后的日降水量。

3.2 降尺度效果评价方法

Delta降尺度的方法可以有效降低全球模式与区域气候的系统偏差，保留多情景全球模式的波动特征。基于已有的研究方法和站点数据，本研究选定降尺度率定期为1965—2000年，降尺度效果评价期为2000—2015年。本研究采用均方根误差指标作为降尺度效果评价指标，计算方法见公式(3)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - f(x_i)]^2} \quad (3)$$

式中，RMSE为均方根误差； n 为样本量； Y_i 为观测值； $f(x_i)$ 为预测值。

3.3 极端降水重现期确定方法

极端降水重现期采用超阈值模型(POT)极值理论。已有研究表明，中国华东区域极端降水超过阈值部分符合广义帕累托分布^[16]，阈值可选取90~94分位数。因此，本研究采用上海市各站点6—8月92%降水分位数为阈值，采用广义帕累托分布拟合超阈值降水部分，得到各气象站点5、10、20、50、100年重现期降水量。广义帕累托分布密度函数见公式(4)。

$$y = f(x|k, \sigma, \theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \left[1 + k \frac{(x - \theta)}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{k}} \quad (4)$$

式中， k 为形状参数，描述极值的分布情况； σ 为尺度参数，用来扩大或者缩小分布面积，描述极值分布的变率， σ 越大则表示波动越大； θ 为阈值参数，定义极值分布的阈值下限^[17]。

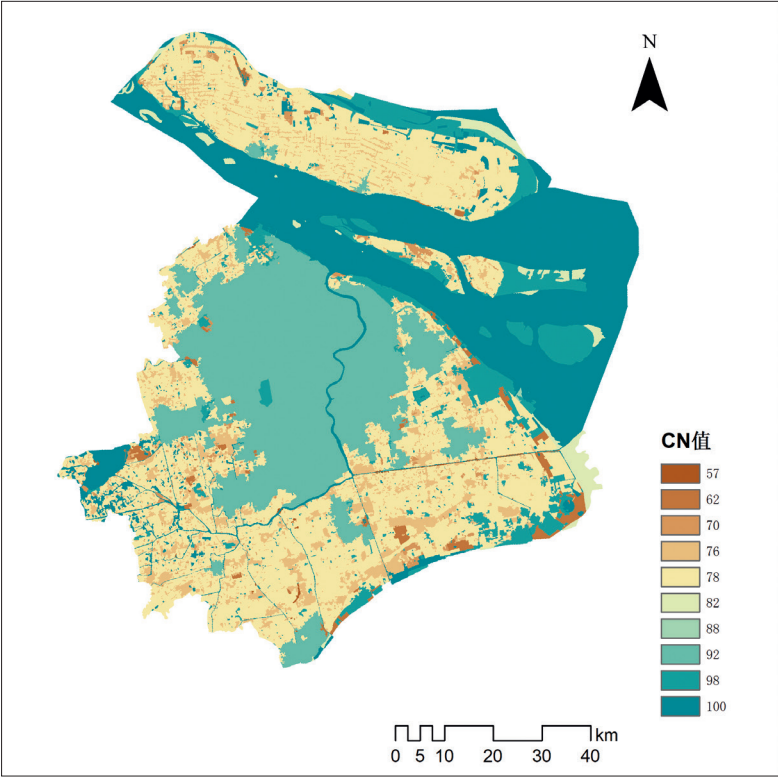


图2 上海市CN值分布

表1 全球模式信息表

序号	模式	机构	空间分辨率
1	ACCESS-ESM1-5	CSIRO-ARCCSS	1.875° × 1.250°
2	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center	1.120° × 1.120°
3	CanESM5	the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.810° × 2.770°
4	CMCC-ESM2	CMCC	1.120° × 1.120°
5	CNRM-CM6-1	CNRM	1.406° × 1.389°
6	CNRM-ESM2-1	CNRM	1.406° × 1.389°
7	INM-CM4-8	Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model	2.000° × 1.500°
8	INM-CM5-0	Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model	2.000° × 1.500°
9	IPSL-CM6A-LR	IPSL(Institute Pierre-Simon Laplace)	2.500° × 1.270°
10	MIROC6	MRI(Meteorological Research Institute)	1.400° × 1.400°
11	MRI-ESM2-0	MRI(Meteorological Research Institute)	1.400° × 1.400°
12	CESM2-WACCM	NCAR(National Center for Atmospheric Research)	1.250° × 0.900°

