况达,张印豪,杨筱彤,等.基于遗传算法的承洪绿色基础设施规划优化:以郑州为例[J].华中农业大学学报,2026,45(1):130-144.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.012

基于遗传算法的承洪绿色基础设施规划优化:以郑州为例

况达[1],张印豪[1],杨筱彤[1],李相逸[1,2]

1.深圳大学建筑与城市规划学院,深圳 518060; 2.亚热带建筑与城市科学重点实验室,深圳 518060

摘要 传统的灰色基础设施由于忽视自然水文过程与生态系统服务的协同作用,在应对复合型灾害链方面表现出明显局限。绿色基础设施(green infrastructure,GI)通过基于自然过程的调控与多功能协同,被认为是弥补上述局限的有效途径。在此背景下,为实现GI的精确选址与类型配置优化,以郑州市为例,构建了融合多准则决策评价与遗传算法的规划优化框架。基于自然地理与气候、基础设施敏感性、自然环境响应和经济社会影响4个维度构建指标体系,在GIS平台上形成GI空间部署优先级模型,并引入遗传算法,在多目标、多约束条件下对不同优先区内承洪GI的类型与规模进行定量优化配置。结果表明,该方法能够在兼顾承洪安全与建设约束的前提下,识别承洪GI的高优先级部署区与关键控制片区,优化不同类型GI的组合配置,实现从空间优先级识别到类型配置优化的闭环规划过程。研究表明,多准则空间评价与遗传算法的耦合可为特大城市洪涝韧性提升提供可量化的决策依据与可复制的计算框架,为快速城市化地区承洪导向的GI布局提供技术支撑。

关键词 城市承洪; 绿色基础设施; GIS; 遗传算法; 多准则决策评价

中图分类号 TU985.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0130-15

洪涝作为极端天气事件中的常见灾害,在气候变化背景下愈发严重[1]。这不仅会扰乱社会经济活动,还会对环境与城市基础设施造成长期损害[2]。在我国快速城市化进程中,郑州、武汉、深圳等特大、超大城市面临的洪涝风险尤为突出,这凸显了对更高效雨洪管理策略的迫切需求[3]。绿色基础设施(green infrastructure, GI)作为一种应对气候变化的创新路径,因其多功能效益,在应对日益突出的城市洪涝风险中愈加重要[4-5]。与灰色基础设施相比,GI不仅建设与维护成本更低,还能提升环境质量与生物多样性,提供更广泛的生态系统服务[6]。更为关键的是,GI能够通过增强雨洪滞蓄、下渗和蒸散等过程,有效减少地表径流[4]。

然而,GI的规划与实施仍面临空间约束和效益公平性等挑战[7],这本质上是一个需统筹生态效益与社会经济需求等相关因素的多目标空间决策过程。尽管我国早在2009年就有系统性的GI概念引介与实践探索[8],且后续"海绵城市"建设推动了其广泛应用[9],但国内现有研究多集中于生态网络优化、绩效评价、水文效应评估[10-14],而针对承洪导向的GI优先布局区位识别仍较为欠缺。在国外研究案例中,承洪型GI优先布局区位的一类识别路径主要依托传统水文工程视角,其核心方法是基于暴雨管理模型(storm water management model,SWMM)的模拟以优化径流削减率为目标[15-17]。这类以SWMM为核心并结合其他模型的方法,为识别不同GI类型的最优组合提供了有益参考。然而,其局限性也日益凸显,由于过度依赖水文工程视角,忽视了自然气候条件、工程基础设施、生态格局与社会经济因素在复杂城市系统中的耦合机制,容易导致规划策略的片面化。另一类研究路径则是构建评价指标体系,并与基于GIS的分析方法结合[9,18-20]。这类研究不仅揭示并分析了影响GI部署的关键决定因素,同时也推动了多元指标体系与权重方法的集成发展。然而,这类研究往往停留在优先布局区的空间识别阶段,缺乏对各优先布局区所需GI类型组合的定量分析,难以为类型选择提供更为科学、精准的方法支撑。综上所述,尽管当前研究积极推动了GI空间规划的发展,但仍存在一定局限性。其一,在类型配置上,我国相关研究仍以定性判断或情景设定为主,缺乏

收稿日期: 2025-11-14
基金项目:广东省自然科学基金项目(2024A1515011422;2025A1515010973);深圳市自然科学基金面上项目(JCYJ20250604182411016)
况达, E-mail:da.kuang@szu.edu.cn
通信作者: 李相逸, E-mail:lixiangyi@szu.edu.cn

面向承洪需求的GI类型与规模的定量配置方法，难以回答“在何处布设何种类型及布设强度”的精细化问题；其二，在目标设定上，现有研究多聚焦于径流削减或洪峰削减等单一水文效益，多目标协同优化不足，对用地约束及生态环境效益等的综合权衡不够；其三，在方法体系上，GIS 空间分析与多准则决策评价虽已用于识别GI适宜部署区域，但在综合集成多维影响因素方面仍显不足，影响指标的覆盖范围有限，并且多数研究多准则决策评价阶段与后续类型配置优化往往割裂。这些不足使得承洪导向的GI布局策略难以形成可量化、可推广的技术路径。

为弥补上述缺口，本研究以我国中部典型特大城市郑州市为研究对象，在构建郑州市承洪GI部署优先级识别模型基础上，引入多目标遗传算法构建优化模型，利用其在复杂约束和多目标权衡方面的优势，推导各优先区内GI类型与规模的近似最优配置方案，以期实现GI从空间优先级识别到类型配置优化的闭环规划过程。

