

融合洪涝过程模拟与精细化 GDP 分布格局的 济南市洪涝风险评估

徐宗学^{1,2}, 胡嘉玮^{1,2}, 陈 浩^{1,2}, 黄亦轩^{1,2}, 宋苏林³

(1. 北京师范大学水科学研究院; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室; 3. 济南市水文中心)

摘要:以济南市小清河黄台桥以上流域为研究区,构建了 SWMM-InfoWorks ICM-2D 耦合模型,模拟了降雨重现期为 5~100 a 的洪涝过程。整合多源数据重构了 100 m 分辨率精细化 GDP 分布格局,从致灾、孕灾、承灾、防灾 4 个维度搭建评估框架,提出了融合城市洪涝过程与精细化 GDP 分布格局的洪涝风险评估方法。结果表明:相同暴雨重现期下,研究区洪涝风险呈现从城市中心向四周递减的圈层格局,高风险区主要集中于城市主干道,较高风险区覆盖主城区人口密集、高 GDP 分布区,低风险区主要分布在西北郊区与南部山区;随着降雨重现期增大,高风险区面积从 2.67 km² 扩张至 6.49 km²,其空间形态由散点演变为沿城市廊道分布,其余风险区范围相对稳定。

关键词:洪涝过程模拟;GDP 分布格局;洪涝风险评估;小清河流域;济南市

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2026)05-0031-11

Flood risk assessment in Jinan City by integrating flood process simulation and refined GDP distribution pattern//
Xu Zongxue^{1,2}, Hu Jiawei^{1,2}, Chen Hao^{1,2}, Huang Yixuan^{1,2}, Song Sulin³ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology; 3. Jinan Hydrology Center)

Abstract: The upstream Huangtaiqiao area of the Xiaoqinghe River Basin in Jinan City was selected as the study area and a SWMM-InfoWorks ICM-2D integrated model was constructed to simulate flood processes under rainfall return periods of 5 to 100 a. Multi-source datasets were integrated to reconstruct a 100 m-resolution refined GDP distribution pattern, and an assessment framework was constructed covering four dimensions, including hazard-causing factors, disaster-breeding environment, hazard-bearing bodies, and disaster prevention capacity. A flood risk assessment method combining flood process simulation and refined GDP distribution was proposed. The results showed that under the same rainfall return period, the flood risk in the study area presented a concentric pattern decreasing from the urban center to the periphery. High-risk areas were concentrated in urban trunk roads, relatively high-risk areas covered the downtown with high population density and GDP, and low-risk areas were mainly distributed in the northwest suburbs and southern mountainous areas. With the increase of rainfall return period, the area of high-risk areas expanded from 2.67 km² to 6.49 km², and their spatial distribution expanded from scattered points to urban corridors, while the scope of other risk-grade areas remained relatively stable.

Key words: flood process simulation; GDP distribution pattern; flood risk assessment; the Xiaoqinghe River Basin; Jinan City

近年来,受气候变化影响加剧^[1-2]与城市化进程加速^[3]的双重驱动,水文系统要素发生显著变化,极端水文事件的发生概率明显增加,以城市暴雨洪涝为代表的突发性灾害表现出日趋频发的态势^[4-5]。例如,2007 年 7 月济南、2023 年 7 月北京、2025 年 9 月温州均曾发生特大暴雨,引发“马路行洪”、地下空间涝水倒灌等极端现象^[6-7],造成城市供水、排水、交通等基础设施受损乃至瘫痪^[8],最终酿成重大人

员伤亡与财产损失^[9],对城市水安全与正常运行秩序构成严重威胁^[10-11]。因此,科学评估区域洪涝风险,认清变化环境下洪涝风险特征与演变趋势,对于因地制宜地制定洪涝防治策略具有重要意义^[12]。

洪涝风险评估常用方法包括历史灾情数据分析法、结合遥感技术与 GIS 计算建模法、评价指标体系法及情景模拟法等^[13-14]。其中,评价指标体系法近年来得到了广泛应用^[15],选取的指标主要包括致灾

因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力等^[16-17]。致灾因子常用指标有淹没水深、流速、洪涝危险性、河网密度、到河流距离等,其中洪涝危险性基于水文水动力模型模拟的洪涝过程计算,能够综合反映极端暴雨情况下城市洪涝的淹没水深、流速情况及其危险程度,可以作为致灾因子的核心指标。例如:唐清竹等^[18]基于元胞自动机洪水模拟模型构建了深圳河流域洪涝仿真模型,通过博弈论组合赋权法确定各指标权重,进而评估了不同降雨情景下该流域的城市洪涝风险;Ye 等^[19]利用 InfoWorks ICM 构建了水文水动力耦合模型,对不同洪涝风险情景下的城市洪水脆弱性进行评估,并开展了福州市城区洪涝风险评估;李国一等^[20]基于 TELEMAC-2D 模型在深圳河流域构建了洪涝仿真模型,模拟了不同降雨情景下的洪涝过程,针对不同流速和积水深度组合情景,评估了该流域的洪涝风险;Zhu 等^[21]基于精细城市洪水模拟结果建立技术框架,评估了日本近江八幡市的洪涝风险。承灾体常用的指标有 GDP、人口密度、脆弱人群密度、土地利用等,其中 GDP 刻画了社会经济在灾害中的暴露程度,是反映承灾体脆弱性的重要指标。例如:黄国如等^[17]将 GDP 密度纳入承灾体指标,基于模糊综合评价法开展了深圳市城市暴雨洪涝灾害风险评估;陈丽慧等^[22]在承灾体脆弱性指标中考虑单位面积 GDP,基于层次分析法和熵权法,以上海临港新城为例开展了滨海城市洪涝灾害风险评估。然而,上述研究均存在 GDP 密度数据分辨率偏低的问题,近年来,多源数据的广泛应用^[23-25]为解决该问题提供了新的思路。例如:徐宗学等^[26]结合多源数据实现 GDP 空间精细化,构建了基于精细化空间格局的城市承灾体脆弱性评估体系,对深圳河流域脆弱性等级进行了量化;胡嘉玮等^[27]重构了跨行政区域的精细化 GDP 空间格局,将其与多源数据结合,同时耦合层次分析法与熵权法,在济南构建洪涝风险评价体系,进而明确了流域洪涝风险等级分布情况。

目前,已有研究尝试将洪涝模拟结果或 GDP 分布格局纳入城市洪涝风险评估,在一定程度上提升了评估精度,但仍存在两点明显不足:一是现有 GDP 数据空间分辨率普遍偏低,难以精细刻画城市内部经济活动的空间异质性,导致承灾体暴露程度评估相对粗糙;二是洪涝动态过程模拟与精细化承灾体的融合仍较缺乏,多数研究未能将洪水时空演进过程与高分辨率经济空间格局有效结合,难以准确反映洪涝风险的时空动态演变特征。针对上述不足,本文以济南市小清河黄台桥以上流域为研究区,提出一种融合城市洪涝过程模拟结果与精细化

