

基于洪涝溯源法的城市综合管理空间干预优先级研究

李 鹏^{1,2,3}, 冯骁驰^{1,3}, 张 伟³, 徐宗学^{4,5}, 刘俊国^{3,6}, 邓子杰⁷

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)生态环境学院,广东 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)城市水资源与
环境国家重点实验室,广东 深圳 518055; 3. 深圳市深水水务咨询有限公司,广东 深圳 518003;
4. 北京师范大学水科学研究院,北京 100875; 5. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术
北京市重点实验室,北京 100875; 6. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046;
7. 深圳市南山实验教育集团华侨城高级中学,广东 深圳 518058)

摘要:将洪涝溯源法与水动力模型 LISFLOOD-FP 相结合,用于识别洪涝源并揭示区域空间水文连通性,并制定了 4 个准则对空间干预优先级进行划分,包括淹没范围、最大淹没水深、淹没道路、建筑物暴露度。以济南市黄台桥以上片区为例,分析了各准则及不同组合下的空间干预优先级,并讨论了降雨重现期和网格大小对空间干预优先级的影响。结果表明:洪涝溯源法可获取特定区域对总洪涝范围的贡献度,结合空间干预准则可以确定区域洪涝干预优先级;不同准则下的空间干预优先级不同,在制定防洪减灾计划时,需将特定需求与洪涝管理目标相结合;济南市黄台桥以上片区的海绵城市示范区具有较高的干预优先级,降雨重现期和网格大小对干预优先等级划分影响较大,但对优先级的空间分布影响较小。

关键词:城市洪涝;洪涝溯源法;LISFLOOD-FP 模型;空间干预优先级;水文连通性;济南市

中图分类号:P338;TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)04 - 0033 - 09

Research on priority of spatial intervention in urban comprehensive management based on flood tracing method//
LI Peng^{1,2,3}, FENG Xiaochi^{1,3}, ZHANG Wei³, XU Zongxue^{4,5}, LIU Junguo^{3,6}, DENG Zijie⁷ (1. School of Ecology and Environment, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 3. Shenzhen Shenshui Water Resources Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518003, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 7. Overseas Chinese Town Senior High School, Shenzhen Nanshan Experimental Education Group, Shenzhen 518058, China)

Abstract: Combining flood tracing method with hydrodynamic model LISFLOOD-FP to identify flood sources and reveal regional spatial hydrological connectivity. Four criteria have been developed to prioritize spatial interventions, including inundation range, maximum inundation depth, inundation road, and building exposure. Taking the area above Huangtai Bridge in Jinan City as an example, the spatial intervention priority under various criteria and different combinations were analyzed, and the influence of rainfall recurrence period and grid size on spatial intervention priority was discussed. The results indicate that the flood tracing method can obtain the contribution of specific regions to the total flood range, and combined with spatial intervention criteria, the priority of regional flood intervention can be determined. The priority of spatial intervention varies under different criteria. When formulating flood control and disaster reduction plans, specific needs need to be combined with flood management objectives. The sponge city demonstration area above Huangtai Bridge in Jinan City has a high intervention priority. The rainfall return period and grid size have a significant impact on the classification of intervention priority levels, but have a relatively small impact on the spatial distribution of priority levels.

Key words: urban flooding; flood tracing method; LISFLOOD-FP model; priority of spatial intervention; hydrological connectivity; Jinan City

基金项目:国家自然科学基金项目(51579007);国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)
作者简介:李鹏(1994—),男,博士,主要从事水利信息化及智慧水利研究。E-mail:lipengbnu@126.com
通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事水水文水资源研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

在快速城市化和全球气候变暖的双重背景下,城市洪涝的频率明显增加,对城市居民和基础设施造成更大威胁^[1-3]。有研究表明,全球城市洪涝风险呈增加趋势^[4],究其原因,一方面观测到城区短历时强降雨发生频次上升^[5],另一方面城市化加速扩大了不透水下垫面,削弱了雨水渗透能力^[6-7],导致径流过程发生改变。此外,随着城市雨岛效应的出现,城市排水系统能力无法与排水需求相匹配^[8-9],城市发展迫切需求提出韧性城市建设方案并修订城市防洪策略^[10-12]。

尽管低影响开发、可持续城市排水系统、水敏感城市排水系统、海绵城市等城市防洪项目发展迅速,但研究表明,这些实施方案存在投资回报率较低和空间安排不合理的问题^[13-15]。针对这一局限性,目前研究重点集中在防洪措施组合及其空间布局优化等方面^[16-18]。然而,现有研究大多采用低效率的试错法,并且在确定这些措施的空间优先次序方面仍然存在困难,防洪措施空间布局的确定仍是一个迫切需要解决的问题。另外,城市水文循环过程复杂,受降雨变化、地形复杂性、土地覆盖多样性和排水能力的综合影响^[19-20]。城市地区的水流路径复杂,可能造成洪涝管理措施最有效的区域与可能发生洪涝的区域存在空间上不一致^[21-22],为解决这些问题,很多学者针对洪涝溯源问题开展了研究^[23-25]。近年来,城市洪涝模型因其可以获取洪涝动态以及评估减灾效果,成为制定防洪减灾策略的核心工具^[26-27]。但仅使用城市洪涝模型进行情景模拟通常只关注城市洪涝的一个方面^[28],还不足以实现洪涝综合管理。鉴于此,本文采用洪涝溯源法对城市洪涝源进行识别,结合 LISFLOOD-FP 模型,揭示区域水文连通性,并制定 4 个空间干预准则,针对不同的空间干预准则及各准则组合情景,划分洪涝综合治理的空间干预优先级,以期为地区防洪减灾决策的制定提供科学依据。