1　材料与方法

1.1　研究区域与技术框架

郑州近年来在城市化进程中快速发展，呈现出典型的城市快速扩张特征，城市人口和建筑密度逐年增加，这为城市发展带来机遇的同时，也带来了许多挑战。近年来，郑州市常常面临暴雨、洪涝等极端气候事件的威胁，尤其在夏季多暴雨季节，极端天气的出现频率和强度有逐年上升的趋势。例如，《河南郑州“7·20”特大暴雨，灾害调查报告》显示，2021年7月郑州发生了罕见的特大暴雨，导致全市大量基础设施损毁，城市运作几乎停滞，并造成了巨大的经济损失[21]。灾害暴露了郑州市在面对极端气候时的脆弱性，同时也推动了对其城市韧性和灾害应对机制的深入反思。

本研究以郑州市为案例，进一步探讨多重相关因素影响下的GI规划机制。研究范围涵盖郑州市主城区的金水区、二七区、中原区、管城区、惠济区等所辖全部街道/乡镇，以及郑州经济技术开发区下辖的京航、明湖、潮河3个街道，共计81个街道/乡镇，作为本研究的子区。本研究采用熵值法客观地为每个影响因子赋权，在 GIS 平台上实现基于多准则决策分析（multi-criteria decision analysis，MCDA）的模型，以确定各个子区的GI部署优先级。在这些优先级的基础上，应用遗传算法在多目标约束条件下定量优化GI类型的配置，从而制定出一种结合多准则决策评价和多目标任务分析的集成优化方法，用于承洪GI的选址部署（图1）。

1.2　GI多准则决策因素分析

1）指标筛选原则与流程。在构建承洪型GI多准则决策评价指标体系时，本研究以城市社会-生态-技术系统（social-ecological-technical systems，SETS）视角为基础[22]，基于IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）提出的气候风险“危险性-暴露-脆弱性”（H-E-V）框架及其在城市洪涝风险评估中的扩展应用[23-24]，并借鉴 Wang 等[25]对 IPCC 风险框架的扩展将“适应能力”作为独立维度纳入分析，形成“致灾因子-暴露-脆弱性-适应能力”（H-E-V-A）的洪涝风险链条分析框架，从自然地理与气候基准、基础设施敏感性、自然环境响应以及经济社会影响4个维度系统识别决策因子。为保证指标体系的科学性与可操作性，本研究按照“文献归纳与情景约束-原则筛选-冗余控制”的流程构建指标体系：首先基于城市洪涝风险评估、绿色基础设施规划、环境正义与韧性城市等研究，汇总水文情景、建成环境暴露、生态系统结构与功能及社会脆弱性等候选指标，并结合郑州市主城区地形格局、土地利用特征与近期极端降雨事件对指标进行本地化筛选与含义重构，形成覆盖“致灾因子-暴露-脆弱性-适应能力”的初始指标池。随后依据3条准则进一步筛选，其一是风险相关性，要求指标至少能从某一环节刻画承洪GI与暴雨洪水过程的耦合关系；其二是空间可测量性，要求指标由可获取的多源空间数据稳定量化、在研究区具备良好的空间覆盖性与一致的分辨率，优先选择可在GIS平台栅格化表达与叠加分析的变量并剔除难以形成连续空间表征的指标；其三是规划指向性，要求指标能够为GI类型与规模的空间配置提供明确的干预方向。最后在满足上述原则的基础上，从维度平衡与共线性控制出发约束指标数量，一方面确保各维度共同覆盖“情景-响应-效应”的逻辑链条，另一方面对候选指标间的物理含义、经验相关性及空间分布特征进行比对，剔除高度重合或解释作用相近的变量，避免信息重复与权重分散，最终形成17项指标体系。

2）自然地理与气候基准。自然地理与气候条件构成了承洪型GI部署的情景基准。地表径流系数刻画渗透与地表流的平衡，高值通常对应不透水面集中区，降水更易转化为径流并削弱自然滞留功能，此

