

平凉市典型片区雨涝承载力评价与障碍因子分析

李俊奇^{1,2}, 卜云博^{1,2}, 李湘俞^{1,2}, 毛 坤³, 曹涵雨^{1,2}, 王美娜⁴, 马金明⁴

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室;
2. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心; 3. 北京北建大建筑设计研究院有限公司;
4. 北京清华同衡规划设计研究院有限公司市政规划研究所)

摘要:针对黄土高原河谷城市地形起伏大、汇流集中、数值模拟与系统评价衔接不足的问题,以平凉市典型片区为研究区,构建了耦合 InfoWorks ICM 模拟、熵权-TOPSIS 评价与障碍度诊断的雨涝承载力评价框架,评价了研究区的雨涝承载力,并分析了主要障碍因子。结果表明:在降雨重现期为 20 a 的条件下,研究区的 26 个一级排水分区中有 24 个发生不同程度内涝,淹没面积达 0.9 km²,占研究区总面积的 13.78%,内涝风险空间分异显著,受南高北低阶梯形地形控制明显;研究区雨涝承载力总体呈南高北低格局,南北过渡带的中承载力分区是改善研究区整体雨涝承载力空间格局的重要衔接纽带,径流系数、排水管渠密度、蓝绿空间率和高程是制约承载力提升的主要障碍因子。
关键词:城市雨涝承载力;InfoWorks ICM;障碍度;黄土高原;平凉市

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2026)05-0042-08

Evaluation of stormwater carrying capacity and analysis of obstacle factors in typical area of Pingliang City//Li Junqi^{1,2}, Bu Yunbo^{1,2}, Li Xiangyu^{1,2}, Mao Kun³, Cao Hanyu^{1,2}, Wang Meina⁴, Ma Jinming⁴(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture; 3. Architecture Design and Research Institute of BUCEA Co., Ltd.; 4. Department of Municipal Planning, Beijing Tsinghua Urban Planning and Design Institute)

Abstract: In response to the problems of large terrain undulations, concentrated runoff concentration, and insufficient connection between numerical simulation and system evaluation in urban valleys on the Loess Plateau, a stormwater carrying capacity evaluation framework was constructed by coupling InfoWorks ICM simulation, entropy weighting TOPSIS evaluation, and obstacle diagnosis in a typical area of Pingliang City. The stormwater carrying capacity of the study area was evaluated and the main obstacle factors were analyzed. The results show that under the condition of a rainfall return period of 20 a, 24 out of 26 primary drainage subdivisions in the study area experienced varying degrees of waterlogging, with a submerged area of 0.9 km², accounting for 13.78% of the total area of the study area. The spatial differentiation of waterlogging risk is significant, and it is strongly controlled by the stepped terrain pattern with characteristics of higher in the south and lower in the north. The overall stormwater carrying capacity of the study area shows a pattern of high in the south and low in the north. The middle carrying capacity subdivisions of the north-south transition zone are the important connecting belt to improve the spatial pattern of the overall stormwater carrying capacity of the study area. The runoff coefficient, drainage pipe density, blue-green space ratio, and elevation are the main obstacles that restrict the improvement of carrying capacity.

Key words: urban stormwater carrying capacity; InfoWorks ICM; obstacle degree; the Loess Plateau; Pingliang City

近年来,在全球气候变化与快速城市化的双重驱动下,极端降雨事件频发,城市内涝风险日益加剧,已成为制约我国城市安全与可持续发展的突出短板^[1-2]。这一现象在自然本底条件特殊、生态环境脆弱的地区尤为严峻。黄土高原沟壑区的典型河谷

城市,如平凉、延安、天水等,其城市空间受狭长河谷地形严重制约,地表坡度大、汇流时间短,加之黄土湿陷性等地质特点,内涝易发性高,且易诱发边坡失稳等次生灾害,形成独特的灾害链风险^[3]。

国内外学者已围绕城市内涝防治开展了广泛研

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3800500);北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108)
作者简介:李俊奇(1967—),男,教授,博士,主要从事海绵城市与内涝治理研究。E-mail:lijunqi@bucea.edu.cn

究。早期研究主要基于历史灾情资料与地理信息系统方法,对城市内涝风险进行识别与划分^[4-7]。随着海绵城市、低影响开发等可持续雨水管理理念的引入,对城市内涝防治的研究不断深化^[8]。从研究方法看,主要包括两类:一是基于水文水动力模型的精细化模拟方法(如 InfoWorks ICM、SWMM、MIKE 系列模型),其能够对降雨、产流、汇流、积水等物理过程进行定量描述,为分析城市内涝形成过程提供重要支撑^[9-12];二是基于指标体系的城市承灾能力或韧性评价方法,其重点在于从系统整体层面综合刻画城市空间结构、工程设施配置及其对内涝风险的响应特征^[13-18]。尽管相关研究取得了一定进展,但仍存在不足之处:一方面,既有研究案例多集中于东部平原地区或大型城市,对黄土高原沟壑区受地形条件显著制约的河谷城市研究相对较少,对其内涝形成特征及风险表现尚缺乏系统认识,相关研究未能充分体现此类城市地形驱动效应强、行泄通道狭窄、灾害链风险突出等特征;另一方面,在评价方法上,部分研究或将机理模型与多要素系统评价模型分离,导致评价结果缺乏坚实的物理过程支撑,或仅采用宏观统计数据,难以揭示城市内部承载力的精细分异及其关键制约因素。