1 研究方法

1.1 LISFLOOD-FP 模型

LISFLOOD-FP 模型基于英国布里斯托大学研制的洪涝模拟软件,利用机载激光测高和卫星雷达等遥感数据,以正方形网格作为运算单元,能够全面覆盖一、二维的水动力模拟需求,可用于在复杂地形上高效计算洪泛区淹没问题,可执行文件可在官网获取 (<http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/>)。LISFLOOD-FP 模型提供了支持并行计算的 DG2 和 FV1 求解器,同时也支持以 NetCDF 格式存储的时空变化降水量数据。李

鹏等^[29]的研究表明,LISFLOOD-FP 模型能够较快地模拟地表淹没过程,建模难度较小,可用于城市区域的洪涝模拟。本文采用 LISFLOOD-FP 8.1 版本模型进行水动力模拟,该版本模型增加了 NC 格式降雨数据输入接口,能够灵活地处理时空变化的降雨数据。

1.2 洪涝溯源法

洪涝溯源法的目的是得到特定或单个区域对总洪涝范围的贡献程度,可以应用于具有空间降水量输入数据的二维水动力模型。具体包括 4 个步骤(图 1):①网格单元划分,将研究区划分为面积大致相等的多个网格单元;②基准情景模拟,构建水动力模型,所有网格单元均设有降水量输入,运行模型获取研究区淹没范围及最大淹没水深;③网格情景模拟,即忽略任一网格单元的降雨,运行水动力模型,迭代此步骤至每个网格单元中的降雨都被忽略过一次;④洪涝源识别,将步骤②获得的基准情景模拟结果与步骤③中的网格情景模拟结果逐一进行比较,确定洪涝源。

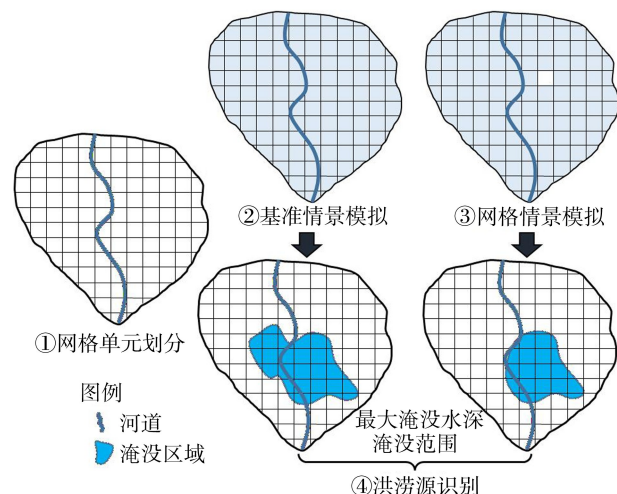


图 1 洪涝溯源法示意图

Fig.1 Schematic diagram of flood tracing method

1.3 空间干预优先准则

为了确定城市洪涝综合管理措施的空间干预优先级,本文确定了 4 个干预优先级准则:淹没范围(准则 1)、最大淹没水深(准则 2)、淹没道路(准则 3)、建筑物暴露度(准则 4)。其中,准则 1 和准则 2 是基于研究区洪涝物理机制方面的贡献,准则 3 和准则 4 涉及实际洪涝事件中的承灾体信息,包括道路和建筑暴露信息方面的贡献。准则 3 进一步可分为淹没主干道(准则 3a)和淹没支路(准则 3b)两种情况。准则 4 中,建筑物暴露度指建筑物的内涝积水程度,反映了建筑物被淹没的可能性大小,根据水深逐栋计算。在 LISFLOOD-FP 模型计算网格中,提取建筑物空间坐标对应点及周围最邻近

计算网格的最大淹没水深值,根据提取的水深信息计算平均淹没水深 H 和最大淹没水深 $H_{\max}$ 。采用 Vercruysse 等^[24] 构建的洪涝暴露计算器计算建筑物暴露度,使用低、中、高 3 个等级表示; $H<0.1\text{ m}$ 且 $H_{\max}<0.3\text{ m}$ 时为低暴露度; $H<0.1\text{ m}$ 且 $H_{\max}\geq 0.3\text{ m}$ 或 $0.1\text{ m}\leq H<0.3\text{ m}$ 且 $H_{\max}<0.3\text{ m}$ 时为中暴露度; $H\geq 0.1\text{ m}$ 且 $H_{\max}\geq 0.3\text{ m}$ 时为高暴露度。

1.4 优先准则的组合

将以上 4 种空间干预优先准则进行比较与组合,从而为城市洪涝综合管理干预的空间优先等级提供指导信息,帮助决策者更有效地分配资源和实施干预。以准则 1、2、4 组合为例进行说明:①分别根据准则 1、2、4 从高到低对所有网格单元进行优先干预等级排序,为每个网格单元格赋予排序号(排序号越小影响程度越大,即序号 1 为淹没范围、最大淹没水深以及建筑物暴露度最大的网格单元);②将每个网格单元在 3 个准则的排序号相加,得到一个总和值,用以反映加强防洪管理方面的优先等级;③根据总和值判断该网格单元是否应被干预的优先等级,总和值越低,该网格单元在防洪管理方面的需求越迫切,更应被优先考虑进行干预。

2 实例应用

2.1 研究区概况与数据资料

2.1.1 研究区概况

将基于洪涝溯源的空间干预优先级分析法在黄台桥以上流域进行应用,该流域地处济南市中西部,位于 $36^{\circ}44'N\sim 36^{\circ}33'N$ 、 $116^{\circ}47'E\sim 117^{\circ}7'E$,涵盖了济南中心城区、南部山区以及西北郊区。该区域城市化程度高,地势南高北低,区域总面积约 300 km^2 。研究区地处中纬度地带,属半湿润大陆性季风气候,季节更迭鲜明,春秋气候干燥,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨,年平均降水量为 660 mm ,其中夏秋两季平均降水量高达 536.1 mm ,且降雨空间分布差异显著。随着该区域不透水表面增加,其径流显著增加,并导致了严重的城市洪涝,因此该区域迫切需要制定洪涝缓解措施,以减少对人们生命财产的威胁。研究区流域边界采用济南市水文局提供的黄台桥流域边界,结合地形以及高清城市影像资料进行调整,考虑海绵示范区面积大小,将研究区划分为 54 个面积大约相等的网格单元($2.5\text{ km}\times 2.5\text{ km}$),如图 2 所示。