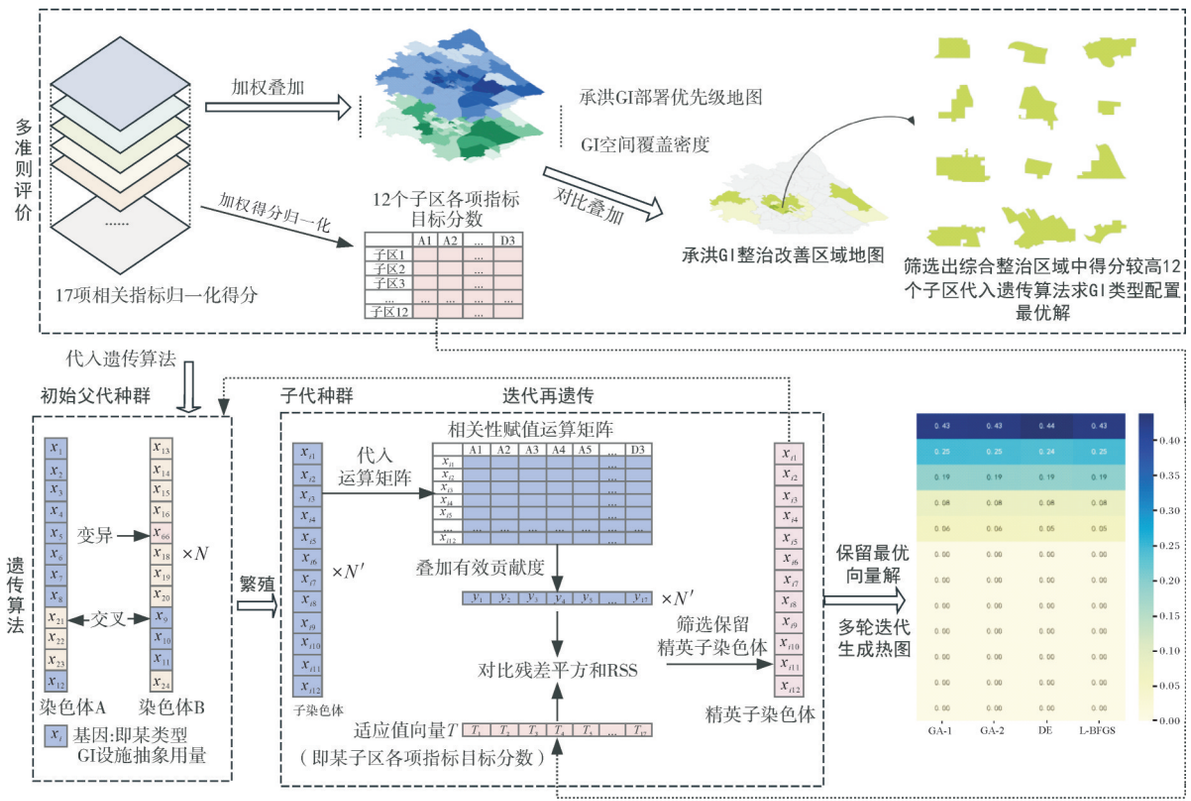


图1 技术框架

Fig. 1 Technical framework

类区域需通过提高地表渗透和滞蓄能力来削减峰值流量[26-28]。年平均降雨量反映气候压力强度与空间差异，是确定暴雨控制标准和GI设计规模的重要依据[29]。平均海拔与最大坡度共同表征地形对洪水敏感性的影响，低洼区更易蓄水成灾，山坡与谷地的组合会加速坡面汇流并在谷底形成积水与泥沙淤积。因此，在谷地宜配置具有较强截流与滞蓄能力的湿池、植被缓冲带，在陡坡布设梯级生物滞留等设施以打断地形诱发的径流集中过程[30-32]。温室气体排放、城市热岛效应和空气质量则综合反映能源密集型开发、地表硬化和植被缺失等长期气候与环境压力。高排放、强热岛和空气质量较差地区通常存在不透水面比例高、植被稀疏等特征，既削弱地表滞留和碳汇能力，又加剧极端对流降水及初期径流污染。在此类区域宜优先部署兼具固碳、蒸散降温和渗透储水功能的多目标GI，以协同缓解气候与洪涝风险[33-38]。

3）基础设施敏感性。基础设施敏感性聚焦建成环境的物理脆弱性与应急服务保障能力，强调从承灾体视角识别关键生命线系统与洪水过程的耦合关系。道路易淹没性揭示线性交通网络在水文循环中的暴露程度，其空间格局反映洪水汇流路径和地表易淹没热点。通过在道路及其邻近区域布设透水铺装、生物滞留沟、路边渗透池、湿地等GI，可有效削减地表径流、缩短积水持续时间并减轻交通中断[39-41]。应急避难场所可达性衡量居民在灾前、灾中获得避难空间的时间成本，揭示防灾资源供给与需求的空间错配。可达性低的区域往往与雨洪高风险区和社会脆弱性热点叠加，应通过增加透水广场、易转换为集散空间的绿地等设施，提高平时生态服务供给的同时，为灾时应急疏散预留弹性空间[42-43]。城市密度指数综合反映用地紧凑度和地表硬化程度。高密度区域因绿地稀缺、下垫面渗透性差，易形成高强度初期径流并增加排水系统负荷，同时，这类区域可供集中式GI利用的空间也十分有限。因此，更适宜采用模块化、小尺度、分布式的微型GI组合，在有限空间内实现多点渗透与滞蓄[44-46]。

4）自然环境响应。自然环境响应强调城市生态系统结构与功能对洪水过程的调节作用。绿化覆盖率直接影响雨水截留、蒸散和土壤渗透等关键水文过程，低覆盖区域更依赖新增GI补充滞蓄与渗透能力[26,34,47]。绿化斑块密度反映绿地空间格局与连通性，过度碎片化会削弱雨水调节效率。通过植被缓冲带、生物滞留沟和绿色屋顶等设施增强斑块联结，

可构建连续的生态-水文网络[48]。水域率量化区域水体比例，并与洪水调节能力呈显著正相关；水域斑块密度则揭示水体形态复杂度与水文连通性[49-50]。低水域率区域需通过渗透井、滞留池和分布式生物滞留设施等增加有效调蓄空间；而水域斑块高度碎片化地区则应通过雨水湿地、植被缓冲带和工程化土壤过滤等GI对水体进行连通与形态重构，以恢复更为连续的自然水文节律[45,51]。

5）经济社会影响。经济社会影响维度从环境正义视角刻画社会脆弱性与风险负担的空间差异，为GI的公平部署提供依据[52]。人口密度表征人类活动聚集程度，直接影响洪涝情景下人员暴露水平和疏散难度。高密度聚居区因公共开敞空间压缩、疏导通道有限，更易出现人员-基础设施耦合的灾害连锁反应，应优先配置具有快速削减径流与缓解内涝功能的GI[53-55]。在洪水灾害中，风险负担的分配并不平等，脆弱性群体往往承担了更高的风险。这些群体通常因信息获取受限、应急资源不足及物理防护条件欠缺而面临更高的灾害暴露度和更低的恢复能力[56]。GI部署应充分考虑此类群体的空间聚集模式，从而提高资源配置的公平性和城市整体包容性[7,57]。经济脆弱性考察了经济活动强度与洪水敏感性之间的空间耦合关系。高GDP区域因资本高度集中、产业链复杂及资产流动性较低，对洪涝灾害表现出更高的敏感性和潜在损失[58-59]。因此，应在此类区域优先布局更多GI，以降低经济风险并增强整体系统的韧性。