鉴于此,本文选取黄土高原沟壑区具有代表性的平凉市典型片区为研究区,将 InfoWorks ICM 模拟结果引入承载力评价指标体系,构建耦合城市水文水动力模拟与多要素系统评价的雨涝承载力评估框架。基于 InfoWorks ICM 模拟,对重现期为 20a 的设计降雨条件下的研究区内涝过程进行模拟,获取淹没面积、内涝积水体积等反映内涝特征的精细化空间指标;在此基础上,结合自然地理条件、地表水文调节能力与工程基础设施特征,构建雨涝承载力评价指标体系,并采用熵权-TOPSIS 法对研究区雨涝承载力的空间分异特征进行定量评价,进一步引入障碍度分析识别制约承载力提升的主要障碍因子,旨在为黄土高原沟壑区及类似地形河谷城市的内涝

风险防控与城市雨涝承载力提升提供可借鉴的技术思路与实践参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

平凉市位于甘肃省东部,地处陕、甘、宁三省(区)交汇处,地理位置为 34° 54' N ~ 35° 46' N、105° 20' E ~ 107° 51' E,横跨陇山(关山),东邻陕西咸阳,西连甘肃定西、白银,南接陕西宝鸡和甘肃天水,北倚宁夏固原和甘肃庆阳,是古“丝绸之路”必经重镇,素有陇上“旱码头”之称^[19]。平凉市历史上曾多次遭受暴雨洪涝灾害,1999 年 7 月 13—14 日,中东部暴雨造成崆峒区等地受灾,直接经济损失 708.28 万元;2005 年 6 月 30 日,强降雨致全市 59 个乡镇受灾,受灾人口达 32.13 万人;2010 年 7 月 23 日,区域性大暴雨造成 14 人死亡,直接经济损失约 1.45 亿元^[20-21]。历史灾害事件表明,平凉市在强降雨条件下面临较高洪涝风险,具有较强的雨涝敏感性。

研究区位于平凉市中西部,为红峰路以东、天馨路以西、泾河以南、青兰高速以北及泾河以北部分区域,面积约 6.53 km²(图 1)。研究区南高北低、西高东低,地势从西南到东北呈阶梯形下降,海拔为 1358.45~1468.94 m,落差最大处达 40 m;整体坡度为自西南向东北降低,坡度范围为 0°~60.96°,90% 的区域坡度范围为 0°~7.43°。研究区地处陇东黄土高原丘陵沟壑区,土壤以黄土母质为核心基底,受区域气候、地形及城市建设扰动等多重因素影响,土壤特性兼具黄土区土壤的典型自然属性与城市建成区的人为改造特征^[22-23]。黄绵土占比 90% 以上,是研究区最主要的土壤类型,广泛分布于塬面、丘陵坡地、台地,也是城市建成区的基底土壤。靠近泾河的区域黄土层(多种次生黄土)较薄,渗透系数为 1.2×10⁻⁸~6.0×10⁻⁷ m/s,渗透性较差;下层为卵砾石,渗透系数为 5.0×10⁻⁶ m/s,渗透性较好^[24]。