2.1.2 数据资料

本文采用的数据包括地形数据、下垫面数据及路网数据。地形数据从 BIGMAP 地图下载器获取,分辨率为 5 m 。根据建筑物、河道以及路网等地物信息对高程数据进行修正,使其更贴近实际情况。下垫面数

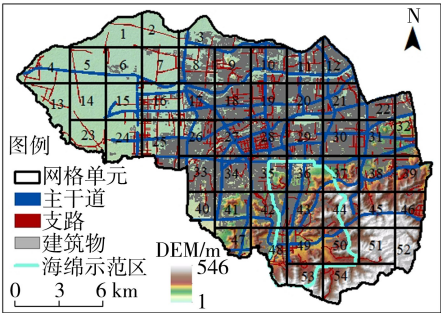


图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of study area

据通过解译高分影像资料,并结合欧空局 ESA10m 分辨率的土地利用资料进行局部调整,将研究区划分为道路、建筑物、植被、耕地和水域 5 种土地利用类型,根据相关文献和设计标准,确定各类下垫面的糙率。路网数据从 OpenStreetMap 官网 (<https://www.openstreetmap.org/>) 下载,该数据包含了道路的名称、走向、宽度等基础信息以及道路等级属性,建筑物矢量数据是从 Bigemap 下载器中获取。

2.2 结果与分析

2.2.1 基准情景模拟

基于济南市暴雨强度公式结合芝加哥雨型,生成研究区降雨重现期为 50 a 的 2 h 降雨,时间间隔设为 6 min,作为基准情景的设计降雨。采用 python 语言编写程序将降雨时间序列写入 .nc 文件,作为基准情景的降雨输入条件。河道、湖泊等洼地保留在二维水动力模型计算域中,不同地表下垫面糙率参考文献[29]和相关规范。基准情景模拟结果如图 3 所示。由图 3(a)可见,研究区的淹没范围主要集中在中下游地区,这可能是因为这些区域的地势较低,容易积水。最大淹没水深则主要集中在市内的几条河道以及湖泊处,特别是在研究区下游,集水区排水出口处的最大淹没水深相对较大,与下游地区排水能力有一定关系。 0.35 m 通常被视为基础设施的受损阈值,当水深超过受损阈值时,各种公共设施,如道路、桥梁、电力设施等,都可能受到严重的威胁,从而影响居民的正常生活和城市的正常运转。由图 3(b)可见,研究区中部以及西部的网格单元淹没水深超过 0.35 m 的淹没范围较大。然而,当考虑建筑物暴露度时,结果则呈现不同的空间分布。由图 3(c)可见,建筑物暴露度最高的区域位于集水区的中部和东北部,这可能与区域的地理位置和基础设施布局有关。进一步观察发现,高暴露度建筑区域与淹没水深超过 0.35 m 受损阈值的淹没范围在空间分布上存在一定的相似之处,例如网格 21、27、29 既是高暴露度区域又是淹没水深超过受损阈值的地区。

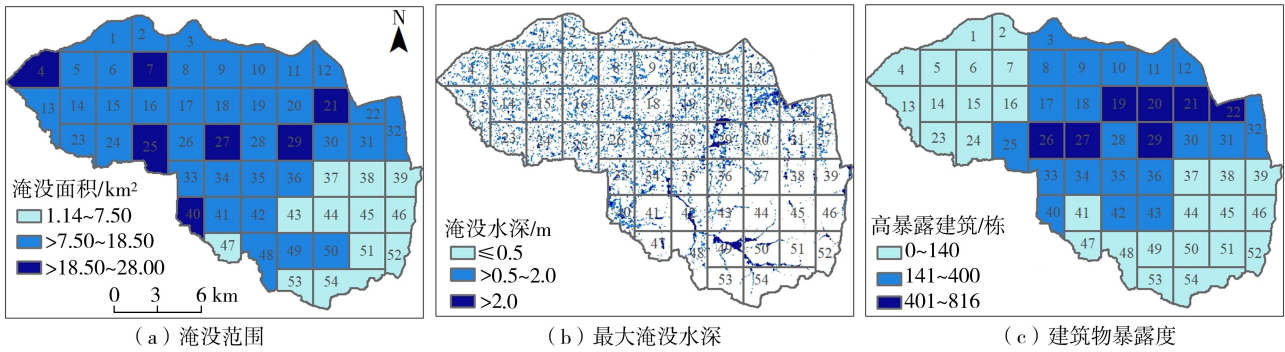


图 3 基准情景模拟结果
Fig. 3 Simulation results of base scenario

2.2.2 网格情景模拟

将网格情景模拟的淹没范围及最大淹没水深与基准情景进行对比,从而揭示各网格单元与研究区洪涝淹没程度的关系。结果表明,部分高城市化和高海拔区域网格的洪涝差异较大,对研究区的洪涝淹没程度影响较大。海绵城市示范区位于网格 36、37、43、44,以这 4 个网格单元的网格情景模拟为例进行网格单元洪涝响应分析,结果如图 4 所示。由图 4 可见,网格 36 和 37 的淹没面积分别为 10.98 km² 和 15.98 km²,最大淹没水深分别为 2.86 m 和 4.57 m,可见网格 37 的洪涝贡献度更大;网格 43 和 44 的淹没面积分别为 15.94 km² 和 18.96 km²,最大淹没水深分别为 12.68 m 和 8.68 m,虽然网格 43 产生较大的淹没