1.3　多维选址框架

综合上述步骤，最终在4个维度上确定了17个可量化的评价指标，用于支撑后续基于熵值法的权重确定和多准则决策评价-遗传算法优化的集成框架（表1）。

本研究所用基础数据包括降水、土地利用、人口与社会经济、地形高程、碳排放、地表温度、行政区划及城市规划等多源空间数据（表2）。在空间处理上，所有栅格数据统一投影至 WGS 1984 UTM Zone 49N 坐标系，并重采样至10 m×10 m的一致空间分辨率；矢量数据通过空间叠加和栅格化转换至同一坐标系和分辨率，以保证多源数据在空间分析与多准则决策评价中的一致性和可比性。

1.4　基于GIS的多标准评价分析

本研究基于 ArcGIS Pro 平台构建承洪型GI部署优先级评估模型，在完成各指标图层标准化后，采用熵值法进行客观赋权，并通过加权多标准综合评价获得综合得分并归一化，最终采用自然断点法将各子区划分为优先布局区、次优先布局区、潜力布局区、次潜力布局区与暂缓区5个等级分区。然后，依据郑州市主城区的土地使用功能分区地图与街道、乡镇分区地图叠加，量化得出各子区当前的GI覆盖情况，支撑后续对比分析。通过将承洪GI部署优先级地图与GI空间覆盖密度图叠加，得出承洪GI整治改善区域地图。其中，等级相差为0的区域定义为设施完备区域，此区域暂时无需布局新的GI；等级相差为1的区域定义为优化平衡区域，此区域以查漏补缺、细微修补GI为主；等级相差为2～3的区域定义为综合提质区域，此区域应以进一步优化GI布局类型为主要任务，而非追求GI布局的数量；等级相差为5的区域定义为重点整治区域，此类区域应优先重点考虑GI布局的数量而非类型。

表1　郑州市主城区承洪GI规划识别指标体系

Table 1　Indicator framework for identifying flood resilience GI planning in Zhengzhou's central urban area

准则层 Criterion layer	因子层 Index layer
自然地理与气候基准维度 Dimension of physical geography and climatic conditions	A1: 地表径流系数 Surface runoff coefficient A2: 年平均降雨量 Annual average rainfall A3: 平均海拔 Average elevation（－） A4: 最大坡度 Maximum slope A5: 温室气体排放 Greenhouse gas emissions A6: 城市热岛效应 Urban heat island effect A7: 空气质量 Air quality
基础设施敏感性维度 Dimension of infrastructure vulnerability	B1: 道路易淹没性 Road flood susceptibility B2: 应急避难场所可达性 Accessibility to emergency shelters（－） B3: 城市密度指数 Urban development index
自然环境响应维度 Dimension of natural environmental response	C1: 绿化覆盖率 Green coverage rate（－） C2: 绿化斑块密度 Green space patch density C3: 水域率 Water area ratio（－） C4: 水域斑块密度 Water patch density
经济社会影响维度 Dimension of socioeconomic impacts	D1: 人口密度 Population density D2: 洪水脆弱性群体占比 Proportion of flood-vulnerable groups D3: 经济脆弱性 Economic vulnerability

注："（－）"表示负向指标，即指标值越高，表征的水平越低。下同。 Note: "（－）" denotes a negative indicator, meaning that higher values correspond to lower levels of the represented condition. The same as below.

1.5　多目标任务求解

遗传算法（genetic algorithm, GA）在解决多目标任务方面具有卓越性能。对于综合提质区域其主要目标是优化GI类型的组合，而不是总量，本研究将GI类型选择问题建模为连续优化问题，并采用遗传算法来求解。该框架能够综合考虑多类型GI呈不同

表2 数据来源与空间分辨率

Table 2 Data sources and spatial resolution

数据类型 Data types	数据集(名称) Dataset (name)	数据来源(平台) Data source (platform)	空间分辨率(空间尺度) Spatial resolution (spatial scale)
降水数据 Precipitation data	降水观测序列	国家气象信息中心(National Meteorological Information Center, http://data.cma.cn)	1 km × 1 km
土地利用 Land-use data	Sentinel-2 土地利用数据集	Sentinel-2 10 m 土地利用数据(https://srtm.csi.cgiar.org)	10 m × 10 m
人口学特征 Demographic characteristics	栅格化人口密度数据	WorldPop 数据库(https://hub.worldpop.org/)	1 km × 1 km
高程数据 Elevation data	SRTM DEM 数字高程模型	SRTM 90 m DEM 数字高程数据集(https://srtm.csi.cgiar.org/)	90 m × 90 m
经济数据 Economic data	全球人均 GDP(PPP)栅格数据集	全球GDP人均 PPP 下垂网格数据集[60](https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10976733)	5′ × 5′
碳排放数据 Carbon emissions data	EDGAR v8.0 温室气体排放清单	EDGAR v8.0(https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg80)	0.1° × 0.1°
地表温度 Land surface temperature	MODIS 地表参数反演数据	中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/DOI)	1 km × 1 km
街道/乡镇分区 Administrative divisions	CTAmap 行政区划长序列数据集	CTAmap 行政区划长序列数据集[61](http://www.shengshixian.com)	矢量数据,最小单元:街道/乡镇
城市规划数据 Urban planning data	城市总体规划、控制性详细规划、POI 等	郑州市政府官方网站公开规划文件、相关媒体报道及高德地图 POI 数据	矢量数据/点数据(规划图、设施点位等)