3.4 降水径流模型

基于已有研究，SCS-CN模型对上海市降水径流模拟效果较好^[18-19]，根据上海市不同土地利用类型的径流系数CN值确定径流量，计算方法见公式(5)。

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geq 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases} \quad (5)$$

式中， $P = \frac{25400}{CN} - 254$ ； $P(\text{mm})$ 为降水量； $Q(\text{mm})$ 为径流深度；CN值为SCS模型中的无量纲参数，用于描述降水量和径流量的关系^[20]。CN值的大小与土壤类型、土壤潮湿程度、土地利用类型等相关。研究表明应用SCS模型时，

上海市土壤为中等潮湿状态，结合上海市土壤类型、上海市土地利用和现有的研究成果，确定上海市CN值^[21](图2)。

3.5 上海市地形模型

城市雨洪风险和城市地形紧密相关，本研究假设降水只受重力作用。基于上海市12.5m DEM数据得到上海市径流方向，由径流方向分析得到汇流单元数，根据上海市实际状况和现有研究，选择30 000为阈值提取上海市积水盆地，最终得到849个积水盆地。

3.6 雨洪风险评价指标

雨洪风险评价指标是用于描述区域当下对

极端降水的承受能力，区域的雨洪风险与该区域极端降水量呈正相关，与区域的排水能力呈负相关。构建雨洪风险评价指标如公式(6)。

$$R = \frac{Q_{\text{extreme}}}{D}$$
 (6)

式中，R为雨洪风险评价指标； Q_{extreme} 为极端降水下的径流深度；D为区域排水能力。

本研究数据处理均基于Python 3，空间分析和制图基于ArcGIS 10.0平台，空间插值方法采用反距离插值法。

4 结果与分析

4.1 上海市排水能力分析

上海市地势平坦，河网众多，城市化程度高。根据上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)，全市共分为14个排水分区(图3)。中心城区排水以强排为主，自排为辅，主要涉及分区为嘉宝北片、蕴南片、淀北片和淀南片。其他地区以自排为主，强排为辅。根据上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)及已有的研究^[12]，上海市各分区排水能力见图3。以强排为主的中心城区排水能力明显大于周边城区。周边城区以自排为主，排水能力在1m³/(s/km²)左右，受地势影响较大，太北和太南片排水能力稍高达到2m³/(s/km²)左右。

4.2 降尺度效果评价

全球模式模型精度的优化必须来自模型陆面过程物理参数化方程优化，各种降尺度方法一定程度上减少了模型与区域气候的系统偏差。Delta降尺度计算历史观测数据与模式历史数据的偏差，并假设该偏差为模型的固有偏差，在未来预测期内仍然适用。RMSE值越小表示模式与观测数据越接近，降尺度效果越好。

在气候变化背景下，全球气候的不确定性增加，通过多模式集合的方法能够有效降低模式的不确定性，本研究除了比较每个模式的RMSE外，还比较了模式集合算术平均值(MME)。降尺度前，各模式RMSE值为16.20~18.67，MME为12.36，降尺度之后，全球模式的RMSE值明显降低，为0.66~3.57，MME为0.55。降尺度有效降低了模式的RMSE值，使模式数据与观测数据更加贴合。相比于单个模式，无论是降尺度前还是降尺度后，MME均表现出了更好的模拟性能。因此，Delta降尺度能够有效降低全球模式与区