水深,但其淹没面积较小。

2.2.3 空间干预优先级排序

基于基准情景和网格情景模拟结果,根据 4 个空间干预优先准则得到研究区的空间干预优先级,如图 5 所示。由图 5 可见,对于准则 1,东南部的山区网格单元造成的淹没范围最大,因此具有最高的干预优先级。对于准则 2,研究区东南部山区的网格单元产生的最大淹没水深最大,可能与这些网格单元包含了一些低洼河道有关,容易形成较大的淹没水深。对于准则 3,计算中将支路的宽度设置为 20 m,主干道的宽度设置为 30 m。可以看出,主干道主要受到研究区中部地区网格单元降雨产生的地表径流影响,而在这些网格单元中,偏东部的网格降雨

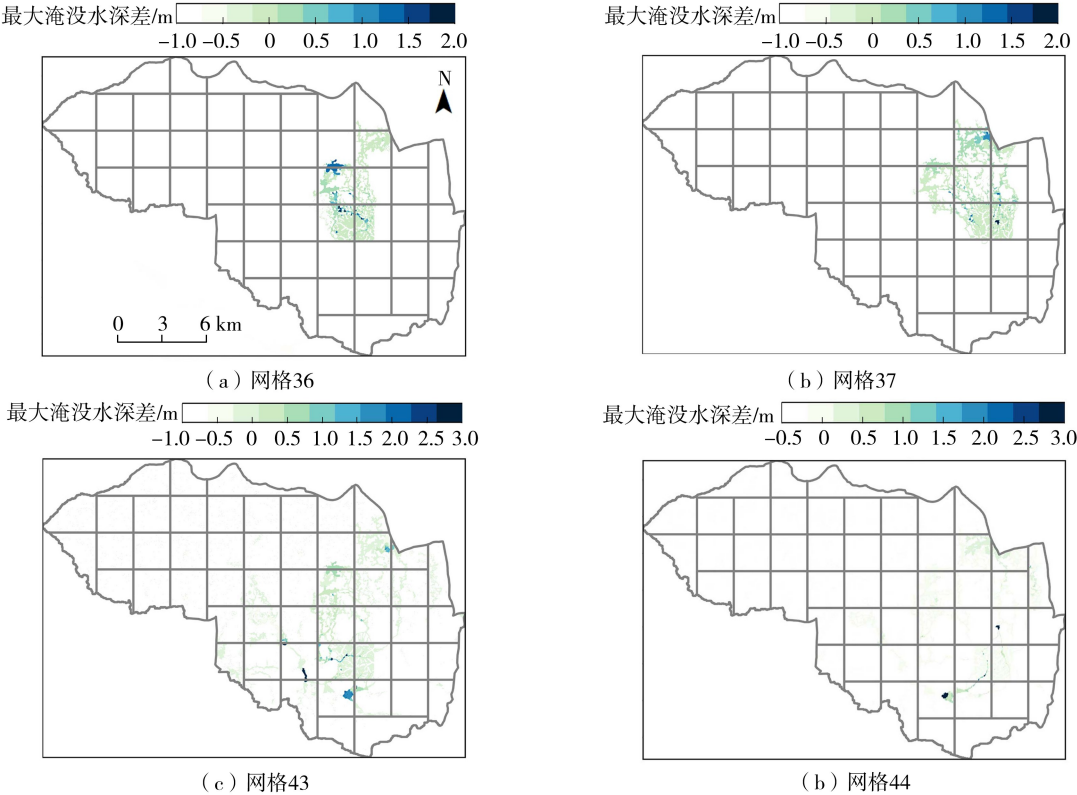


图 4 36、37、43、44 网格情景模拟的洪涝响应结果
Fig. 4 Flood response results of cell scenario simulation of 36、37、43、44