比例叠加、设施过量等复杂耦合约束。通过利用迭代进化过程和群体智能算法,能够快速收敛到全局最优解,从而为后续的精细化GI类型布局提供定量依据。

1)设置目标分数。将本研究上述分析所得综合提质区域得分较高子区各项指标的加权得分归一化到[0,1 000]作为遗传算法求解过程中各子区各指标的目标分数(表3)。

2)确定GI类型分类及相关性赋分。我国官方虽然没有相关命名为绿色基础设施类型分类的官方标准,但“海绵城市/低影响开发”框架里的“渗透、储存、调节、转输、净化”五大类别技术设施与欧美国家广义的绿色基础设施概念是相契合的。海绵城市作为GI实施建设的载体,在建设过程中出台了一系列的技术指导文件,其技术指导内容与绿色基础设施建设息息相关,涉及有低影响开发(low impact development, LID)相关技术设施的分类建议。因此本研究基于从实践的角度出发,选择2014年10月份住房城乡建设部发行的《海绵城市建设技术指南》中,第四章第七节技术选择中的设施分类建议作为GI类型分类的主体结构,剔除冗余,选取12种GI类型分类[62]。并且依据本文“1.2”中所引述的相关文献,按照GI类型与评价指标的关联性进行赋值(表4)。

3)基于遗传算法确定GI类型的最优比例分配。在本研究中,以“各街道各项指标的目标得分”作为目标向量,构建适应度函数。每条染色体编码表示不同GI类型的比例分配。采用三阶段混合优化策略求解最优分配系数,如式(1)所示以最小化观测目标向量t与预测值U^Tx之间的残差平方和(RSS)(其中U为GI类型特征矩阵,x为分配系数向量)

$$\min_x \| t-U^Tx \|_2^2, x_i \geqslant 0 \quad (1)$$

首先计算非负最小二乘(NNLS)解,以确定理论下界。采用实值编码方式,每个基因对应1个GI类型系数,并以式(2)所示定义适应度函数

$$f(x)=-\| t-U^Tx \|_2^2+\lambda\sum_i x_i, \lambda=0.0 \quad (2)$$

为避免主观指定,本研究在多组参数组合下对同一优化场景进行了预实验,将种群规模设置为{400,600,800,1 000},迭代次数设置为{400,800,1 200,1 600}的多种组合进行对比,考察不同设置下适应度曲线的收敛速度、震荡幅度及多次独立运行结果的一致性。结果表明,在第一阶段全局搜索(GA-1)中,当种群规模和迭代次数分别取1 000和1 600,在第二阶段局部细化(GA-2)中分别

表 3　各子区指标目标分数

Table 3　Target scores by indicator for each subdistrict

子区 Subdistrict	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3
大学路街道 Daxue Road subdistrict	45	12	4	25	72	103	18	26	0	245	22	146	9	284	1 000	732	97
秦岭路街道 Qinling Road subdistrict	118	73	64	262	153	166	83	0	105	418	116	166	90	173	974	1 000	213
南阳路街道 Nanyang Road subdistrict	23	11	5	14	52	124	24	128	61	322	49	0	14	28	1 000	317	303
建中街街道 Jianzhong Street subdistrict	61	71	57	142	128	215	84	118	128	498	114	2	73	0	1 000	920	196
五里堡街道 Wulibao subdistrict	55	56	48	122	123	192	67	124	0	382	96	102	58	351	706	1 000	180
建设路街道 Jianshe Road subdistrict	136	76	67	135	163	227	90	0	140	416	113	61	90	57	807	1 000	216
绿东村街道 Ludong Village subdistrict	83	74	55	352	160	194	69	0	175	406	110	169	90	37	588	1 000	213
棉纺路街道 Mianfang Road subdistrict	62	77	73	225	159	202	90	0	140	423	126	148	90	0	740	1 000	203
福华街街道 Fuhua Street subdistrict	7	27	6	0	67	140	12	257	131	438	64	12	21	103	734	1 000	140
汝河路街道 Ruhe Road subdistrict	67	76	61	200	137	168	64	0	176	429	120	144	88	78	717	1 000	210
南阳新村街道 Nanyang New Village subdistrict	165	78	77	126	128	256	92	365	207	563	119	79	88	0	1 000	596	493
大石桥街道 Dashiqiao subdistrict	59	71	60	191	128	218	77	179	47	492	121	0	69	331	1 000	206	453

表 4　相关性赋值矩阵

Table 4　Correlation-based score assignment matrix

GI类型 Types of GI	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3
透水铺装 Permeable pavement	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
绿色屋顶 Green roof	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
下沉式绿地 Depressed (sunken) green space	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
生物滞留设施 Bioretention facility	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
渗透塘 Infiltration pond	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1
渗井 Infiltration well	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
湿塘 Wet pond	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
雨水湿地 Stormwater wetland	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1
调节塘 Detention pond	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
植草沟 Grassed swale	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
植被缓冲带 Vegetated buffer strip	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
人工土壤渗滤 Engineered soil filter	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1

注：基于本文“1.2”小节中所引述的相关文献[7,26-27,30-36,38-40,42,44-45,47-48,51,53]进行赋值，若GI类型和评估指标之间存在关联则赋值为1；反之则赋值为0。 Note: The values were assigned based on the relevant literature cited in Section “1.2”. If an association exists between a GI type and an evaluation indicator, a value of 1 is assigned; otherwise, a value of 0 is assigned.