GDP 分布格局的城市洪涝风险评估方法,以期城市洪涝风险区域识别和防灾减灾策略制定提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为济南市小清河黄台桥以上流域(图 1),地理位置为 $36^{\circ}33'N \sim 36^{\circ}45'N$ 、 $116^{\circ}47'E \sim 117^{\circ}07'E$,流域面积 326 km^2 ,包含历下区、市中区、天桥区、槐荫区、历城区等主城区、部分南部山区以及西北郊区。研究区属暖温带大陆性季风气候,具有冬冷夏热、雨热同期的气候特征,多年平均降水量为 $580 \sim 750 \text{ mm}$,夏季降水占全年总量的 64.5% ^[28]。研究区地势整体东南高西北低,强降雨期间南部山区形成的山洪会快速汇入北部城区。然而,研究区当前的防洪排涝体系存在明显短板:①排水管网标准偏低,老城区排水系统建设年代久远,管网老化严重^[29],部分区域排水管网设计重现期不足 1 年一遇,难以应对突发性暴雨;②小清河作为城区唯一的排洪河道,行洪能力受限,虽经治理后市区段达到 100 年一遇防洪标准,但受河道坡降平缓、下游断面偏窄等因素制约,泄洪效率仍显不足。

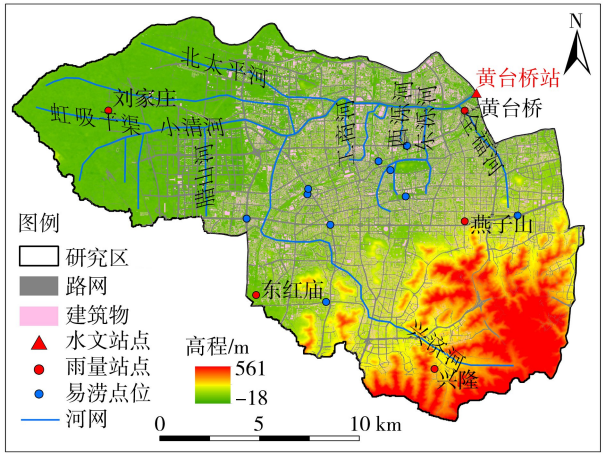


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文使用的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心,分辨率为 30 m ;兴趣点数据通过高德地图调用 API 获取;GDP 数据来自《济南统计年鉴》;人口密度和脆弱人群密度数据来自 WorldPop 数据集,分辨率为 100 m ;DEM、归一化植被指数(NDVI)数据来自星图云开放平台,分辨率均为 30 m ;夜间灯光数据来自 DMSP-OLS、NPP-VIIRS 夜间灯光数据集,分辨率为 1 km ;河道管网数据来自济南市水文中心;降水数据来自流域内 5 个雨量

站;径流数据来自黄台桥水文站;积水站点数据来自《济南水文年鉴》。除兴趣点数据采用 2022 年以保证类别完整、分类规范外,其余空间数据均为 2020 年。所有空间数据统一进行预处理:先投影转换至 WGS_1984_UTM_Zone_50N 坐标系,随后按研究区范围进行裁剪,并重采样至 100 m 分辨率,其中 DEM 数据额外进行栅格拼接处理,确保所有数据在空间参考与尺度上一致。

2 研究方法

本文首先构建水文水动力耦合模型模拟研究区洪涝过程;其次整合多源数据重构 100 m 分辨率跨行政区精细化 GDP 分布格局表征流域内经济空间异质性;最后从致灾、孕灾、承灾、防灾 4 个维度搭建评估框架,将洪涝危险性与精细化 GDP 分布格局纳入指标体系,并耦合层次分析法与熵权法,开展洪涝风险评估。

2.1 水文水动力耦合模型

暴雨洪水管理模型(SWMM)是由美国环境保护署开发的分布式水文水动力模拟工具,具有代码开源、一维管网计算能力强等优势,但缺乏地面二维计算功能;InfoWorks ICM 是由英国 Wallingford 公司开发的都市水系统模拟软件,其内置的二维水动力模块 ICM-2D 能精细模拟地表洪水的空间分布及演进过程。本文采用 SWMM-ICM-2D 单向松散耦合的方式,可充分发挥 SWMM 在城市复杂管网一维计算中的优势,同时借助 ICM-2D 实现地表洪涝过程的高精度模拟,大幅降低模型耦合的计算复杂度。这种耦合方式基于已有数据基础,整体建模实施难度更低,已有相关研究证实该耦合方式在北京、福州等城市城区暴雨内涝模拟中具备良好适用性^[30-31]。本文对 SWMM 与 ICM-2D 进行单向松散耦合的步骤为:①运行 SWMM 模拟城市降雨-产流-管网汇流过程;②利用 PySWMM 从 SWMM 输出的文件(.out 格式)中提取管网节点溢流流量时间序列数据,整理为 InfoWorks ICM 可以读取的入流文件(.csv 格式),作为 ICM-2D 模块的入流边界条件;③将 SWMM 的节点位置映射至 ICM-2D 模块的对应空间位置,作为地表漫流入流边界点;④结合研究区 DEM 数据,利用入流文件驱动 ICM-2D 模块开展地表二维漫流模拟,输出研究区洪涝淹没范围、最大水深、地表流速等关键模拟结果。为兼顾地表模拟精度与运算效率,将 ICM-2D 非结构化网格的最小单元面积设为 50 m²、最大单元面积设为 150 m²,最终生成三角形网格,数量为 3 414 951;同时将模型模拟时间步长设为 10 s,步长乘子设为 5,模拟总时长设

为 8 h。

研究区水文水动力耦合模型已在前期工作中完成构建、率定与验证^[32],选取 20040810、20050630 两场洪水用于参数率定,20070718、20130723 两场洪水用于验证,以黄台桥水文站实测流量数据为依据,结果显示纳什效率系数(NSE)不低于 0.84、决定系数(R^2)不低于 0.85,洪峰流量相对误差控制在 20%以内,洪峰出现时间绝对误差不超过 1 h,能够满足城市洪涝模拟的精度要求。此外,基于 20070718 场次暴雨模拟得到的积水片区与银座购物广场、顺河高架、北园高架、民生大街等实际灾区空间匹配度高,说明该模型可较为准确地复现极端暴雨下积水的空间分布规律。水文水动力耦合模型参数设置如下:不透水面、透水面曼宁系数分别为 0.005 0、0.328 1;不透水面、透水面洼蓄深度分别为 0.316 4、19.728 1 mm;最大、最小下渗率分别为 95.921 1、22.684 1 mm/h;衰减系数为 5.337 3;干燥时间为 0.600 1 d;管道、河道糙率分别为 0.051 9、0.010 8;地表曼宁糙率为 0.012 5。