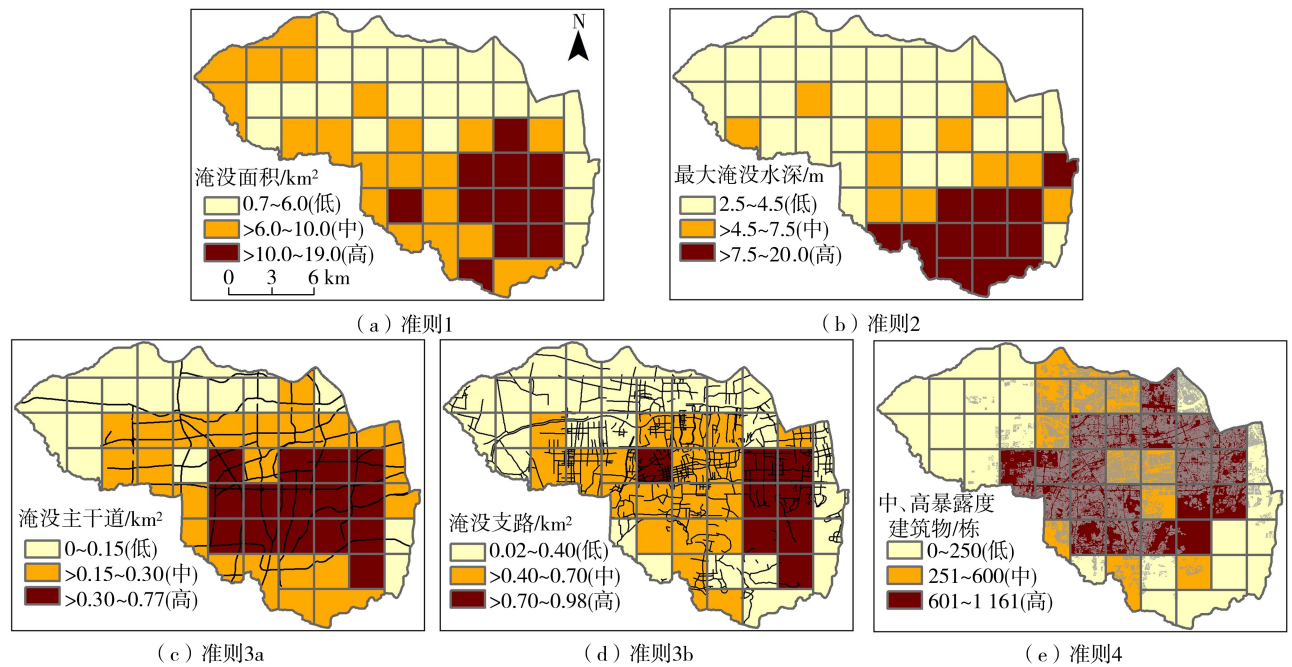


图 5 不同准则下研究区的空间干预优先级

Fig. 5 Priority of spatial intervention in study area under different criteria

(如网格 30、31、37、38)则又主要导致支路的地表淹没。对于准则 4,高暴露度建筑物主要是由研究区中部和东部区域的网格单元降雨造成。可见,不同准则情景下研究区中部地区及南部山区的优先级都较高,体现出干预优先级分类结果的空间分布具有相似性特征。结合图 3,高干预优先级通常位于淹没范围中等偏低的网格单元,而不是淹没范围最大的网格单元。这说明只根据淹没范围进行干预措施的布局不尽合理,需要开展溯源分析确定洪涝源头。同时,只考虑洪涝致灾因子(淹没范围和最大淹没水深)相关准则时,中、高等级区域分布在中部及东南部;同时考虑洪涝对基础设施系统影响的相关准则时,中、高干预优先级区域则向北延伸,如网格 3、8、9、10、11 等。

然而就规划目标和干预措施类型而言,洪涝风险管理有多种方法。为探究规划目标对空间干预优先级的影响,将 4 个空间干预优先准则进行组合,分别为准则 1、2、3、4 组合,准则 1、2、3 组合,准则 1、2、4 组合,准则 1、3、4 组合和准则 2、3、4 组合,不同准则组合下研究区的空间干预优先级如图 6 所示。由

图 6 可见,不同准则组合下研究区空间干预优先级的空间特征不尽相同,但基本上中、高干预优先级的网格单元分布在研究区的中部及东南部,一定程度上符合地貌特征的特点。具体来说,在准则 1、2、3、4 组合下,改造 35、36、37、42、43、44、48、53、50 等网格内的现有设施来减少洪涝风险的潜力最大,其干预优先级最高,这与海绵城市示范区建设位置一致,可以很好地说明本文方法的科学性。另外,虽然网格 15、16 对最大淹没水深、支路和主干道的的影响程度较大,但对建筑物暴露度的贡献较低,因此在各准则组合下均被认为是低干预优先级的区域。综上,根据不同的洪涝管理目的,将不同准则进行组合可以为洪涝治理措施提供更加明确的空间干预优先级,进而准确地找到洪涝灾害风险干预的靶向区域,为决策者提供清晰的布局策略。

3 讨论

3.1 降雨重现期对空间干预优先级的影响

设置降雨重现期 P 分别为 1、10、100 a 的设计降雨过程,将 3 种设计降雨时间序列写入 .nc 文件,

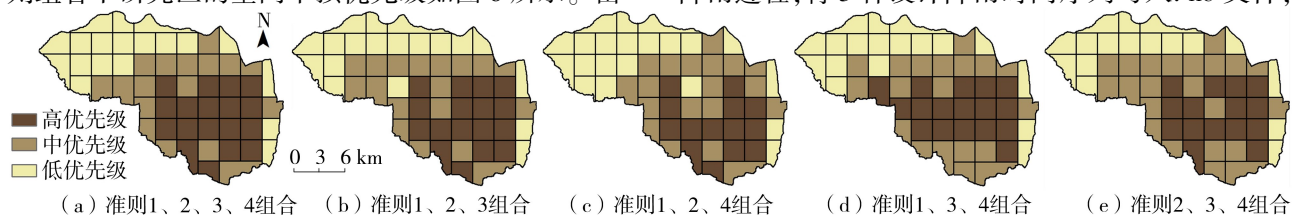


图 6 不同准则组合下研究区的空间干预优先级

Fig. 6 Priority of spatial intervention in study area under different criterion combinations

作为 LISFLOOD-FP 模型的驱动条件。图 7 为 3 种设计降雨和不同准则下研究区的空间干预优先级，表 1 为不同指标优先级划分标准。由图 7 可见，不同降雨重现期下，基于各准则的空间干预优先级在空间上较为相似，中、高干预优先级的网格集中在研究区中部以及东南部地区。随着降雨重现期的增大，准则 1、2、3b、4 对应的空间干预优先级变化不大，准则 3a 结果的中、高优先级区域范围增大，并且逐步向西部及北部蔓延，如网格 3、15、16、22、32 等。图 8 为 3 种设计降雨与准则 1、2、3、4 组合下研究区的空间干预优先级。由图 8 可见，随着降雨重现期的增大，准则 1、2、3、4 组合下，中、高优先级网格单元多集中在研究区的中部及东南部地区，并且其数量小幅度增加。综上，降雨重现期对空间干预优先级具有一定影响，可能的原因包括以下两个方面：一是随着降雨重现期增大，造成的淹没范围及最大淹没水深增加，而南部地区的网格尤为突出，这些网格造成不同干预准则的指标增加，进而影响了干预优先级；二是根据不同干预准则计算的指标数值不同，在进行自然间断点划分时会产生不确定性因素，致使空间干预优先级结果产生一定偏差。