取600和800，且交叉概率$P_c=0.8$、变异概率$P_m=0.25$时，适应度值在合理代数内收敛且重复运行间差异较小。因此采用该组参数作为遗传算法的最终设置，以保证优化过程的稳定性与可复现性。此外，在适应度函数中引入正则化系数λ用于平衡拟合误差与GI总规模。预实验在$\lambda\in\{0.0,0.2,0.4,0.6\}$的范围内进行了对比，结果表明，在现有用地与约束条件下，$\lambda>0.0$虽然可以略微压缩GI总规模，但会显著

增大残差、削弱拟合效果，因此最终将正则化系数设定为$\lambda=0.0$，以保证优化结果的解释性与稳定性。

进化过程通过锦标赛选择（规模为5）、算术交叉（概率$P_c=0.8$）和自适应高斯变异（初始标准差σ为搜索范围的30%，并线性衰减）实现，每代保留前5%的个体。

第一阶段（GA-1，全局搜索）：种群规模为1 000，迭代次数为1 600，搜索范围设定为$x_i\in[0,1.5\times\max(t)]$。

第二阶段（GA-2，局部优化）：种群规模为600，迭代次数为800，搜索范围收缩至$x_i\in[0.7x_i^*,1.3x_i^*]$，其中$x_i^*$为第一阶段得到的最优解。

第三阶段（混合优化）：采用差分进化（DE）算法，种群规模为20，迭代次数为400，随后进行L-BFGS-B局部搜索（最大迭代次数为800，函数容差为10^{-12}）。最终分配向量按式（3）所示进行归一化：

$$p=\frac{x_{\text{final}}}{\sum x_{\text{final}}} \tag{3}$$

为直观对比不同优化算法所得分配方案间的数值差异与结构模式，最终将各优化算法得到的最优分配系数以热力图形式进行可视化呈现。

2 结果与分析

2.1 空间差异特征分析

对郑州市主城区不同维度的空间差异进行分析，可见在多个维度上表现出明显的空间差异（图2）。基于熵值法确定的各影响因子权重（表5），本研究对所有单一指标的评价结果进行加权叠加，继而通过多准则分析，生成了郑州市主城区承洪绿色基础设施的部署优先级地图（图3）。由图3可知，GI部署优先区呈现明显空间集聚，高优先区主要分布于老城区、沿主要河道及低洼汇水通道等区域，普遍具有不透水面比例高、人口密度大、排水系统承载压力突出的特点，与历史洪涝高风险区高度重合，这些区域需要更多的GI以提高防洪能力。而在优先级较低的区域，则可考虑对现有设施进行优化和补充，从而实现资源的合理配置。

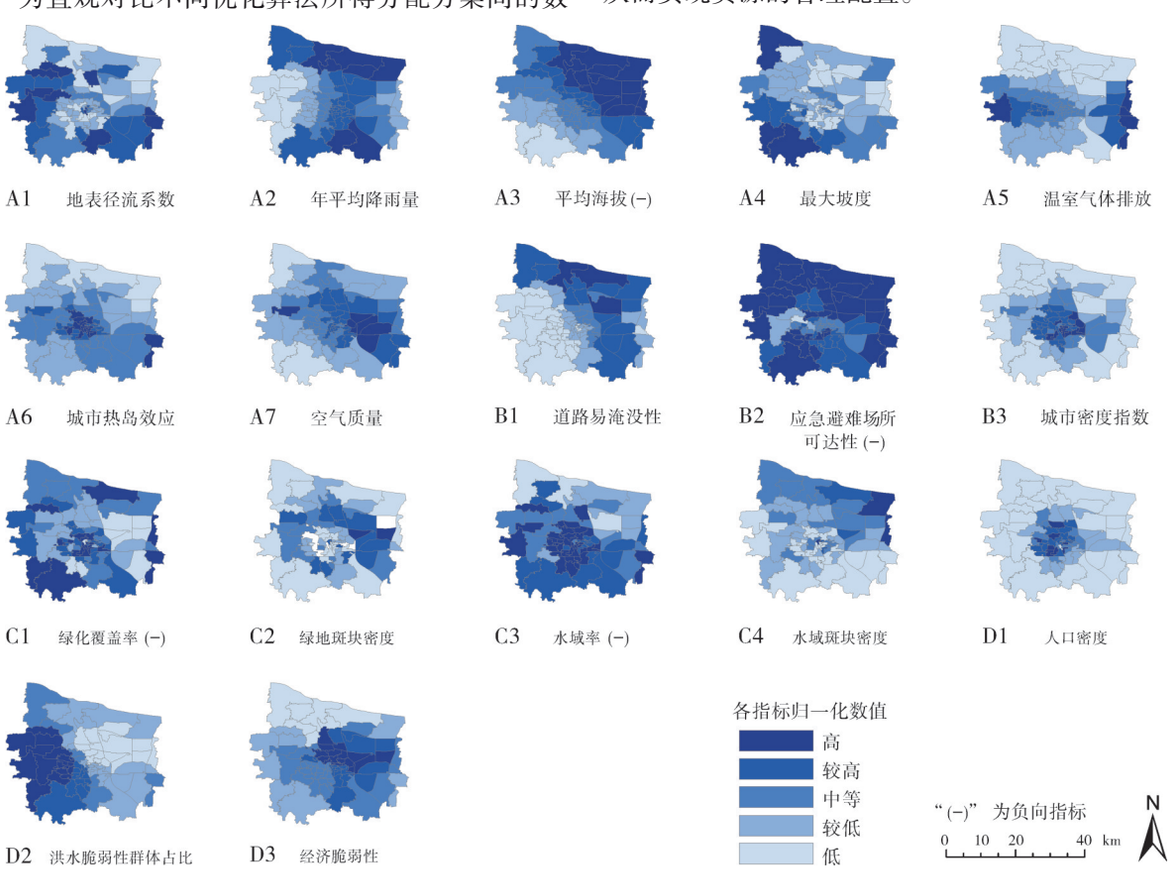


图2 郑州市主城区承洪GI规划各相关指标归一化得分

Fig. 2 Normalized scores of indicators related to flood-resilience GI planning in Zhengzhou's central urban area