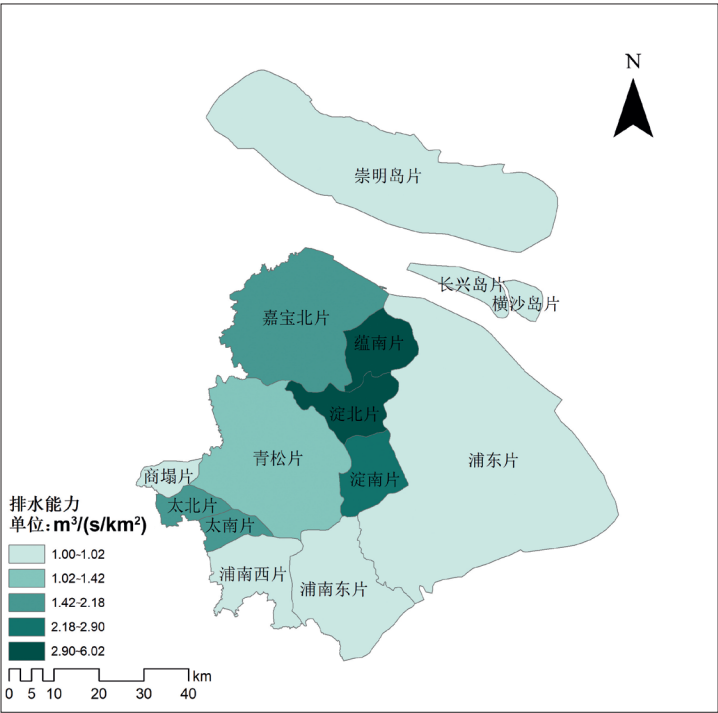


图3 上海市分区排水能力

域气候的偏差，MME能够有效降低模式的不确定性。现有研究也得到了类似的结果，根据降尺度效果评价和现有研究成果，本研究选取MME值作为极端降水值的计算依据。

4.3 上海市多情景径流深度时空特征分析

目前，气候预测情景模拟的方式众多，主要的基础情景有SSP119、SSP245、SSP370和SSP585。SSP585代表了高人为辐射强迫的社会经济发展路径，SSP245则代表了中等辐射强度和中等脆弱性的社会经济发展路径。相比于另外2个社会经济发展路径，SSP245和SSP585更加具有代表性。

径流深度是衡量区域雨洪风险的重要参数。SCS-CN模型需要确定的参数有下垫面CN值和降水量。在上海市地形模型上运行SCS-CN模型即可得到每个积水盆地的径流深度。

SSP245情景下(图4)，21世纪中期，上海市重现期为5、10、20、50、100年的降水下径流深度分别是2~42、5~54、8~67、15~89、20~91mm。21世纪末期分别是8~20、5~55、19~68、18~93、28~122mm。从时间上看，21世纪末期的径流量比中期的径流量有一定程度的增加，径流深度低值的增加幅度远大于高值的增加幅度。从空间分布上看，上海市中心城区径流深度明显大于周边区域。

SSP585情景下(图5)，21世纪中期，上海市重现期为5、10、20、50、100年的降水下径流深度分别是1~40、4~52、7~66、14~98、28~98mm，21世纪末期分别是10~21、8~60、16~77、32~119、45~196mm。从时间上看，重现期为5、10、20年的降水下，21世纪末期和中期的差异较小，但是重现期为50和100年的降水下，21世纪末期上海市径流深度明显大于21世纪中期，最大值分别增加21.43%和100%。从空间上看，上海市中心城区的径流深度多数情况下大于周边区域，但是在面对重现期为100年的降水时，径流深度的高值区域21世纪中期位于上海市西南部的松江区和金山区，21世纪末期位于金山区南部和浦东新区东南部。

SSP245和SSP585情景相比，重现期为5、10、20年的降水径流深度相差不大，但是重现期为50和100年的降水下，SSP585情景下的降水量明显大于SSP245，21世纪中期50年一遇最大值增加10.11%，100年一遇最大值增大75%，21世纪末期50年一遇最大值增加27.96%，100年一遇最大值增加60.65%。从径流深度空间分布上看，2个情景下上海市的中心城区径流深度均较高。