表 1 不同指标优先级划分标准

Table 1 Priority division criteria for different indexes

优先级	淹没面积/km ²		
	<i>P</i> = 1 a	<i>P</i> = 10 a	<i>P</i> = 100 a
低	0.3~3.0	0.5~5.5	0.7~8.0
中	>3.0~5.3	>5.5~10.0	>8.0~15.0
高	>5.3~8.8	>10.0~19.4	>15.0~24.4
优先级	最大淹没水深/m		
	<i>P</i> = 1 a	<i>P</i> = 10 a	<i>P</i> = 100 a
低	1.6~3.5	2.4~5.5	2.2~6.0
中	>3.5~8.5	>5.5~10.5	>6.0~10.5
高	>8.5~14.0	>10.5~18.3	>10.5~20.3
优先级	淹没主干道/km ²		
	<i>P</i> = 1 a	<i>P</i> = 10 a	<i>P</i> = 100 a
低	0~0.15	0~0.15	0~0.15
中	>0.15~0.30	>0.15~0.30	>0.15~0.40
高	>0.30~0.42	>0.30~0.66	>0.40~0.94
优先级	淹没支路/km ²		
	<i>P</i> = 1 a	<i>P</i> = 10 a	<i>P</i> = 100 a
低	0~0.14	0~0.25	0~0.35
中	>0.14~0.25	>0.25~0.50	>0.35~0.70
高	>0.25~0.45	>0.50~0.90	>0.70~1.20
优先级	中、高暴露度建筑物/栋		
	<i>P</i> = 1 a	<i>P</i> = 10 a	<i>P</i> = 100 a
低	0~100	0~160	0~260
中	101~200	161~430	261~710
高	201~501	431~792	711~1205

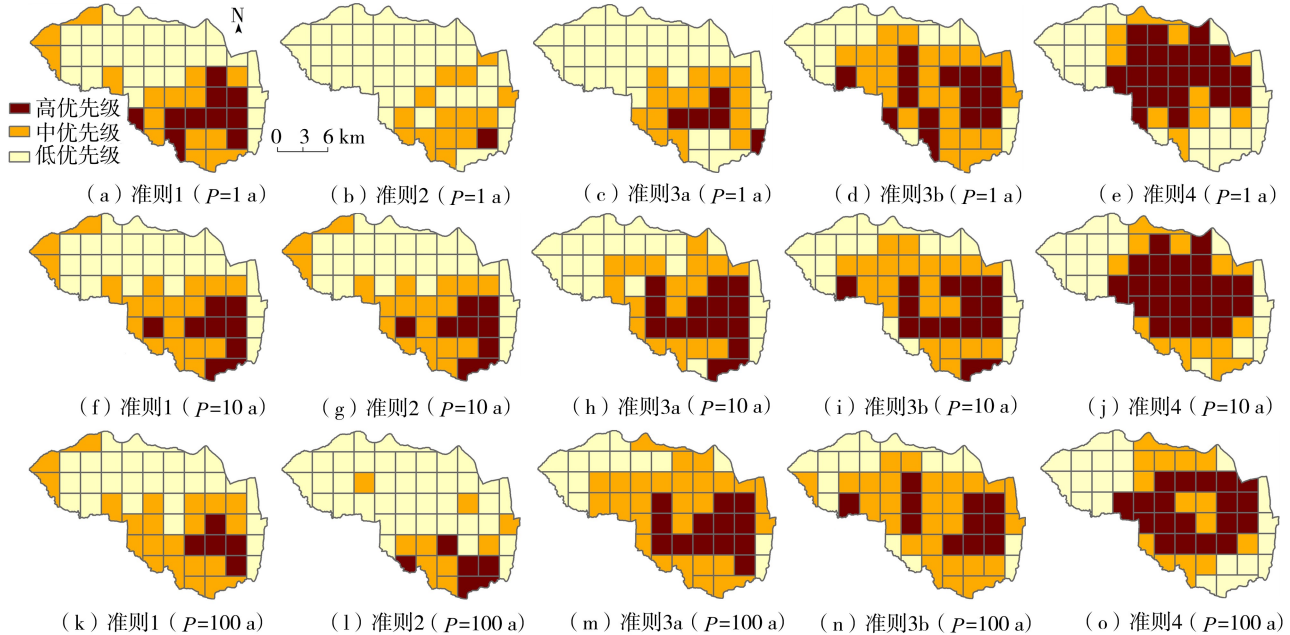


图 7 3 种设计降雨和不同准则下研究区的空间干预优先级

Fig. 7 Priority of spatial intervention in study area under three different designs rainfall and different criteria

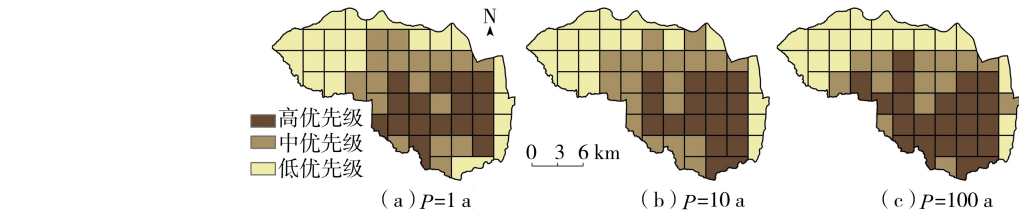


图 8 3 种设计降雨与准则 1、2、3、4 组合下研究区的空间干预优先级

Fig. 8 Priority of spatial intervention in study area under three different designs rainfall and 1、2、3、4 combination criteria

3.2 网格单元大小对空间干预优先级的影响

为研究网格单元划分的大小对研究区空间干预优先级的影响,对网格单元的划分进行细化,采用 1.5 km × 1.5 km 的标准,将研究区划分为 135 个面积大致相同的网格单元。为方便比较,同样采用基准情景下降雨重现期为 50 a 的降雨数据,细化网格后不同准则与准则 1、2、3、4 组合下研究区的空间干预优先级如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可见,网格细化后各准则的空间干预优先级空间分布大致相同,中、高优先级网格集中在研究区的中部及东南部地区。当网格单元细化后,对于准则 1,高优先级区域向中优先级区域转移,如网格 93、95、96、99、100、109、110、123、125、134 等,细化了中、高优先级区域范围;对于准则 2,绝大多数中、高优先级网格单元分别向低、中优先级转移,如网格 87、97、114、115、116、133、134、135 等,极少部分低优先级网格向中、