2.2 供需与干预措施之间的错配

通过整合郑州市主城区承洪GI部署优先级（图3）与基于用地功能得出的GI空间覆盖密度（图4），本研究构建了GI供需错配格局，并据此划分了承洪

表 5　郑州市主城区承洪 GI 规划识别各指标权重

Table 5　Weights of indicators for identifying flood-resilience GI planning in Zhengzhou's central urban area

准则层 Criterion layer	权重/% Weight	因子层 Index layer	权重/% Weight
自然地理与气候基准维度 Dimension of physical geography and climatic conditions	23.42	A1: 地表径流系数 Surface runoff coefficient	2.87
		A2: 年平均降雨量 Annual average rainfall	1.29
		A3: 平均海拔 Average elevation (−)	0.97
		A4: 最大坡度 Maximum slope	11.19
		A5: 温室气体排放 Greenhouse gas emissions	3.47
		A6: 城市热岛效应 Urban heat island effect	2.23
		A7: 空气质量 Air quality	1.39
基础设施敏感性维度 Dimension of infrastructure vulnerability	25.26	B1: 道路易淹没性 Road flood susceptibility	18.93
		B2: 应急避难场所可达性 Accessibility to emergency shelters (−)	1.66
		B3: 城市密度指数 Urban development index	4.67
自然环境响应维度 Dimension of natural environmental response	24.32	C1: 绿化覆盖率 Green coverage rate (−)	1.29
		C2: 绿地斑块密度 Green space patch density	9.90
		C3: 水域率 Water area ratio (−)	0.85
		C4: 水域斑块密度 Water patch density	12.28
经济社会影响维度 Dimension of socioeconomic impacts	27.00	D1: 人口密度 Population density	12.79
		D2: 洪水脆弱性群体占比 Proportion of flood-vulnerable groups	9.80
		D3: 经济脆弱性 Economic vulnerability	4.41

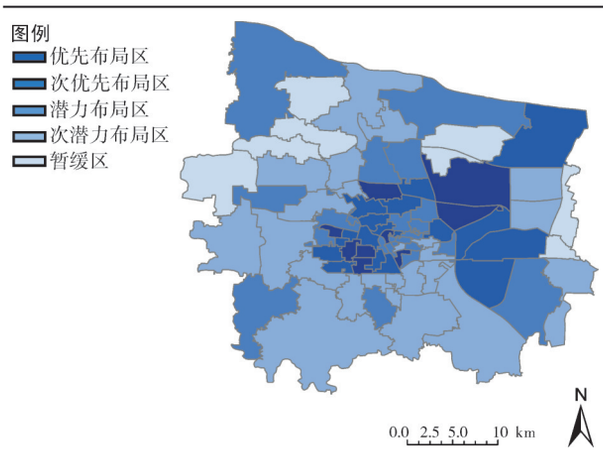


图 3　郑州市主城区承洪 GI 部署优先级地图

Fig. 3　Priority map for flood-resilience GI deployment in Zhengzhou's central urban area