2.2 精细化 GDP 分布格局重构

依据国民经济行业分类标准,对研究区的 GDP 进行第一、二、三产业划分,反映不同产业部门的经济贡献规模。本文先将 GDP 分为第一产业和第二、三产业两部分,再通过不同的空间化方法分别实现其精细化格局的重构,叠加第一、二、三产业的空间化结果,最终得到研究区重构的精细化 GDP 分布格局。

2.2.1 第一产业空间化

根据相关研究^[27,33-34],将第一产业的农、林、牧、渔业产值,分别对应到土地利用类型中的耕地、林地、草地、水域,通过栅格面积占比进行空间分配,计算公式为:

$$G_{1,ijk} = r_{ijk} G_{1,ij} \quad (1)$$

其中

$$r_{ijk} = A_{ijk} / \sum_{k=1}^n A_{ijk}$$

式中: r_{ijk} 为面积比例系数; A_{ijk} 为第 i 个区第 j 种土地利用类型第 k 个栅格的面积; n 为栅格数; $G_{1,ijk}$ 为第 i 个区第 j 种土地利用类型第 k 个栅格的第一产业 GDP; $G_{1,ij}$ 为第 i 个区第 j 种土地利用类型所对应的第一产业 GDP。

2.2.2 第二、三产业空间化

兴趣点和夜间灯光数据可直观表征某一地区的社会经济发展水平^[35],选取 9 类与经济高度相关的兴趣点数据和夜间灯光数据对第二、三产业进行空间化。首先通过核密度分析得到兴趣点空间集聚强度,与夜间灯光指数共同构成空间化指标,并进行标

准化处理以消除量纲差异;其次利用层次分析法确定每一指标的权重,休闲娱乐、餐饮美食、购物消费、酒店住宿、科教文化、旅游景点、商务住宅、运动健身、医疗保健、夜间灯光的权重分别为 0.053 5、0.139 3、0.191 8、0.037 2、0.043 3、0.020 6、0.215 3、0.031 6、0.158 2、0.109 2;最终将分区 GDP 分配至每个栅格。计算公式为:

$$G_{23,ik} = G_{23,i} W_{ik} / \sum_{k=1}^n W_{ik} \quad (2)$$

其中

$$W_{ik} = \sum_{m=1}^{10} w_m X_{m,ik}$$

式中: W_{ik} 为第 i 个区第 k 个栅格的综合权重; w_m 为第 m 项指标的层次分析法权重; $X_{m,ik}$ 为第 i 个区第 k 个栅格上第 m 项指标的标准化值; $G_{23,ik}$ 为空间化后第 i 个区第 k 个栅格的第二、三产业 GDP; $G_{23,i}$ 为第 i 个区的第二、三产业 GDP。

2.3 评价指标体系

从致灾因子危险性、孕灾环境危险性、承灾体脆弱性、区域防灾减灾能力 4 个维度构建评价指标体系。

a. 致灾因子危险性。本文选取河网密度和洪涝危险性作为表征致灾因子危险性的指标。“马路行洪”是城区洪涝高风险性的典型表现,参考夏军强等^[36-37]的研究,以淹没水深和流速为核心指标计算洪涝危险性值,计算公式为:

$$H_R = h(v + 0.5) + F \quad (3)$$

式中: H_R 为洪涝危险性值; h 为水深; v 为流速; F 为泥石流因子, $h \leq 0.25$ m 时 $F=0$, 0.25 m $< h \leq 0.75$ m 时 F 在耕地和草地取 0、林地取 0.5、建设用地取 1, $h > 0.75$ m 或 $v > 2$ m/s 时 F 在耕地和草地取 0.5、林

地和建设用地取 1。

b. 孕灾环境危险性。孕灾环境是洪涝灾害发生的环境因素,包括地形地貌以及植被疏密程度等。本文选取高程、坡度、NDVI 作为表征孕灾环境危险性的指标。

c. 承灾体脆弱性。承灾体是城市洪涝灾害形成的内因,决定了灾害损失程度,影响涉及人员生命健康与社会经济。本文选取 GDP、土地覆被承灾风险、人口密度和脆弱人群密度作为表征承灾体脆弱性的指标。

d. 区域防灾减灾能力。参考王浅宁等^[38-39]的研究,本文选取学校核密度、医疗机构核密度表征区域防灾减灾能力。学校与医疗机构可作为洪涝灾害发生时的应急避难场所,是洪涝灾害中人员疏散、医疗救助的关键载体。

3 结果与分析

3.1 城市洪涝过程模拟

采用济南市设计降雨公式(式(4))及芝加哥雨型构造设计降雨情景,降雨历时为 120 min,雨峰位置系数为 0.4^[40-41],时间步长选为 5 min,降雨重现期分别为 5、10、20、50、100 a 时,对应的设计降水量分别为 85.3、99.8、114.3、133.5、148.0 mm。

$$i = \frac{8.5119(1 + 0.932 \lg P)}{(t + 7.347)^{0.617}} \quad (4)$$

式中: i 为降雨强度; P 为降雨重现期; t 为降雨历时。

图 2 为不同降雨重现期下研究区淹没情况。由图 2 可见,不同降雨重现期下研究区内洪涝区域呈点状和线状分布,高水深区主要集中于城市主干道及下凹立交桥节点,如二环南路、二环东高架路、经

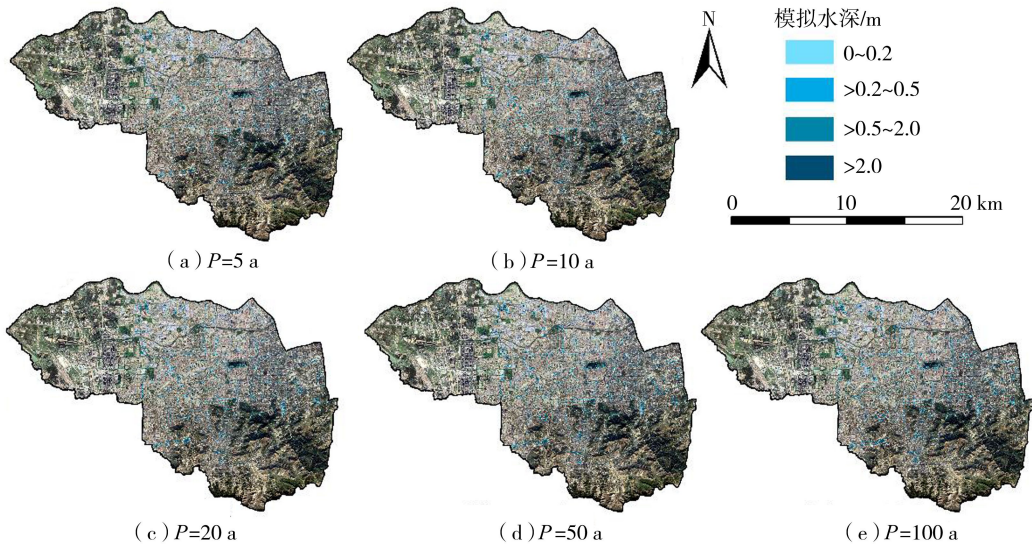


图 2 不同降雨重现期下研究区淹没情况

Fig. 2 Inundation situation of study area under different rainfall return periods