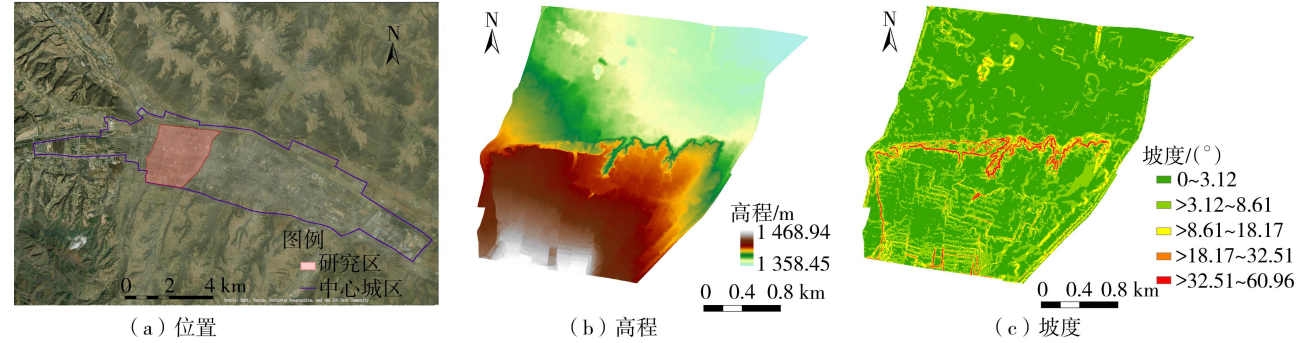


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文使用数据主要包括基础地理数据、水文气象数据、排水系统数据、土地利用与城市建设数据等。基础地理数据来源于平凉市自然资源局,以平凉市中心城区 1 : 500 地形图为基础,利用 ArcGIS 生成 2 m×2 m 精度的数字高程模型,并提取高程、坡度和洼域等特征;水文气象数据包括依据《平凉市中心城区暴雨强度公式技术报告》确定的设计暴雨参数及 1991—2020 年逐日降水资料,来源于平凉市住房和城乡建设局、平凉市气象局;排水系统数据来源于平凉市住房和城乡建设局,包括排水管渠、检查井和排放口等要素资料,平凉市雨水管渠建设标准为 2 年一遇,重要地区按 5 年一遇执行;土地利用与城市建设数据来源于平凉市自然资源局,包括不透水面分布、建筑密度和蓝绿空间率等,基于平凉市中心城区 2021 年第三次全国国土调查数据,辅以现场踏勘和无人机采集资料,通过 ArcGIS 空间分析获得。各类数据时间基准一致,能够满足雨涝过程模拟与承载力评价的精度要求。

2 研究方法

2.1 InfoWorks ICM 模型构建

InfoWorks ICM 模型主要包括降雨径流模块、管渠水流模块、河道水力模块、地表淹没模块、实时控制模块及构筑物模块等,可以实现管渠系统与河道的交互耦合,能较为真实地模拟地下排水管渠系统与雨水径流之间的相互作用^[25]。

一维排水系统模型主要用于描述雨水在管渠、河道及节点中的水力运动过程,可计算管渠流量、水位、充满度以及节点顶托和溢流量等水力特征值。构建时须先进行排水系统概化,主要包括节点及管道连接两方面。节点主要包括检查井、蓄水设施、出水口等,管道连接包括管渠系统、河道等。本文在概化过程中,为了突出对区域排水骨架和分区间排水能力差异起主要控制作用的主要管渠系统,避免因末端零散小支管连通关系复杂、资料完整性不足而引入额外不确定性,删除了小于 DN200 的管道;考虑到雨水算子的位置、连通关系及进水能力等精细参数难以完整获取,采用集总表达方式有助于避免伪精细化问题,剔除了雨水算子。同时,假设管道和检查井无结构损坏,经及时清淤,管内不存在沉积物。研究区排水系统概化结果见图 2。

InfoWorks ICM 为分布式水文模型,构建时须根据 DEM 数据进行排水分区划分。考虑到城市化建设过程中,大量不透水面(如建筑屋面、道路广场等)的形成显著改变了原有下垫面特征与地表汇流

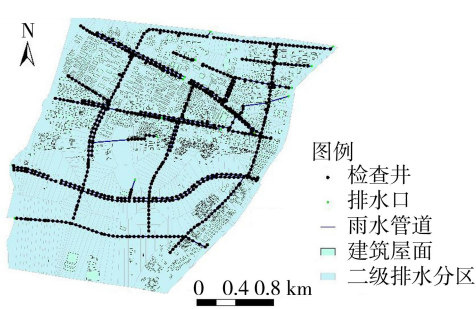


图 2 研究区排水系统概化结果

Fig. 2 Generalized result of drainage system of study area 路径,研究区内降雨产流与汇流过程呈现明显的空间非均质性。依据城市主要道路、河流水系对一级排水分区进行划分。划分过程中综合考虑水文连通性一致、排水路径相对独立、下垫面特征相同且空间尺度与模型精度相适配等原则,保证各分区内部水文与用地特征相对一致、分区之间差异性显著。最终将研究区划分为 26 个一级排水分区,既能有效反映研究区内部不透水率、地形条件及排水条件的空间差异特征,又避免因分区过粗而掩盖局部内涝风险差异,或因分区过细而增加模型参数的不确定性与计算复杂度。

在 26 个一级排水分区的基础上,结合实际管渠布置范围,使用泰森多边形法划分初始二级排水分区^[26]。进而,以主次干道和连续建筑边界作为地表径流分隔或转折边界,对跨越道路、穿越大体量建筑或与实际地表汇流方向明显不一致的初始分区进行分割;对面积过小、形态狭长或缺乏独立排水路径的零散分区,结合邻近接纳节点、地势条件及实际排水方向进行合并或重分配;同时保证修正后的每个二级排水分区内部下垫面组成和汇流路径相对一致,并与主要排水节点形成较明确的对应关系;最后确定最终的二级排水分区。本文二级排水分区数量为 845。