高优先级转移,如网格 117、126 等;对于准则 3 a,中、高优先级网格单元分别向低、中优先级转移,如网格 99、100、109、110、125 等;对于准则 3b,绝大多数中、高优先级网格单元向低、中优先级转移,如网格 64、65、78、79、95、106、114、125 等,极少部分低优先级网格向中、高优先级转移,如网格 130、135 等;对准则 4,绝大多数网格单元优先级降低,如网格 48、50、66、67、109 等,少部分网格优先级上升,如网格 21、61、108 等。综上,网格单元大小对研究区的空间干预优先级具有一定影响,随着网格单元减小,中、高优先级区域逐渐细化,而其空间分布大致不变,依然集中在研究区中部与东南部地区。另外,网格并非越小越好,在做城市内涝灾害干预规划时,往往针对的是较大区域,比如海绵城市示范区的面积大约 30 km²,对于小面积的区域来讲,干预操作性较弱。

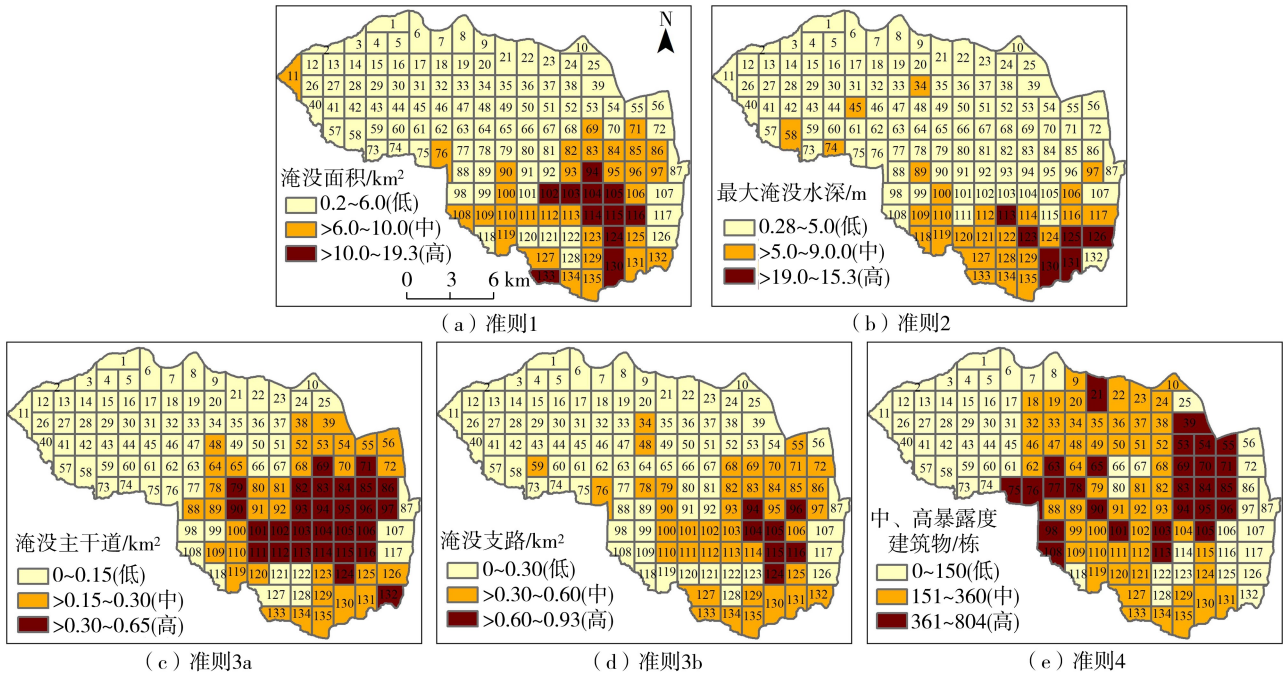


图 9 细化网格后不同准则下研究区的空间干预优先级

Fig. 9 Priority of spatial intervention in study area under different criteria after refining grid

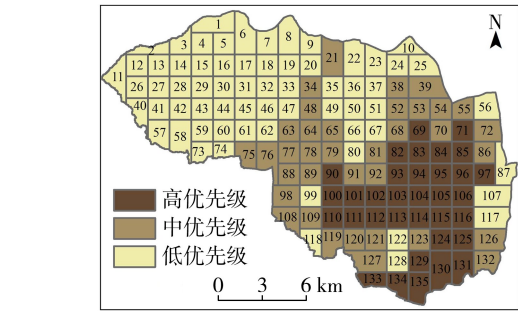


图 10 细化网格后准则 1、2、3、4 组合下研究区的空间干预优先级

Fig. 10 Priority of spatial intervention in study area under 1、2、3、4 combination criteria after refining grid

4 结 论

- a. 采用洪涝溯源法对城市洪涝源进行识别,结合 LISFLOOD-FP 模型,能够较快地模拟地淹过程,建模难度较小,可用于城市区域的洪涝模拟。
- b. 提出了 4 个空间干预准则:淹没范围(准则 1)、最大淹没水深(准则 2)、淹没道路(准则 3)、建筑物暴露度(准则 4),并对 4 个准则进行组合。结果表明不同准则及组合情况会影响空间干预优先级结果,在制定防洪减灾计划时,需要仔细考虑并选择适合的干预准则,将满足需求与洪涝管理目标相结合。

c. 济南市黄台桥以上片区应用结果表明,尽管不同准则的组合导致研究区的空间干预优先级略有不同,但中部和东南部地区的空间干预优先级始终较高。同时,较高优先级网格与海绵城市建设试点区域的位置基本一致。

d. 随着降雨重现期的增大,中、高优先级网格数小幅增加。当网格单元细化后,中、高优先级区域的分布会更加细致。更小的网格单元可以捕捉到更多的地形和地貌细节,从而更准确地反映洪涝灾害的空间分布特征。两个因素对于干预优先级划分影响较大,对优先级的空间分布影响较小。

参考文献:

[1] MAHMOOD M I, ELAGIB N A, HORN F, et al. Lessons learned from Khartoum flash flood impacts: an integrated assessment[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 601-602:1031-1045.