十路、浆水泉路、济南天桥立交、经二路下凹立交桥等。原因可归结为:①上述区域多邻近南部山区,强降雨发生时,山洪快速下泄,使这些路段成为天然行洪通道;②高架桥及立交桥下凹区域因地势低洼,形成地表径流汇集区;③城市道路以不透水下垫面为主,雨水入渗能力弱;④城区老旧排水管网存在设计标准偏低、管线老化等问题,排水能力不足。当降雨重现期从 5 a 增大至 100 a 时,淹没范围和水深呈现由点成线、连线成片的扩张与连通特征。降雨重现期为 5 a 时,积水主要呈散点状分布于纬十二路与胶济高铁交会的下凹立交桥、昆仑小学、济南大学和经十路,为孤立小范围积水;降雨重现期为 10~20 a 时,在济南天桥立交、北坦立交桥、腊山立交桥和浆水泉路新增部分积水点,积水点呈相连成片趋势;降雨重现期为 50~100 a 时,生产路立交、济南青少年宫、二环南路等地新增多处积水,研究区内大部分浅水区向深水区转化,多数积水点连通成片,沿城市主干道呈线状分布,洪涝影响范围从孤立节点扩展至城市交通干线。

本文所构建的洪涝模型模拟得到的积水点位与《济南水文年鉴》提供的常年积水较深的水位站位置吻合度较高,如昆仑小学站、北坦立交桥、腊山立交桥、生产路立交站、济南少年宫站等,且与李鹏等^[42]的研究结论较为一致,验证了模型在研究区具有较好的适应性,模拟结果可靠,可用于后续研究。

3.2 精细化 GDP 分布格局

图 3 为研究区精细化 GDP 分布格局。从产业划分结果来看,第一产业 GDP 分布格局呈现出边缘离散集聚的空间特征,其高值集中于流域西北部槐荫区与南部市中区、历城区,而中部历下区、天桥区核心城区部分第一产业 GDP 几乎为 0,这一分布格局与研究区第一产业的实际空间分布高度契合,反映出研究区第一产业的空间特征,同时体现了城市建成区“去农业化”的特点;第二、三产业 GDP 分布格局则表现出由中心向外梯度递减的特征,以历下区西部的济南市中心为核心,经十路城市发展轴与

商务核心区形成高值密集带,产值密度自核心区向外逐渐递减,同时核心区外围的经四路商圈、济南万象城商圈、经一路时代商业广场商圈等区域形成经济副中心,可承担部分区域经济职能,对推动济南市经济多元化发展与城市空间布局优化具有重要作用。总体而言,研究区 GDP 空间分布呈现显著异质性,其整体格局与第二、三产业 GDP 空间分布高度趋同,这一特征的核心原因在于研究区产业结构的主导性差异:第二、三产业在 GDP 构成中占据绝对主导地位,贡献了绝大部分产值,而第一产业产值占比极低,这与徐宗学等^[26]在深圳河流域的研究结论一致。此外,精细化 GDP 分布格局中的高经济密度区,与济南市中心商业圈、商务核心区及经十路城市发展轴等实际经济活跃区域高度契合,佐证了 GDP 空间化结果的合理性与可靠性,为后续洪涝风险评估提供了高精度承灾体经济数据。

3.3 洪涝风险评估

3.3.1 洪涝危险性等级

基于 SWMM-InfoWorks ICM-2D 耦合模型的模拟结果,参考廖如婷等^[30]的研究,依据洪涝危险性值进行危险等级划分:0~0.75、>0.75~1.25、>1.25~2.5、>2.5 分别为低、中、较高、高危险等级。图 4 为不同降雨重现期下研究区洪涝危险性等级空间分布。由图 4 可见,研究区洪涝危险性呈现显著的空间分异特征,较高、高危险等级区呈散点状集聚于北部市区,如天桥立交、二环南路、浆水泉路等区域,该区域洪涝危险性偏高的核心原因在于,强降雨过程中南部山区山洪快速向北部市区汇集,而市区下垫面以不透水面为主,雨水下渗能力弱,加之管网系统排水能力有限,无法及时排出超量雨水,导致管网溢流节点增多,最终在上述区域形成“马路行洪”,对行人、车辆及公共设施构成直接威胁。与之相反,南部山区及西北郊区以低危险等级为主,其中南部山区平均坡度较大,汇流排水通畅,西北郊区以绿地、农田等透水下垫面为主体,不透水面占比低、雨水下渗率高,两类区域均不易形成积水,因此洪涝危险性