4.4 上海市多情景雨洪风险时空格局评价

根据上海市防洪除涝规划(2025—2035)，

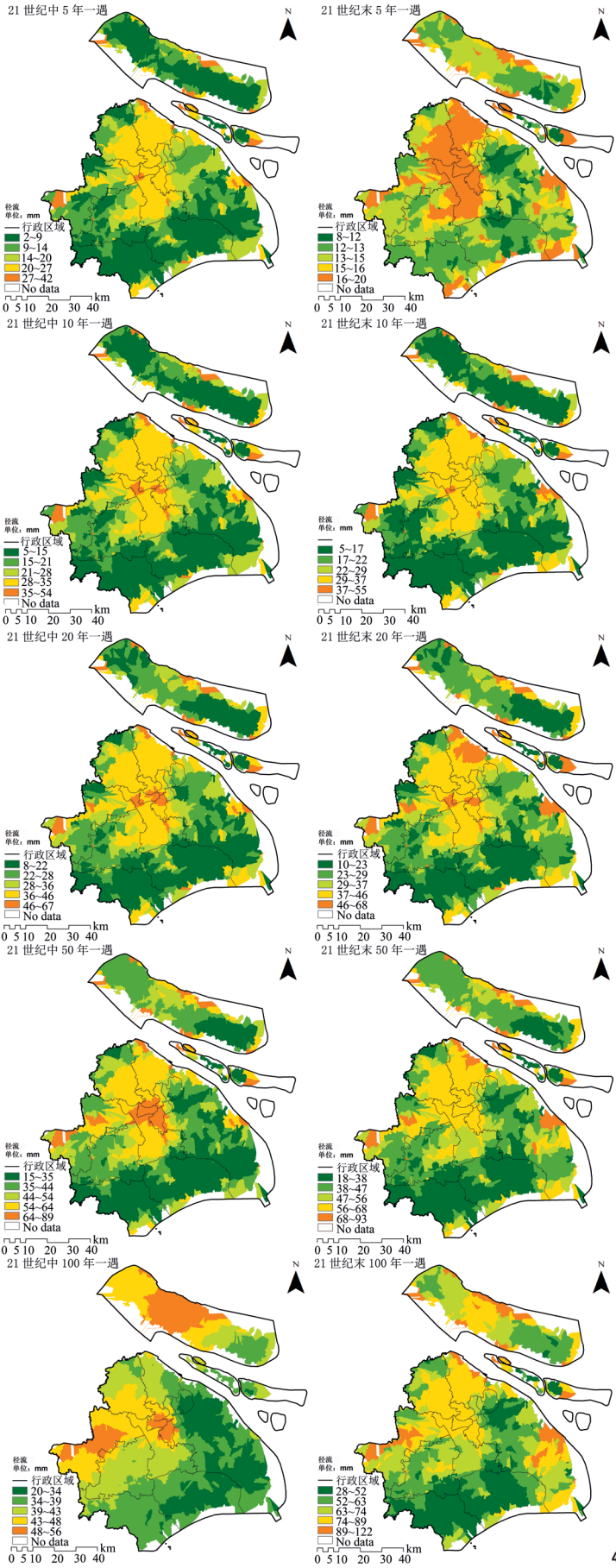
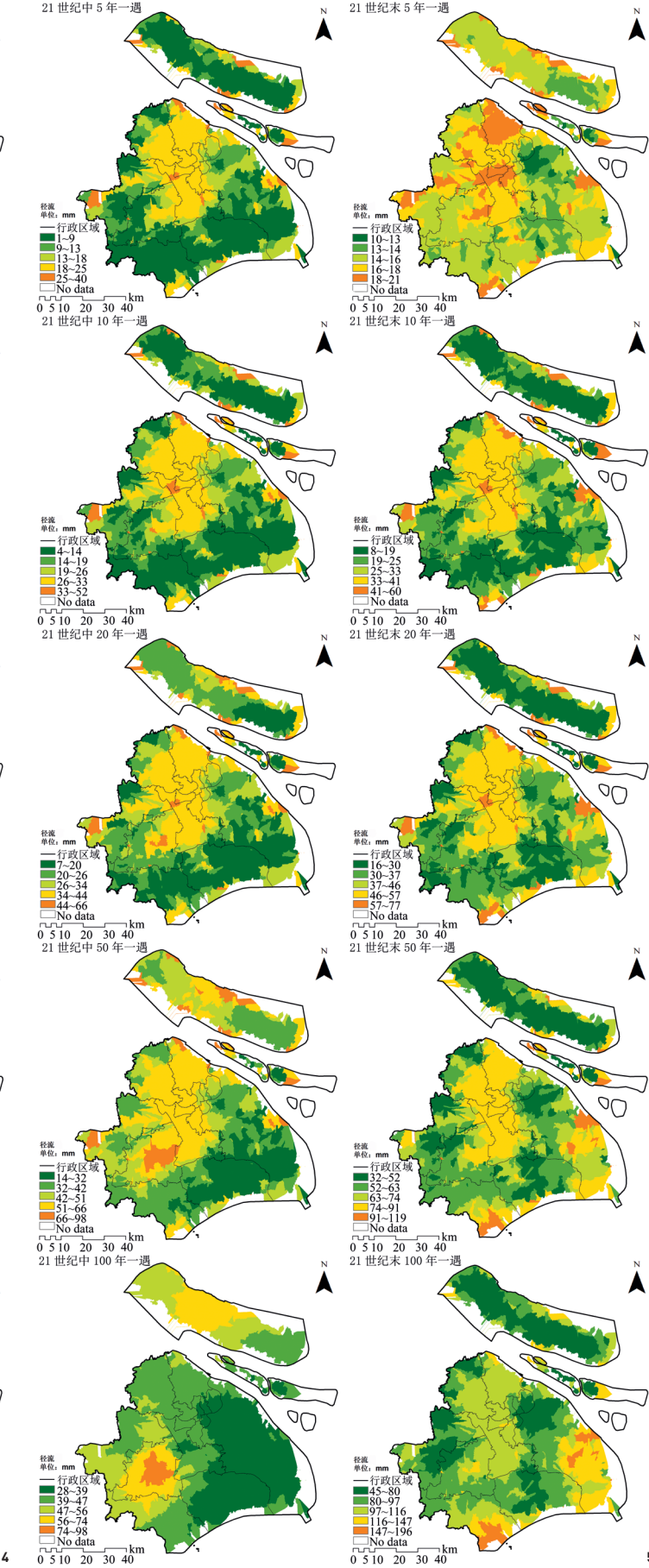