二级排水分区的产汇流计算基于综合径流系数,产汇流模型选用暴雨洪水管理模型(SWMM),利用非线性水库法模拟不同集水区的各种地形坡度下的汇流特征。根据 GB 50014—2021《室外排水设计标准》,在进行内涝防治设计校核时,当设计暴雨重现期为 20~30 a 时,宜将径流系数提高 10%~15%。综合考虑研究区下垫面情况和模型模拟效率等因素,将研究区的产流表面类型概化为建筑屋面、路面、林田绿地、水域等 4 种(表 1),进而计算得到研究区综合径流系数为 0.66。

当排水系统过载并发生节点溢流时,一维排水系统模型能够模拟溢流量及其随时间的变化过程,为地表积水模拟提供水量边界条件。但由于其未对

表 1 不同下垫面类型的产汇流参数

Table 1 Runoff generation and concentration parameters for different land cover types

下垫面类型	面积占比/%	曼宁系数	雨量径流系数
建筑屋面	49.13	0.016	0.94
路面	12.82	0.017	0.94
林田绿地	36.55	0.150	0.17
水域	1.50	0.030	1.00

地表水流运动进行连续的二维空间离散,因此不能直接表征溢流水体在复杂城市地表上的扩散、汇集和消退过程,也无法直接获得连续的积水范围及积水深度空间分布^[27]。二维地表水动力模型依据地形高程及地表空间特征模拟地表水流运动,能够反映道路、建筑物及其他地表设施对积水流向和扩散过程的影响,适用于分析复杂城市地形条件下的积水范围、积水深度及地表水流路径。在城区暴雨模拟过程中,地表径流可汇入地下排水系统,当管渠输排能力不足时,水流又可通过节点溢流返回地表^[28]。基于此,将一维排水系统模型与二维地表淹没模型进行耦合,以节点作为地下排水系统与地表之间的水量交换界面。

受研究区历史暴雨过程下连续积水深度、积水范围及排水系统运行监测数据获取条件限制,研究未能开展严格意义上的事件级模型率定。为尽可能提高模型结果的可靠性,模型参数的设定主要依据国家相关技术规范、已有研究成果^[2,29]及研究区下垫面实际情况确定。其中,不同下垫面类型的径流系数、糙率参考 GB 50014—2021《室外排水设计标准》及黄土高原地区城市内涝模拟相关研究成果^[30]进行取值,并结合土地利用现状进行适当调整。

2.2 雨涝承载力评价指标体系建立

城市内涝严重影响人类的生命财产安全,对城市建设有极大的破坏作用。毛坤^[31]的研究提出了城市雨涝承载力(urban stormwater carrying capacity, USCC),指城市空间系统在给定降雨情景下,对降雨径流进行调节、吸纳与排泄的综合能力,是自然地理约束与人为建设活动长期耦合作用的结果。从水文过程角度看,雨涝问题的发生并非单一因素所致,而是由降雨产流、地表汇流、空间调蓄、工程排放等多个环节共同决定^[32]。因此,对城市雨涝承载力的评价有必要立足雨水响应的全过程,构建能够系统表征城市对暴雨扰动适应能力的评价指标体系。通过对内涝成因及其影响因素的分析,将研究区内反映城市自然地理特征、地表水文调节能力、工程基础设施等的基础数据分解为 7 项具体指标,从而建立研究区雨涝承载力评价指标体系,如图 3 所示(图中“+、-”表示指标分别为正向、负向指标)。

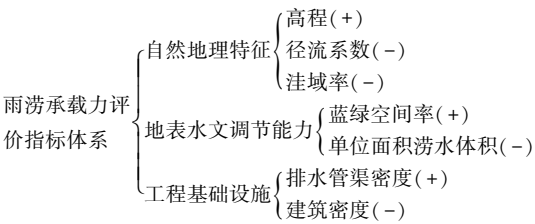


图 3 雨涝承载力评价指标体系

Fig. 3 Evaluation indicator system for stormwater carrying capacity

指标层中,高程为一级排水分区平均高程,用于表征地形对径流外排影响的重力条件;径流系数为分区综合径流系数,用于表征下垫面的综合产流能力;洼域率为低洼区域面积与分区总面积之比,其中低洼区域指平均高程较周边低 1 m 及以上的区域,用于表征局地滞水倾向;蓝绿空间率为林田绿地与水域面积之和占分区总面积的比例,用于表征下渗、滞蓄和缓释能力;单位面积涝水体积为分区内涝积水体积与分区面积之比,用于表征积水情况;排水管渠密度为分区管渠总长度与分区面积之比,用于表征排水设施完善程度;建筑密度为建筑屋面面积与分区面积之比,用于表征开发强度及硬化程度。

评价指标沿着自然地形约束—下垫面产流形成—空间调蓄缓冲—工程排水—积水结果表征的过程链条共同作用于城市雨涝承载力。其中,高程、洼域率属于自然本底约束指标,主要反映研究区先天地形条件对雨水汇流路径、汇水方向及局地滞水空间的控制作用;径流系数、建筑密度属于空间结构、下垫面特征指标,前者反映不同下垫面条件下的综合产流响应,后者表征城市开发强度及硬化程度,二者共同体现城市建设活动对自然水文过程的重塑作用;蓝绿空间率属于生态调蓄指标,反映城市通过绿地、水体等蓝绿空间对降雨径流进行下渗、滞蓄和缓释的能力;排水管渠密度属于工程技术设施指标,主要表征排水系统的建设完善程度及雨水外排效率;单位面积涝水体积则属于结果响应指标,是地形条件、下垫面特征、生态调蓄能力与工程排放能力共同作用的综合表现。