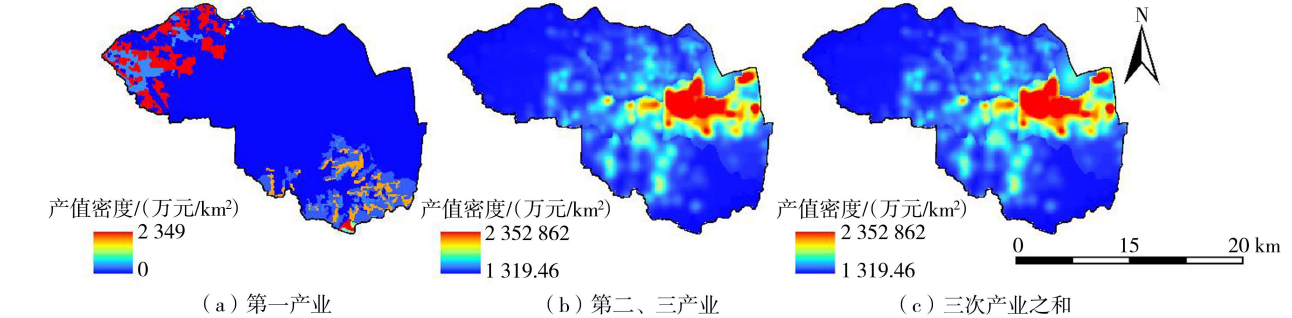


图 3 研究区精细化 GDP 分布格局

Fig. 3 Refined GDP distribution pattern of study area

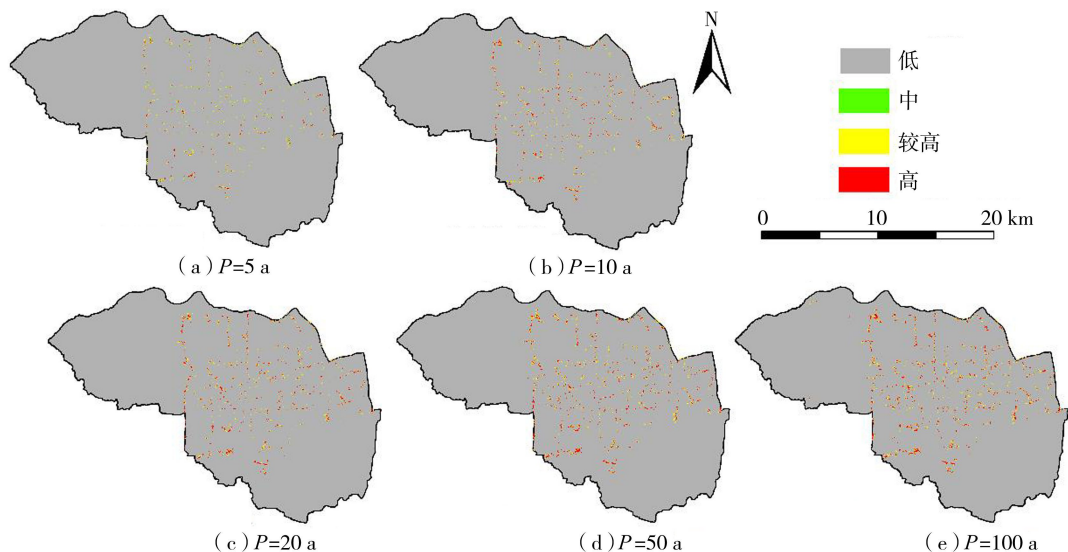


图 4 不同降雨重现期下研究区洪涝危险性等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of flood risk grades in study area under different rainfall return periods

处于较低水平。随着降雨重现期增大,研究区的洪涝危险性呈现出“范围扩张、等级升级”的变化规律:降雨重现期为 5 a 时,较高、高风险等级仅在北部市区零散分布,大部分地区为低风险等级;随着降雨重现期增大,大量低、中危险等级转化为较高、高风险等级,后者面积迅速扩张,逐渐从点状零散分布扩展为面状蔓延分布,当降雨重现期为 50、100 a 时,较高、高风险等级已呈片状大量分布于研究区内,其区域数量与面积显著增加,说明极端降雨强度的提升进一步凸显了地形、下垫面与排水系统的短板,洪涝危险性随之升级,高风险区面积不断扩大。

3.3.2 其他指标风险等级

在 11 个评估指标中,洪涝危险性、坡度、GDP、土地覆被承灾风险、人口密度、脆弱人群密度为正向指标,其余 5 个指标为负向指标。为方便评估,结合指标的正、负向属性,对除洪涝危险性之外的其他指标进行风险等级划分。参考舒心怡等^[37]的研究,土地覆被承灾风险按土地利用类型进行等级划分:水体为低风险,林地与草地为中风险,耕地为较高风险,建筑用地为高风险。其余指标则采用自然间断

点分级法划分为低、中、较高、高 4 个等级,自然间断点法属于聚类分析中单变量分类方法,根据数值统计分布规律进行分级,适用性强,在干旱、洪涝灾害风险等级划分中应用广泛^[13]。各指标风险等级划分标准见表 1,各指标风险等级空间分布如图 5 所示。

3.3.3 指标权重

耦合层次分析法与熵权法计算指标综合权重。河网密度、洪涝危险性、高程、坡度、NDVI、土地覆被承灾风险、人口密度、脆弱人群密度、GDP、学校核密度、医疗机构核密度的层次分析法权重分别为 0.0373、0.1309、0.0735、0.0887、0.0896、0.0411、0.1117、0.1117、0.1301、0.0582、0.1271;不同降雨重现期下指标熵权法权重和综合权重如表 2 所示。层次分析法确定的高权重指标依次为洪涝危险性、脆弱人群密度、人口密度、GDP、医疗机构核密度,熵权法确定的高权重指标依次为洪涝危险性、脆弱人群密度、人口密度、坡度、GDP。可见,主客观赋权法对洪涝风险关键影响指标的判断具有一致性,均将致灾因子危险性与承灾体脆弱性视为核心影响因素;但在次要影响因素上存在差异:层次分析法更侧

表 1 各指标风险等级划分标准

Table 1 Classification standard of risk grades for each indicator

风险等级	河网密度/(m/m ²)	高程/m	坡度/(°)	NDVI	人口密度/(人/hm ²)	脆弱人群密度/(人/hm ²)	GDP/(万元/km ²)	学校核密度	医疗机构核密度
低	>0.037~0.051	>303~561	0~6.125	>137~191	0~20.558	0~5.640	1319~130424	>74.967~172.221	>58.996~140.598
中	>0.025~0.037	>180~303	>6.125~13.611	>107~137	>20.558~49.722	>5.640~13.657	>130424~462406	>38.496~74.967	>31.428~58.996
较高	>0.008~0.025	>80~180	>13.611~24.727	>80~107	>49.722~83.188	>13.657~23.009	>462406~1209367	>13.508~38.496	>11.027~31.428
高	0~0.008	-18~80	>24.727~57.847	0~80	>83.188~121.913	>23.009~37.853	>1209367~2352862	0~13.508	0~11.027