[2] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

[3] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[4] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))

[5] 胡庆芳,张建云,王银堂,等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 138-150. (HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese))

[6] 张瀚,邱静,黄本胜,等. 气候变化对珠三角地区典型城区流域排水系统的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 56-63. (ZHANG Han, QIU Jing, HUANG Bensheng, et al. Impact of climate change on drainage system of typical urban watershed in Pearl River Delta[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 56-63. (in Chinese))

[7] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等. 不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 22-30. (HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, CAO Runxiang, et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 22-30. (in Chinese))

[8] 李鹏,徐宗学,张瑞,等. 济南市极端降水特性与雨岛效应分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 822-830. (LI Peng, XU Zongxue, ZHANG Rui, et al. Extreme precipitation and rainfall island effect in Jinan City[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(6): 822-830. (in Chinese))

[9] 胡彩虹,刘成帅,李想,等. 郑州市雨岛效应多方法集成评估及量化研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 152-159. (HU Caihong, LIU Chengshuai, LI Xiang, et al. Multi-method integrated evaluation and quantitative study of rain island effect in Zhengzhou City [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 152-159. (in Chinese))

[10] WINSEMIUS H C, AERTS J C J H, VAN BEEK L P H, et al. Global drivers of future river flood risk [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 381-385.

[11] BONE C, RUBINATO M, BOSSELER B, et al. Seeking flood risk-minimization: how to benefit from the use/availability of heavy rainfall-risk maps[J]. *Geosciences*, 2023, 13(5): 134.

[12] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))

[13] BERTRAND-KRAJEWSKI J L. Integrated urban stormwater management: evolution and multidisciplinary perspective[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2021, 38: 72-83.

[14] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 793-799. (in Chinese))

[15] 刘昌明,张永勇,王中根,等. 维护良性水循环的城镇化LID模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31

(5):719-731. (in Chinese))

[16] 程涛,黄本胜,邱静,等. 基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J]. 水力发电学报,2021,40(7):32-46. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Optimization of overall layout of sponge city facilities for flooding alleviation effect [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):32-46. (in Chinese))

[17] MACRO K, MATOTT L S, RABIDEAU A, et al. OSTRICH-SWMM:a new multi-objective optimization tool for green infrastructure planning with SWMM [J]. Environmental Modelling & Software,2019,113:42-47.

[18] 徐宗学,李鹏,程涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):552-562. (XU Zongxue, LI Peng,CHENG Tao. LID optimization layout facilities in sponge city:a case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (3): 552-562. (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 Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):1-9. (in Chinese))

[20] YERESEME A K, SURENDRA H J, KUNTOJI G. Sustainable integrated urban flood management strategies for planning of smart cities: a review [J]. Sustainable Water Resources Management,2022,8(3):85.

[21] SINGH A, DAWSON D, TRIGG M, et al. A review of modelling methodologies for flood source area (FSA) identification[J]. Natural Hazards,2021,107(2):1047-1068.

[22] ZHOU Qianqian, FENG Junman, FENG Wan’ en. How does flow connection path and vertical spatial layout of LIDs affect urban runoff?:a new LID construction method based on refined landuse and hydrologic characterization [J]. Journal of Hydrology,2023,623:129809.

[23] 马超,赵凯,齐文超,等. 基于示踪方法的沿海城市内涝

防灾方案研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):91-99. (MA Chao,ZHAO Kai,QI Wenchao,et al. Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):91-99. (in Chinese))

[24] VERCRUYSSSE K, DAWSON D A, GLENIS V, et al. Developing spatial prioritization criteria for integrated urban flood management based on a source-to-impact flood analysis[J]. Journal of Hydrology,2019,578:124038.

[25] QI Wenchao, MA Chao, XU Hongshi, et al. Low impact development measures spatial arrangement for urban flood mitigation: an exploratory optimal framework based on source tracking[J]. Water Resources Management,2021,35(11):3755-3770.

[26] 李国一,邵薇薇,刘家宏,等. 基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):46-52. (LI Guoyi,SHAO Weiwei,LIU Jiahong,et al. Flood simulation and inundation analysis in Jinan City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection,2024,40(5):46-52. (in Chinese))

[27] QI Wenchao, MA Chao, XU Hongshi, et al. A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies[J]. Natural Hazards,2021,108(1):31-62.

[28] 董新宇,张静慧,袁鹏,等. 基于多目标优化的低影响开发设施布局方法[J]. 环境科学学报,2021,41(7):2933-2941. (DONG Xinyu, ZHANG Jinghui, YUAN Peng, et al. Low impact development practices layout method based on multi-objective optimization [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (7): 2933-2941. (in Chinese))

[29] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1083-1092. (LI Peng,XU Zongxue,ZHAO Gang,et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1083-1092. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-19 编辑:王芳)

(上接第 18 页)

[33] YANG Mingjie, XUE Liangqing, LIU Yuanhong, et al. Runoff response to multiple land-use changes and climate perturbations[J]. Hydrological Processes,2024,38(1):e15072.

[34] DU Bailin, WU Lei, RUAN Bingnan, et al. CMADS and CFSR data-driven SWAT modeling for impacts of climate and land-use change on runoff[J]. Water,2023,15(18):3240.

[35] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):1-8. (in Chinese))

[36] JI Guangxing, SONG Huiyun, WEI Hejie, et al. Attribution analysis of climate and anthropic factors on runoff and vegetation changes in the source area of the Yangtze River from 1982 to 2016[J]. Land,2021,10(6):612.

(收稿日期:2024-09-06 编辑:王芳)