图4 SSP245情景下上海市极端降水径流分布图
图5 SSP585情景下上海市极端降水径流分布图



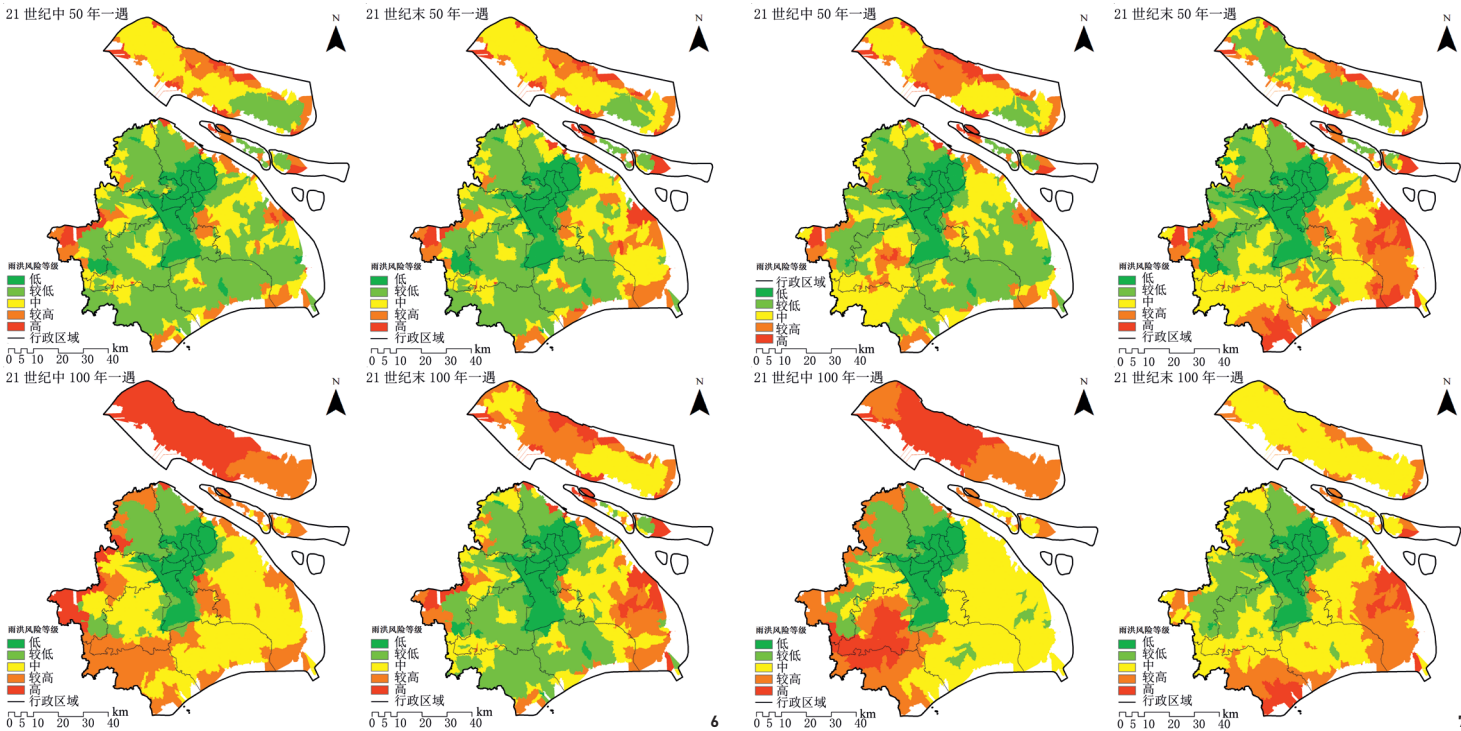


图6 SSP245情景下上海市雨洪风险等级
图7 SSP585情景下上海市雨洪风险等级

防洪除涝分为14个片区，根据相关规划得到上海市排水分区能力。规划中提出，整个上海市防涝标准设定为20年一遇，50和100年重现期要求做到可控。因此，本研究选择重现期为50和100年的降水标准。将区域径流深度和分区排水能力值代入公式(6)，得到雨洪风险评价指标 R ，依据自然分割法(Natural Breaks)，将 R 值分为5段，分别对应低风险、较低风险、中风险、较高风险和高风险。

SSP245情景下(图6)，面对重现期为50年的降水，21世纪中期和末期上海市雨洪风险的空间分布相似，上海市陆域大部分区域均为中低风险，较高和高风险区域多出现在崇明区和上海市陆域外围。崇明区中西部分为中高风险地区，青浦区最西部存在雨洪高风险区。值得注意的是，在浦东新区与浦西交界处为较高风险区。面对重现期为100年的降水时，21世纪中期上海市中高风险区域明显增加，崇明区大部分区域为中高风险区，浦东新区、奉贤区、金山区、青浦区均出现大面积中高风险区域。21世纪末期，中高风险区主要位于崇明区、浦东新区和青浦区西部。