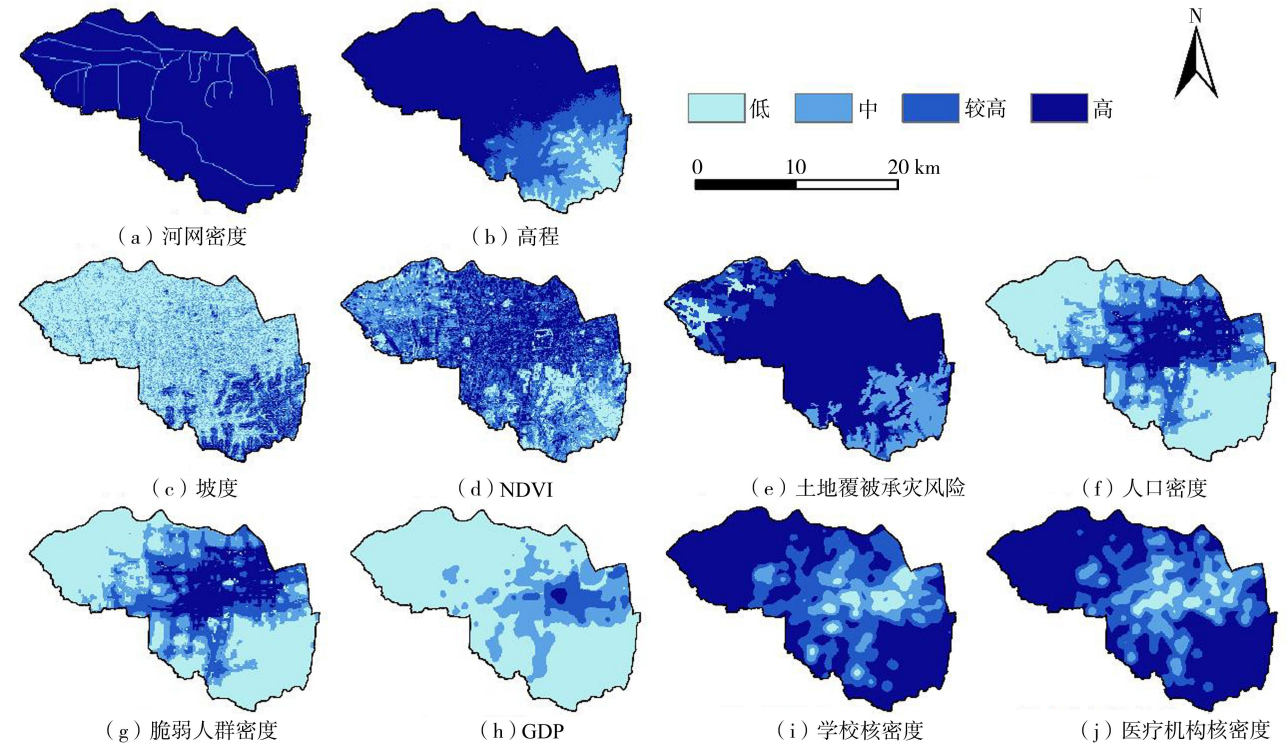


图 5 各指标风险等级空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of risk grades for each indicator

表 2 不同降雨重现期下指标熵权法权重和综合权重

Table 2 Index entropy weight method weight and comprehensive weight under different rainfall return periods

指标	熵权法权重					综合权重				
	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$	$P=20\text{ a}$	$P=50\text{ a}$	$P=100\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$	$P=20\text{ a}$	$P=50\text{ a}$	$P=100\text{ a}$
河网密度	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
洪涝危险性	0.6003	0.6102	0.6095	0.6067	0.6039	0.6394	0.6489	0.6483	0.6456	0.6429
高程	0.0055	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0033	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
坡度	0.0616	0.0601	0.0602	0.0606	0.0610	0.0445	0.0433	0.0434	0.0437	0.0440
NDVI	0.0119	0.0116	0.0116	0.0117	0.0118	0.0087	0.0084	0.0084	0.0085	0.0086
土地覆被承灾风险	0.0148	0.0144	0.0145	0.0146	0.0147	0.0049	0.0048	0.0048	0.0049	0.0049
人口密度	0.0758	0.0739	0.0740	0.0745	0.0751	0.0689	0.0671	0.0672	0.0676	0.0682
脆弱人群密度	0.0745	0.0726	0.0728	0.0733	0.0738	0.0677	0.0659	0.0661	0.0666	0.0670
GDP	0.1493	0.1456	0.1458	0.1469	0.1479	0.1580	0.1539	0.1541	0.1554	0.1565
学校核密度	0.0030	0.0029	0.0029	0.0029	0.0030	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
医疗机构核密度	0.0029	0.0028	0.0028	0.0029	0.0029	0.0030	0.0029	0.0029	0.0030	0.0030

重医疗机构核密度,熵权法则突出坡度的重要性。综合权重有效整合了致灾因子危险性、孕灾环境危险性、承灾体脆弱性及区域防灾减灾能力,弥补了单一主观或客观赋权法的局限性,权重分布更合理。

3.3.4 评估结果分析

引入 K -means 无监督聚类算法,通过计算数据点间的欧氏距离,识别综合风险特征相似的空间集群,使风险区划更贴合实际分布规律。基于指标风险等级划分结果和指标权重,将综合风险同样划分为低、中、较高、高 4 个等级。图 6 为不同降雨重现期下研究区综合风险等级空间分布。由图 6 可见,研究区综合风险分布呈现从城市中心向四周递减的圈层式风险格局,其中高风险区与高水深内涝区模

拟位置高度吻合,主要集中于二环南路、天桥立交、浆水泉路等城市主干道,这是由于洪涝危险性的综合权重达 0.6394~0.6489,为所有指标中最高,在洪涝风险评估中起主导作用,其空间分布对研究区综合风险评估结果影响显著。而较高风险区则大面积覆盖在主城区,这些地区人口密度、脆弱人群密度、GDP 高,发生洪涝灾害时,高密度人群处更易发生伤亡,高 GDP 区更易遭受经济损失。中风险区则围绕较高风险区进一步向外扩散,这些区域人口密度与经济发展程度相对较低,因而综合风险相对较低。低风险区位于研究区的西北和东南,其中西北为大片耕地,东南为山区,两地均人口稀少、建筑密度低、植被覆盖度高,洪涝灾害潜在损失较小。胡嘉

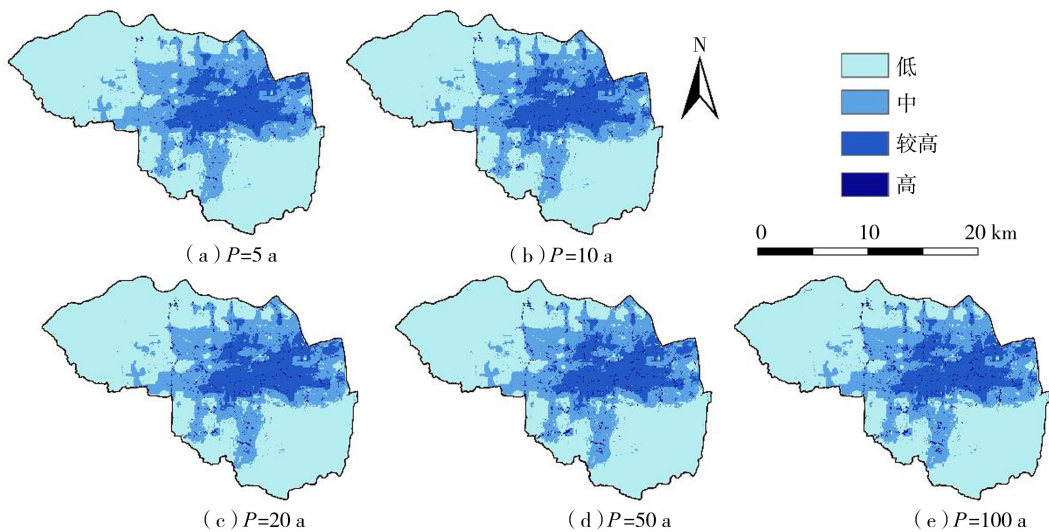


图 6 不同降雨重现期下研究区综合风险等级空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of comprehensive risk grades in study area under different rainfall return periods