2.3 指标权重确定与多要素系统评估

在构建雨涝承载力评价指标体系的基础上,利用熵权法客观确定各指标权重,并引入 TOPSIS 综合评价方法,以 26 个一级排水分区为评价单元,对研究区的雨涝承载力水平进行定量评估。首先,依据指标的正、负向对 7 项指标进行极差标准化,对标准化结果为 0 的情形赋予 10^{-6} ,以避免后续熵值计算出现无意义结果;其次,采用熵权法计算各指标权重,并将权重用于 TOPSIS 评价,计算各分区与最优方案的相对接近度,得到雨涝承载力得分,得分越大,表示

承载力越高。具体计算方法见文献[33-34]。

2.4 障碍度诊断

仅依靠雨涝承载力得分难以揭示分区雨涝承载力偏低的内在原因及其主导限制因素。为进一步识别制约研究区雨涝承载力提升的障碍因子,引入障碍度模型对各指标进行诊断。障碍度模型通过综合考虑指标权重与指标偏离理想状态的程度,定量刻画各指标对研究区雨涝承载力提升的阻碍作用,指标权重反映其在系统中的相对重要性,而指标偏离度则反映其现实短板程度,二者共同决定该指标的综合障碍作用。具体应用时,先依据各指标标准化结果计算其偏离理想状态的程度,再与熵权相结合得到各指标障碍度并进行排序,计算方法见文献[35],将障碍度较大的指标判定为该分区的主导制约因素。为进一步反映不同指标对研究区雨涝承载力的制约强度,根据各指标的平均障碍度划分障碍等级:≥20%、15%~<20%、5%~<15%、<5%分别为高障碍、中障碍、低障碍、极低障碍等级。

3 结果与分析

3.1 InfoWorks ICM 内涝模拟

根据平凉市中心城区长历时综合暴雨强度公式^[21](式(1)),得到降雨重现期为20 a的24 h设计暴雨过程,如图4所示,设计暴雨的时间间隔为5 min,在此基础上,利用构建的InfoWorks ICM对研究区的内涝情况进行模拟。

i = 4.730 * (1 + 1.571lgP) / (t + 7.781)^0.719 (1)

式中:i为暴雨强度;t为降雨历时;P为降雨重现期。

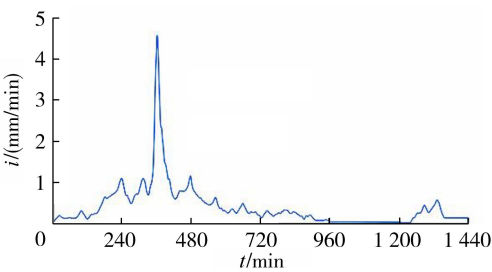


图4 设计暴雨过程
Fig.4 Design storm process

参考GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》和GB 50014—2021《室外排水设计标准》,依据积水深度H与积水持续时间T的组合条件划分内涝风险等级:0.15 m≤H<0.30 m且30 min≤T<1 h为低风险;0.15 m≤H<0.50 m且T≥1 h为中风险;H≥0.50 m时判定为高风险,不再另设积水持续时间条件。

图5为研究区内涝风险等级的空间分布。由

图5可见,降雨重现期为20 a、管道自由出流条件下,研究区局部地区发生了内涝,总淹没面积为0.9 km²,占研究区总面积的13.78%。26个一级排水分区中有24个出现不同程度的淹没现象,淹没分区占比达92.31%(表2)。从不同分区的内涝差异来看,各分区淹没面积的变异系数为113.26%,内涝积水体积的变异系数为137.15%,表明研究区内涝风险空间分异性显著,这种差异主要受地形地貌条件的控制。

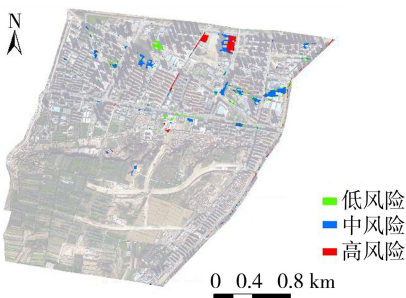


图5 研究区内涝风险等级的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of waterlogging risk levels in study area

表2 一级排水分区内涝模拟统计结果

Table 2 Statistical results of waterlogging simulation for primary drainage subdivisions