SSP585情景下(图7)，面对重现期为50年的降水，21世纪中期，中高风险区域主要分布在崇明区、青浦区西部、松江区大部 and 金山区西

表2

各区雨洪特征及规划响应对策

区域	雨洪特征	规划响应对策
中心城区	径流深大，理论排水能力强，低风险	增加区域内透水铺装、生态路面等，减少径流深度，注重强排系统的维护与改造，低洼地区进一步加强排水能力
崇明区	径流深度大，排水能力一般，中-高风险	崇明区地势平坦、地下水位高，雨水蓄积能力差。应该打通地表水系，提高城镇空间强排能力。控制建设用地面积，优化生态空间，易受水患的空间实行“宜水则水”原则
青浦区	径流深度中等，排水能力一般，低-中风险	从流域视角规划区域排水，新城规划应整合城市蓝绿空间，统筹规划。淀山湖区域雨洪风险较高，需加强泵站排水能力，同时进一步完成生态修复，增加雨水积蓄和净化能力
浦东新区	径流深度不大，排水能力一般，中等风险	主城区保证强排能力，增加透水铺装面积，减少径流。新城及各副中心建设时从流域视角出发，整体规划，制定高径流削减指标，沿海滩涂恢复生态
宝山区	径流深度中等，排水能力较强，低风险	加强强排系统维护与建设，进一步加强中心城区和宝山主城区的排水能力。在有条件的区域新增绿色基础设施，减少径流量，控制径流污染
嘉定区	径流深度中等，排水能力较强，低风险	加强强排系统维护与建设，打通区域内水系，在有条件的区域新增绿色基础设施，减少径流量，控制径流污染
闵行区	径流深度中等，排水能力较强，低风险	中心城区和闵行主城区以强排为主，自排为辅，加强强排系统维护与建设，其他区域加强绿色基础设施建设，减少径流总量，控制径流污染
奉贤区	径流深度一般，排水能力一般，低-中风险	从流域视角统筹区域排水规划，控源截污，打通区域内水系，加强区域内生态修复。保持并进一步增加区域内林地蓄水涵养能力。生态修复河道，减少径流污染
金山区	径流中等，排水能力一般，中-高风险	从流域角度规划区域排水，控制建设用地规模，打通区域水系增加排水能力。码头港口污水处理后排放，滨海区域生态修复
松江区	径流中等，排水能力一般，中-高风险	从流域角度规划区域排水，控制建设用地规模，实行“宜林则林”原则，提高森林覆盖率。加强应急排水设施建设，提高应对大量降水的能力

部以及浦东新区东部。21世纪末期中高风险区域主要位于浦东新区、奉贤区、金山区和青浦区西部。面对重现期为100年的降水时，21世纪中期，较高和高风险区位于崇明区、金山区和松江区，中风险区主要位于浦东新区和奉贤区。21世纪末期，中高风险区域变化不大，浦东新区东

南部有较高和高风险区域。

5 规划响应对策

上述研究表明，从时间格局上看，SSP245情境下，21世纪末期和中期相比，上海市雨洪风险没有明显的变化。SSP585情景下，21世

纪末期高风险区域明显增加。从空间分布上看，在所有情景下，上海市雨洪风险存在中心城区风险小，外围风险大的格局。从降水量分布可以看出，上海市降水高值均没有出现在中心城区。

本研究从流域视角，针对不同风险区的成因，从源头控制、中段运输和末端消纳三方面提出规划建议对策。源头控制目的是减少地表径流深度，采用绿色基础设施充分发挥道路、水系、绿地等对雨水的吸纳、蓄渗和缓释功能，主要用于地表径流较深的风险区。中段运输目的是加快雨水排泄，措施包括从流域视角整合排水系统、连通水网和维护强排系统等。末端消纳目的是增加城市蓄水能力，主要措施是控制建设面积，清理河道湖泊，增加自然水域容量，设置可被水淹区域等。基于本研究风险区径流深度和土地利用情况，结合上海市各区实际情况和雨洪特征，对各区雨洪风险规划响应对策见表2。

上述规划响应对策整体上可以增加上海市抵御雨洪风险能力。但受到绿色基础设施蓄水能力和管网排水速度的限制，这些规划响应手段对短时强降雨的抵御能力不强。如果以短时极端降水强度为标准，规划则会有成本激增、雨洪设施利用效率低下等问题。针对这类雨洪风险，可以从管理角度出发，建立健全雨洪风险预警系统，高风险、高价值、高敏感区域设置气象站点、径流监测站点、人工巡查点等监测点位，同时配备雨洪应急设备，建立雨洪风险应急预案。出现降水量、流经深度激增时，及时人工核实，必要情况下迅速启动应急预案，防止雨洪风险扩大，减小雨洪风险损失。

6 结论

本文利用第六次耦合模式比较计划(CMIP6)中12个全球模式气候数据耦合上海市10个气象站点历史数据，选用Delta降尺度方法预测上海市SSP245、SSP585情景下的2025—2055和2070—2100年重现期为5、10、20、50、100年的降水，使用SCS-CN模型模拟得到了多情景下上海市径流深度，进一步结合各区域排水能力，划分了上海市多情景下的雨洪风险等级。从空间分布角度，上海市中心城区降水量较小，径流深度大，但是排水能力强，雨洪风险较小。周边城区由于排水能力一般，雨洪风险较高。从时间角度，21世纪末期比中期的雨洪风险高，特别

在高排放情景下重现期为50和100年的降水条件下，高风险区域面积明显增加。最终根据风险等级划分和各区实际情况针对不同风险等级区域，从流域视角统筹城市雨洪设施建设，合理布局，提出防洪、除涝、雨水排水相互协调的规划响应对策。

注：文中图片均由作者绘制。

参考文献：

[1] Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y C. Urban pluvial flooding and stormwater management: a contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy[J]. *Environmental Science & Policy*, 2018, 80: 132–143.