玮等^[27]和王京晶等^[43]分别针对黄台桥以上流域、济南市区开展研究,得出了类似的风险分布规律,佐证了本文综合风险评估结果的合理性。

统计不同降雨重现期下各综合风险等级面积变化情况,结果见表 3。由表 3 可见,随着降雨重现期增大,高风险区持续扩张,其面积从 5 a 的 2.67 km² 逐步扩大至 100 a 的 6.49 km²,每 10 a 扩张 0.40 km²。分阶段来看,低降雨重现期(5~10 a)阶段,高风险区扩张最为剧烈,每 10 a 扩张 2.72 km²;降雨重现期为 10~20 a、20~50 a、50~100 a 阶段每 10 a 分别扩张 0.71、0.33、0.15 km²,整体呈现先快后慢的扩张特征,说明低降雨重现期情况下,高风险区面积对降雨强度增强的响应更为敏感。高风险区面积占比累计增长了 1.17%,是所有综合风险等级中扩张最显著的,而其他等级风险区面积均呈小幅波动下降趋势。这一变化特征表明:降雨重现期的增大主要驱动了高风险区的扩张,而中、低风险等级区的面积相对稳定。究其原因,极端暴雨主要提升了高危险性区域(如低洼主干道、城市下凹立交桥)的综合风险等级,而低、中风险区的洪涝危险性低,其孕灾环境危险性、承灾体脆弱性和区域防灾减灾能力相对稳定,综合风险等级提升的阈值更高。

表 3 不同降雨重现期下各综合风险等级面积统计结果

Table 3 Statistical results of comprehensive risk grade areas under different rainfall return periods

P/a	面积/km ²				面积占比/%			
	低	中	较高	高	低	中	较高	高
5	192.87	86.29	44.35	2.67	59.13	26.46	13.60	0.82
10	192.70	85.59	43.86	4.03	59.08	26.24	13.45	1.23
20	192.55	85.27	43.61	4.74	59.03	26.14	13.37	1.45
50	192.32	84.82	43.30	5.72	58.96	26.01	13.28	1.75
100	192.25	84.48	43.14	6.49	58.91	25.89	13.22	1.99

结合图 6 与表 3 进一步分析,低降雨重现期时,高风险区以孤立散点的形式集中于昆仑小学、济南大学及部分下凹立交桥;随着降雨重现期增大,高风险区逐步扩展,沿生产路、二环南路、经十路等城市主干道呈线状蔓延,影响范围从局部散点演变为城市廊道四周。这一变化的根本原因是极端暴雨下城市管网排水能力有限,原本独立的高风险点通过节点溢流连通,最终形成连片高风险区。尽管高风险区随降雨重现期增大持续扩张,但研究区内从城市中心向四周递减的综合风险格局保持相对稳定;不同降雨重现期下,低风险区固定于研究区西北郊区与南部山区,其空间范围几乎无变化;中风险区呈环状围绕较高风险等级区分布,仅随高风险区扩张出现微小的边界调整;较高风险区则稳定覆盖主城区的高人口密度和高 GDP 区,未向低风险区大幅渗透。这是由于孕灾环境、承灾体指标整体具有静态稳定性:地形地貌、植被覆盖、土地覆被、人口与经济等关键指标均属于长期缓慢变化的地理、社会经济要素,空间结构相对稳定;降雨重现期的变化主要改变洪涝危险性,难以在短时间内改变孕灾环境、承灾体的空间分布结构,因此研究区综合风险分布基本保持稳定的圈层式格局。

4 结 论

a. 构建了 SWMM-InfoWorks ICM-2D 耦合模型,用于济南市小清河黄台桥以上流域的洪涝过程模拟,融合多源数据重构了 100 m 分辨率跨行政区精细化 GDP 分布格局,将洪涝危险性与精细化 GDP 分布格局纳入评估体系,耦合主客观赋权法开展综合风险分析。突破了传统评估中 GDP 空间分辨率偏低、洪涝模拟与精细化承灾体融合不足的局限,实

现了洪涝危险性刻画与承灾体经济价值精细表达的双重提升。

b. 研究区洪涝综合风险呈从城市中心向四周递减的圈层格局,高风险区集中于城市主干道及下凹立交桥区域,较高风险区与人口密集、高 GDP 区高度重叠,低风险区主要分布于西北郊区与南部山区。随着降雨重现期从 5 a 增至 100 a,高风险区面积由 2.67 km² 扩张至 6.49 km²,空间形态从局部散点逐步沿交通廊道呈线状扩张;高风险区扩张速率呈先快后慢的特征,5~10 a 阶段增速达每 10 a 2.72 km²,50~100 a 阶段降至每 10 a 0.15 km²,表明低降雨重现期条件下,高风险区面积对降雨强度增强的响应更为敏感;其余等级风险区因孕灾环境、承灾体特征稳定,空间范围无明显变化。

c. 本文将洪涝危险性分析与精细化 GDP 分布格局重构相结合,既精准捕捉了高风险区从孤立低洼点向连片洪涝汇流区的演变机制,弥补了仅依赖人口、土地利用等静态指标无法刻画风险动态变化的缺陷;又实现了对承灾体经济价值的微观刻画,准确识别出济南市商务核心区、经十路城市发展轴等高经济密度区域的风险特征,使风险评估更贴合城市实际情况。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (Zhang Jianyun, Wang Yintang, He Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[2] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报,2016,47(3):292-301. (Xia Jun, Shi Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):292-301. (in Chinese))

[3] Jamali B, Löwe R, Bach P M, et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model[J]. Journal of Hydrology,2018,564:1085-1098.

[4] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790. (Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779-790. (in Chinese))

[5] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging

disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[6] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (Xu Zongxue, Ye Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes:principle,models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 381-392. (in Chinese))

[7] 严心如,卢雯珺,李锦辉,等. 面向地铁站受淹分析的地表-地下空间耦合模拟方法[J]. 水资源保护,2025,41(6):42-51. (Yan Xinru, Lu Wenjun, Li Jinhui, et al. Surface-underground space coupling simulation method for subway station flooding analysis [J]. Water Resources Protection,2025,41(6):42-51. (in Chinese))

[8] 杨芳,李旭东,宋利祥,等. 城市暴雨洪涝灾害链风险评估方法[J]. 水资源保护,2025,41(5):52-60. (Yang Fang, Li Xudong, Song Lixiang, et al. Risk assessment methodology for rainstorm-induced urban flood disaster chain[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):52-60. (in Chinese))

[9] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):172-181. (Liu Jiahong, Mei Chao, Liu Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):172-181. (in Chinese))

[10] Chen Jialei, Chen Wenjie, Huang Guoru. Assessing urban pluvial flood resilience based on a novel grid-based quantification method that considers human risk perceptions[J]. Journal of Hydrology,2021,601:126601.