一级排水分区	淹没面积/m ²	内涝积水体积/m ³	一级排水分区	淹没面积/m ²	内涝积水体积/m ³
1	18 153	581	14	27 676	6 900
2	126 575	8 039	15	18 675	1 034
3	9 361	586	16	38 339	3 687
4	127 747	5 737	17	24 646	2 603
5	110 694	6 406	18	4 299	707
6	71 315	18 840	19	169	7
7	54 765	3 711	20	29 729	1 210
8	6 542	190	21	948	30
9	6 710	345	22	0	0
10	81 968	8 793	23	5 472	99
11	24 905	2 218	24	0	0
12	32 974	3 329	25	1 908	109
13	16 696	1 721	26	59 853	2 583

3.2 雨涝承载力空间分异特征

为保证指标在评价中的可比性,对指标值进行标准化处理,图6为一级排水分区指标标准化值分布,可见7项指标在一级排水分区的分布差异较大。采用熵权法得到各指标权重:高程16.79%、径流系数20.95%、洼域率9.35%、蓝绿空间率18.18%、单位面积涝水体积3.32%、排水管渠密度16.04%、建筑密度15.36%。

图7为研究区雨涝承载力评价结果。从整体上看,研究区雨涝承载力呈现明显的空间分异特征,总体表现为南高北低。依据雨涝承载力得分对一级排水分区的雨涝承载力等级进行划分:>0.5为高承

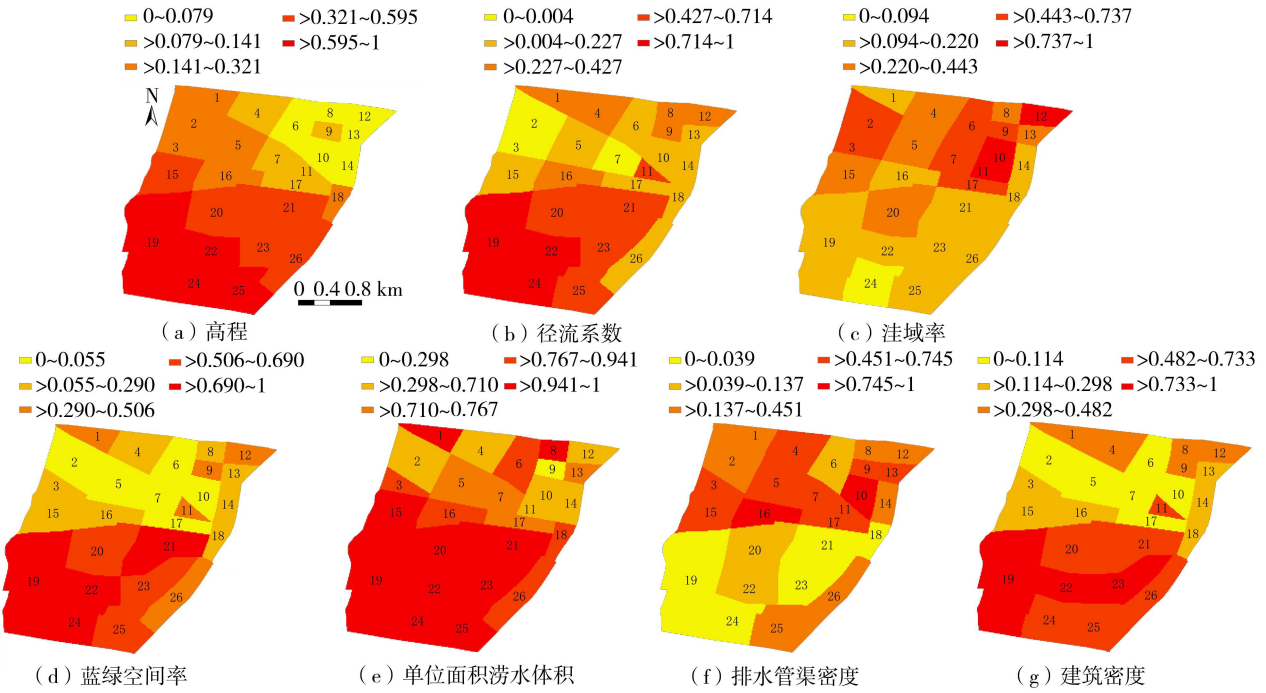


图 6 一级排水分区指标标准化值分布

Fig. 6 Distribution of normalized indicator values in primary drainage subdivisions

承载力分区、 $>0.3 \sim 0.5$ 为中承载力分区、 ≤ 0.3 为低承载力分区。26 个一级排水分区的雨涝承载力得分具有较明显的层级分异特征。高承载力分区主要集中于研究区南部,表明该区域各指标均表现较优,排水与雨水调蓄条件较好,综合雨涝承载水平较高;中承载力分区主要分布在南北过渡地带,其雨涝承载力得分处于中等水平,部分指标仍存在一定的提升空间;低承载力分区主要分布于研究区北部,表明该区域在地形条件、下垫面产流特征、蓝绿空间调蓄条件或排水管渠配置等方面受到不同程度的制约。总体而言,研究区南北区域雨涝承载力差异是自然地理条件、地表水文调节能力和工程基础设施等多类指标综合作用的结果,南北过渡带的中承载力分区是改善研究区整体雨涝承载力空间格局的重要衔接单元。