[2] IPCC. Summary for Policymakers[M]//*Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 3–32.

[3] Wang D, Liu J, Shao W, et al. Comparison of CMIP5 and CMIP6 Multi-Model Ensemble for Precipitation Downscaling Results and Observational Data: The Case of Hanjiang River Basin[J]. *Atmosphere*, 2021, 12: 867.

[4] Li D, Zou L, Zhou T. Extreme Climate Event Changes in China in the 1.5 and 2℃ Warmer Climates: Results From Statistical and Dynamical Downscaling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(18): 10215–10230.

[5] Ahmed K F, Wang G, Silander J, et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast[J]. *Glob Planet Change*, 2013, 100: 320–332.

[6] Cherchi A, Fogli P G, Lovato T, et al. Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model[J]. *Journal of Advances In Modeling Earth Systems*, 2019, 11(1): 185–209.

[7] Su X, Shao W, Liu J, et al. Multi-Site Statistical Downscaling Method Using GCM-Based Monthly Data for Daily Precipitation Generation[J]. *Water*, 2020, 12: 904.

[8] Chen J, Chen H, Guo S. Multi-site precipitation downscaling using a stochastic weather generator[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 50: 1975–1992.

[9] Zahmatkesh Z, Steven J B, Mohammad K, et al. Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2015, 141(1):

4014043.

[10] 杨辰, 顾宇丹, 王强, 等.RCP4.5和RCP8.5气候变化情景下上海市暴雨内涝适应性[J]. *气象科技*, 2018, 46(5): 1004–1011.

[11] 谢烨.气候变化下上海暴雨的变化及其对城市内涝的影响[D].上海: 上海应用技术大学, 2022.

[12] 王轩.上海市极端降水的气候变化响应及风险评估[D].上海: 上海师范大学, 2015.

[13] Rivera J A, Arnould G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014)[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 241: 104953.

[14] Yue Y, Yan D, Yue Q, et al. Future changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin in China based on CMIP6 GCMs[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 264: 105828.

[15] Schmidli J, Frei C, Vidale P L. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods[J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26: 679–689.

[16] 江志红, 丁裕国, 朱莲芳, 等.利用广义帕雷托分布拟合中国东部日极端降水的试验[J]. *高原气象*, 2009, 28(3): 573–580.

[17] Pickands J. Statistical inference using extreme order statistics[J]. *The Annals of Statistics*, 1975, 3(1): 119–131.

[18] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 553–562.

[19] 权瑞松.基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝脆弱性分析[J]. *地理科学*, 2014, 11: 1407–1411.

[20] Mccuen R H. *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Method*[C]. Prentice-Hall Inc: Englewood Cliffs, 1982: 67–97.

[21] 高习伟.上海市应对气候和土地利用变化的城市雨洪安全策略研究[D].上海: 华东师范大学, 2016.

(编辑/王媛媛)

作者简介：

吴 昊
1993年生/男/江苏宜兴人/上海交通大学设计学院风景园林系在读博士研究生/研究方向为风景园林生态规划设计(上海 200240)

秦弋丰
1993年生/男/贵州贵阳人/上海交通大学设计学院风景园林系在读博士后/研究方向为风景园林生态规划设计(上海 200240)

谢长坤
1987年生/男/湖南保靖人/上海交通大学设计学院风景园林系副教授/研究方向为风景园林生态规划设计(上海 200240)

车生泉
1968年生/男/山东临沂人/上海交通大学设计学院教授/研究方向为风景园林生态规划设计/本刊编委(上海 200240)