[11] 李致家,李安琪,姚成,等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):10-17. (Li Zhijia, Li Anqi, Yao Cheng, et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025,53(5):10-17. (in Chinese))

[12] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报,2022,53(7):757-768. (Cheng Xiaotao, Liu Changjun, Li Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(7):757-768. (in Chinese))

[13] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (Huang Guoru, Luo Haiwan, Lu Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in

- Chinese))
- [14] 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))
- [15] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):713-724. (in Chinese))
- [16] 高玉琴,王慧,刘钺,等.基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J].水利水电科技进展,2024,44(6):6-12. (Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):6-12. (in Chinese))
- [17] 黄国如,李碧琦.基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):1-6. (Huang Guoru, Li Biqi. Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1):1-6. (in Chinese))
- [18] 唐清竹,徐宗学,王京晶,等.深圳河流域城市洪涝风险分析[J].水力发电学报,2023,42(6):13-22. (Tang Qingzhu, Xu Zongxue, Wang Jingjing, et al. Urban flood risk assessment for Shenzhen River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6):13-22. (in Chinese))
- [19] Ye Chenlei, Xu Zongxue, Lei Xiaohui, et al. Assessment of urban flood risk based on data-driven models: a case study in Fuzhou City, China [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 82:103318.
- [20] 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))
- [21] Zhu Wei, Cao Zhe, Kawaike K, et al. A novel urban flood risk assessment framework based on refined numerical simulation technology [J]. Journal of Hydrology, 2024, 645(10):132152.
- [22] 陈丽慧,陈洁,高郭平.滨海城市洪涝风险评估:以上海临港新城为例[J].长江科学院院报,2025,42(8):84-93. (Chen Lihui, Chen Jie, Gao Guoping. Flood risk assessment in coastal cities: a case study of Lingang new City, Shanghai [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(8):84-93. (in Chinese))
- [23] Zhou Ying, Yi Pingtao, Li Weiwei, et al. Assessment of city sustainability from the perspective of multi-source data-driven [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 70(9):102918.
- [24] Georg I, Blaschke T, Taubenböck H. Spatial delineation of urban corridors in North America: an approach incorporating fuzziness based on multi-source geospatial data [J]. Cities, 2023, 133:104129.
- [25] Liu Ziyang, Han Ling, Liu Ming. High-resolution carbon emission mapping and spatial-temporal analysis based on multi-source geographic data: a case study in Xi'an City, China [J]. Environmental Pollution, 2024, 361:124879.
- [26] 徐宗学,唐清竹,陈浩,等.基于精细化空间格局的城市承灾体脆弱性评估[J].水科学进展,2024,35(1):38-47. (Xu Zongxue, Tang Qingzhu, Chen Hao, et al. Assessment on the vulnerability of urban hazard bearing body based on refined spatial patterns [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1):38-47. (in Chinese))
- [27] 胡嘉玮,徐宗学,陈浩,等.基于精细化GDP格局的城市洪涝风险评估:以济南市黄台桥流域为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(6):1480-1490. (Hu Jiawei, Xu Zongxue, Chen Hao, et al. Urban flood risk assessment based on refined GDP spatial pattern: a case study of Huangtaiqiao River basin, Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(6):1480-1490. (in Chinese))
- [28] 李鹏,徐宗学,叶陈雷,等.济南市1972—2016年降水特性[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):237-245. (Li Peng, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Characteristics of precipitation in Jinan City from 1972 to 2016 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2):237-245. (in Chinese))
- [29] 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))
- [30] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等.基于SWMM和InfoWorks ICM模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J].水资源保护,2023,39(3):109-117. (Liao Ruting, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):109-117. (in Chinese))
- [31] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等.基于SWMM和InfoWorks ICM的城市街区洪涝模拟与分析[J].水资源保护,2023,39(2):87-94. (Ye Chenlei, Xu Zongxue, Lei Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J].

- Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 87-94. (in Chinese))
- [32] 胡嘉玮,徐宗学,陈浩,等. 济南市小清河黄台桥以上流域城市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2026, 62 (3): 356-366. (Hu Jiawei, Xu Zongxue, Chen Hao, et al. Urban flood simulation and risk analysis in upstream Huangtaiqiao area of the Xiaoqinghe River basin, Jinan City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2026, 62 (3): 356-366. (in Chinese))
- [33] 刘红辉,江东,杨小唤,等. 基于遥感的全国 GDP 1km 格网的空间化表达[J]. 地球信息科学, 2005, 7 (2): 120-123. (Liu Honghui, Jiang Dong, Yang Xiaohuan, et al. Spatialization approach to 1km grid GDP supported by remote sensing [J]. Geo-Information Science, 2005, 7 (2): 120-123. (in Chinese))
- [34] 钟凯文,黎景良,张晓东. 土地可持续利用评价中 GDP 数据空间化方法的研究[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32 (3): 10-12. (Zhong Kaiwen, Li Jingliang, Zhang Xiaodong. GDP spatialization in land sustainable use assessment [J]. Journal of Geomatics, 2007, 32 (3): 10-12. (in Chinese))
- [35] Bennett M M, Smith L C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 176-197.
- [36] 夏军强,董柏良,周美蓉,等. 城市洪涝中人体失稳机理与判别标准研究进展[J]. 水科学进展, 2022, 33 (1): 153-163. (Xia Junqiang, Dong Boliang, Zhou Meirong, et al. Review on instability mechanisms and criteria of human body in floodwaters [J]. Advances in Water Science, 2022, 33 (1): 153-163. (in Chinese))
- [37] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等. 考虑空间异质性特征的城市洪涝动态风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60 (3): 375-385. (Shu Xinyi, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Dynamic risk of urban flooding/ waterlogging with attention to spatial heterogeneity of the underlying surface [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60 (3): 375-385. (in Chinese))
- [38] 王浅宁,周之仪,吴剑,等. 融合社会信息的城市暴雨内涝风险评估[J]. 水力发电学报, 2023, 42 (7): 84-95. (Wang Qianning, Zhou Zhiyi, Wu Jian, et al. Risk evaluation of urban flooding with social information [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (7): 84-95. (in Chinese))
- [39] 段亭亭,李鹏峰,邱顺添,等. 基于多源数据的长春市洪涝灾害应对能力评估与提升[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (6): 41-48. (Duan Tingting, Li Pengfeng, Qiu Shuntian, et al. Assessment and enhancement of flood disaster response capability in Changchun City based on multi-source data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (6): 41-48. (in Chinese))
- [40] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28 (6): 820-828. (Hou Jingming, Guo Kaihua, Wang Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (6): 820-828. (in Chinese))
- [41] 宋鹏越,徐宗学,李鹏,等. 土地利用变化对流域产汇流的影响:以济南市黄台桥以上流域为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54 (12): 143-154. (Song Pengyue, Xu Zongxue, Li Peng, et al. Impact of land use changes on runoff generation/routing: case study in the upstream of Huangtaiqiao in Jinan City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54 (12): 143-154. (in Chinese))
- [42] 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))
- [43] 王京晶,徐宗学,李福林,等. 济南市主城区城市洪涝风险分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42 (1): 22-26. (Wang Jingjing, Xu Zongxue, Li Fulin, et al. Urban flooding/ waterlogging risk analysis in the downtown area of Jinan City [J]. Water Resources and Power, 2024, 42 (1): 22-26. (in Chinese))

(收稿日期:2026 - 03 - 06 编辑:王芳)