区雨涝承载力的障碍因子呈现径流系数偏高、地表调节功能偏弱,并受自然地形条件约束的综合特征。在多数一级排水分区中,径流系数、蓝绿空间率及排水管渠密度的障碍度较高,表明研究区在源头削减、过程调控及末端排放等环节均存在不同程度的短板。其中,径流系数作为负向指标,其障碍作用在高密度建成区尤为突出,揭示了不透水面扩张对雨涝承载力的持续削弱效应;蓝绿空间率障碍度偏高,说明城市建设对自然下渗与滞蓄空间的压缩较为显著,城市海绵功能尚未充分发挥。从自然条件看,高程与洼域率在部分分区中仍表现出一定障碍效应,说明在黄土高原河谷城市背景下,地形对雨涝过程具有长期、稳定的控制作用,是其他工程与管理措施难以完全消解的基础性约束。

表 3 指标障碍度统计结果

Table 3 Statistical results of indicator obstacle degree			
指标	平均障碍度/%	标准差/%	障碍等级
径流系数	20.90	6.80	高
排水管渠密度	18.42	13.95	中
蓝绿空间率	17.76	5.44	中
高程	17.64	6.22	中
建筑密度	13.86	4.62	低
洼域率	10.37	6.58	低
单位面积涝水体积	1.05	1.26	极低

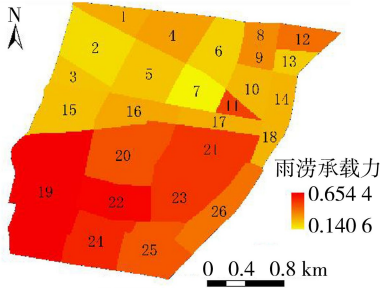


图 7 研究区雨涝承载力评价结果

Fig. 7 Evaluation results of stormwater carrying capacity in study area

3.3 障碍因子诊断

表 3 为指标障碍度统计结果。整体来看,研究

4 结 论

a. 以平凉市典型片区为研究区,构建了耦合 InfoWorks ICM 模拟、熵权-TOPSIS 评价与障碍度诊

断的雨涝承载力评价框架,评价结果表明研究区内涝现象较为普遍,降雨重现期为 20 a 的条件下,26 个一级排水分区中有 24 个发生不同程度淹没,总淹没面积为 0.9 km²,占比 13.78%,内涝风险空间分异显著,并明显受南高北低阶梯地形控制。

b. 研究区雨涝承载力总体呈南高北低的空间分布格局。高承载力分区主要位于研究区南部,低承载力分区主要集中于北部,南北过渡带的中承载力分区是改善研究区整体雨涝承载力空间格局的重要衔接单元。

c. 障碍因子诊断结果表明,径流系数、排水管道密度、蓝绿空间率是制约研究区雨涝承载力提升的主要因素。高程是制约研究区雨涝承载力提升的重要自然条件。

参考文献:

[1] Zhou Shiqi, Jia Weiye, Liu Zhiyu, et al. Prediction and machine learning analysis of urban waterlogging risks in high-density areas from the perspective of the built environment: a case study of Shenzhen, China [J]. Landscape Architecture Frontiers, 2024, 12(5): 48-60.

[2] 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))

[3] 郭鹏,慕登睿,吕继强,等. 甘肃省黄土高原区典型城市雨洪与积水模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(4): 25-30. (Guo Peng, Mu Dengrui, Lyu Jiqiang, et al. Research on urban rainstorm flood and ponding of typical city in Loess Plateau of Gansu province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4): 25-30. (in Chinese))

[4] Sanyal J, Lu X X. GIS-based flood hazard mapping at different administrative scales: a case study in Gangetic West Bengal, India [J]. Singapore Journal of Tropical Geography, 2006, 27(2): 207-220.

[5] 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))

[6] 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))

[7] 吴舒祺,赵文吉,王志恒,等. 基于 GIS 的洪涝灾害风险评估及区划:以浙江省为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 51-57. (Wu Shuqi, Zhao Wenji, Wang Zhiheng, et al. Assessment and zoning of flood disasters risk based on GIS: a case study of Zhejiang Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 51-57. (in Chinese))

[8] 张伟,庄子孟,孙慧超,等. 我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 58-68. (Zhang Wei, Zhuang Zimeng, Sun Huichao, et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 58-68. (in Chinese))

[9] Nguyen C C, Nguyen B Q, Le X C, et al. Urban inundation forecasting based on hydraulic models coupling MIKE flood and MIKE urban: a case study of Tam Ky City, Vietnam[J]. River, 2023, 2(4): 518-529.

[10] Shahi A J, Pokhrel M, Lamichhane S. Urban roadside flooding analysis using SWMM: a case study of a road section in Pokhara Metropolitan City, Nepal[J]. Journal of Engineering and Sciences, 2024, 3(1): 36-44.

[11] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 83-92. (Ye Chenlei, Xu Zongxue, Lei Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin ' an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/ waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 83-92. (in Chinese))

[12] Wei Huaibin, Wu Heng, Zhang Liyuan, et al. Urban flooding simulation and flood risk assessment based on the InfoWorks ICM model: a case study of the urban inland rivers in Zhengzhou, China [J]. Water Science & Technology, 2024, 90(4): 1338-1358.

[13] 邵俊,晏传杰,张梦超,等. 基于 Infoworks ICM 模型改进的监利市内涝灾害风险评估体系研究[J]. 水利规划与设计, 2025(1): 34-39. (Shao Jun, Yan Chuanjie, Zhang Mengchao, et al. Research on the risk assessment system of waterlogging disaster in Jianli City based on Infoworks ICM model improvement [J]. Water Resources Planning and Design, 2025(1): 34-39. (in Chinese))

[14] 刘明阳,王群英,徐向舟,等. 考虑内涝周期的郑州市内涝韧性评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 48-55. (Liu Mingyang, Wang Qunying, Xu Xiangzhou, et al. Assessment of waterlogging resilience in Zhengzhou City considering waterlogging cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 48-55. (in Chinese))

[15] 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))
- [16] 邹家祥,段存存,陈彬,等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估[J]. *水资源保护*, 2024, 40 (6): 85-94. (Zou Jiaxiang, Duan Cuncun, Chen Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 85-94. (in Chinese))
- [17] Yu Shuying, Yuan Maoning, Wang Qi, et al. Dealing with urban floods within a resilience framework regarding disaster stages [J]. *Habitat International*, 2023, 136: 102783.
- [18] Mruksirisuk P, Thanvisitthpon N, Pholkern K, et al. Flood vulnerability assessment of Thailand's flood-prone Pathum Thani province and vulnerability mitigation strategies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119276.
- [19] 平凉市人民政府. 自然地理[EB/OL]. (2025-09-23) [2026-02-16]. https://www.pingliang.gov.cn/zjpl/zrdl/art/2022/art_02efb171e3a84709b3c2331eaad95f41.html.
- [20] 惠程华. 平凉遭受特大暴雨袭击[N]. *甘肃日报*, 2005-07-08(4).
- [21] 李旺洋, 闫旭东. 平凉市“2010. 7. 23”暴雨洪水分析[J]. *甘肃农业*, 2018 (3): 37-41. (Li Wangyang, Yan Xudong. Analysis of rainstorm and flood at 23 July, 2010 in Pingliang City [J]. *Gansu Agriculture*, 2018 (3): 37-41. (in Chinese))
- [22] Fu Bojie, Liu Yu, Lyu Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [23] Zhao Zhenhua, Yang Yifei, Dong Bo, et al. Evaluation of soil quality of Pingliang city based on fuzzy mathematics and cluster analysis[J]. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1205.
- [24] 甘肃省地质环境监测院. 甘肃省平凉市城市环境地质调查评价报告[R]. 兰州: 甘肃省地质环境监测院, 2007.
- [25] 周星, 李永坤, 胡小红, 等. 基于 InfoWorks ICM 的北京市西城区排涝能力分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60 (5): 690-697. (Zhou Xing, Li Yongkun, Hu Xiaohong, et al. Analysis of drainage capacity in Xicheng district, Beijing with InfoWorks ICM [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(5): 690-697. (in Chinese))
- [26] 潘婧, 陈燕, 唐伟, 等. 基于 InfoWorks ICM 的临安亚运场馆暴雨内涝模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 12-21. (Pan Jing, Chen Yan, Tang Wei, et al. InfoWorks icm-based simulative study on rainstorm waterlogging for Asian Games venues in Lin'an district [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(6): 12-21. (in Chinese))
- [27] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析: 以福州市白马河片区为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 784-793. (Ye Chenlei, Xu Zongxue, Lei Xiaohui, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis: case of Baima River district, Fuzhou [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(6): 784-793. (in Chinese))
- [28] 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))
- [29] 焦学军. 基于高分辨率 DEM 的小流域分布式水文模拟[D]. 开封: 河南大学, 2008.
- [30] 安然. 极端降雨条件下湿陷性黄土地区公路路基变形机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [31] 毛坤. 城市雨涝承载力与遗传算法驱动的蓄排系统优化配置方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2025.
- [32] 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))
- [33] 陈鹏宇. 线性无量纲化方法对比及反向指标正向化方法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30 (10): 95-101. (Chen Pengyu. Comparison of linear normalization methods and the conversion method of reverse indicators [J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30 (10): 95-101. (in Chinese))
- [34] Chen Pengyu. Effects of the entropy weight on TOPSIS [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 168: 114186.
- [35] Li Yan, Sun Liang, Wu Zongnan, et al. Evaluation and obstacle factors of marine resources and environment carrying capacity in Beibu gulf urban agglomeration[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1196196. (收稿日期: 2026-02-27 编辑: 王芳)