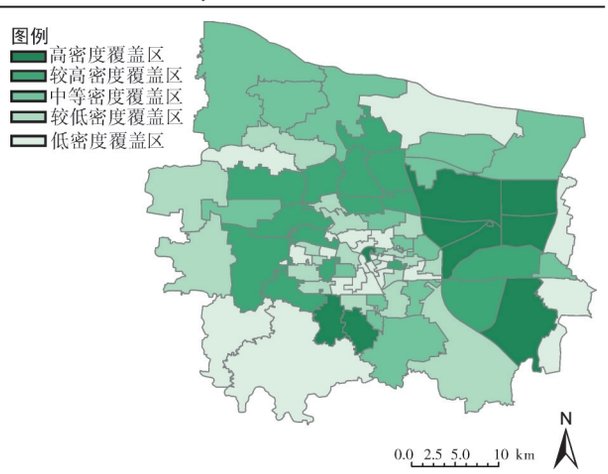


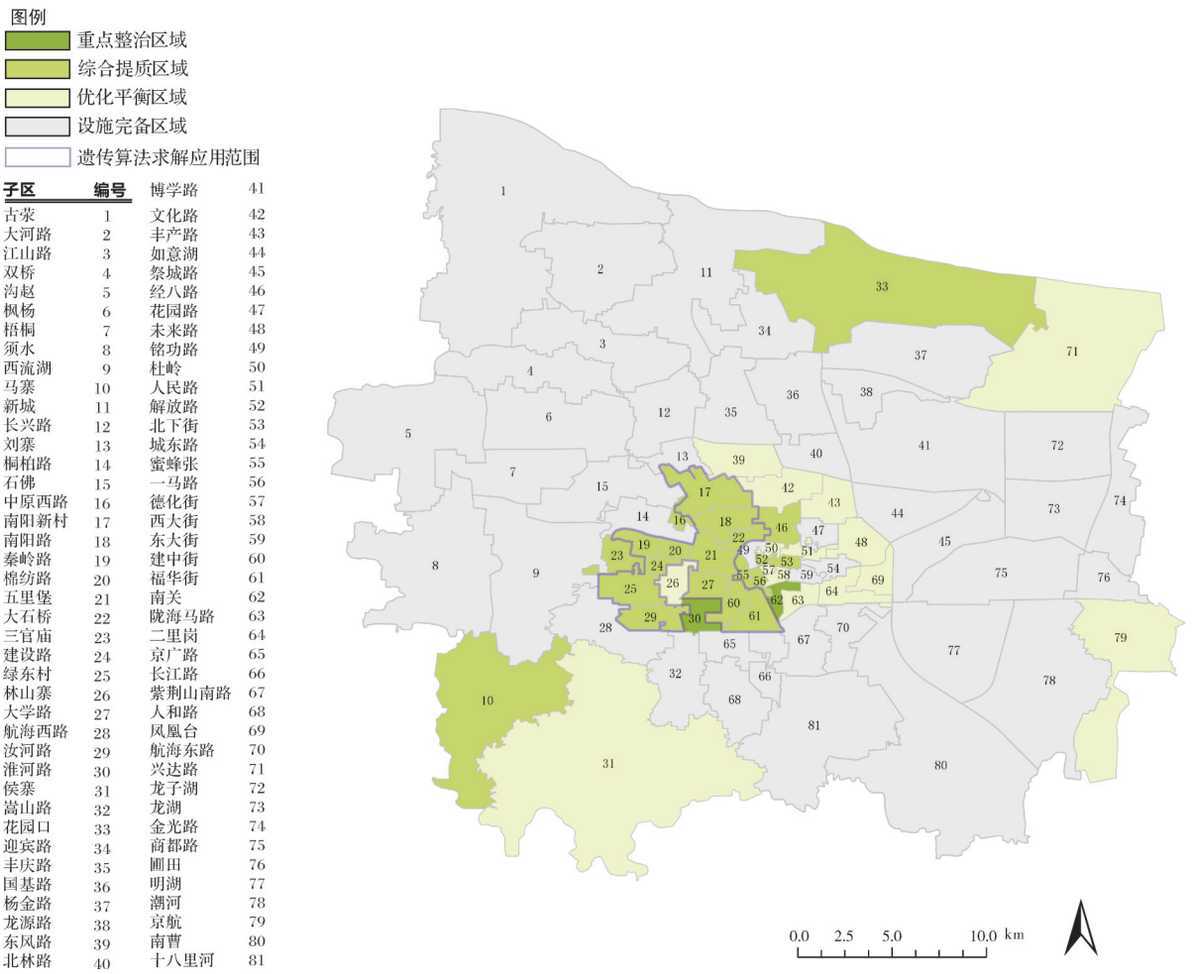
图 4　郑州市主城区 GI 空间覆盖密度

Fig. 4　Spatial coverage density of GI in Zhengzhou's central urban area

GI 整治改善区域(图 5)。从供需平衡视角看,郑州市主城区不同区域在 GI 供需匹配度上呈现出显著差异:部分区域既具有较高承洪需求,又存在明显的 GI 覆盖不足,形成“高需求-低供给”的错配状态;而另一些区域则以结构优化与局部完善为主要需求。

重点整治区域为分布于郑州火车站交通枢纽周边的南关街道和淮河路街道,此区域既是承洪高优先区,又在现状 GI 覆盖密度上长期处于欠配状态。一方面道路网密度高、地表硬化程度大,极端降雨下雨水在短时间内大量汇集;另一方面,2 个区域人口高度密集,城市密度指数较高,受制于用地紧张与既有建设条件,现状绿地、水体等 GI 类型数量有限且多呈零散分布,难以形成连续的滞蓄与渗透网络。因此,在未来规划中,这类区域应作为承洪 GI 改造的优先对象。

综合提质区域的 GI 供给与需求整体相对匹配,但仍存在局部短板。这些区域多位于主城区核心西部,所得结果范围与天地图所发布“7·20”助民郑州灾害专题地图中的积水点、塌方点、停电小区的点位范围高度重合[63]。此外,值得注意的是,除主城区核心西部外,郑州主城区外围的花园口镇与马寨镇也被识别为综合提质区。尽管两者在优先度评分中相对同类区域不高,且近年来未发生大规模洪涝灾害,



子区	编号	博学路	41
古荥	1	文化路	42
大河路	2	丰产路	43
江山路	3	如意湖	44
双桥	4	祭城路	45
沟赵	5	经八路	46
枫杨	6	花园路	47
梧桐	7	未来路	48
须水	8	铭功路	49
西流湖	9	杜岭	50
马寨	10	人民路	51
新城	11	解放路	52
长兴路	12	北下街	53
刘寨	13	城东路	54
桐柏路	14	蜜蜂张	55
石佛	15	一马路	56
中原西路	16	德化街	57
南阳新村	17	西大街	58
南阳路	18	东大街	59
秦岭路	19	建中街	60
棉纺路	20	福华街	61
五里堡	21	南关	62
大石桥	22	陇海马路	63
三官庙	23	二里岗	64
建设路	24	京广路	65
绿东村	25	长江路	66
林山寨	26	紫荆山南路	67
大学路	27	人和路	68
航海西路	28	凤凰台	69
汝河路	29	航海东路	70
淮河路	30	兴达路	71
侯寨	31	龙子湖	72
嵩山路	32	龙湖	73
花园口	33	金光路	74
迎宾路	34	商都路	75
丰庆路	35	圃田	76
国基路	36	明湖	77
杨金路	37	潮河	78
龙源路	38	京航	79
东风路	39	南曹	80
北林路	40	十八里河	81

图5 郑州市主城区承洪GI整治改善区域地图

Fig. 5 Map of areas for remediation and improvement of flood-resilience GI in Zhengzhou's central urban area

但在多准则决策评价体系中仍显示出在风险累积或特定情景触发下具有脆弱性，这表明其风险可能具备潜在性与情景敏感性特征，因此仍需要主动关注。对于该类区域，尽管其已经具有一定的GI基础，但仍然需要通过进一步的规划和调整来提升GI部署质量，预防未来的需求错配程度加深，以达到最佳的防洪效果。优化平衡区域则代表当前GI基本满足承洪需求的区域，多位于主城区核心东部和部分边缘地带。这些区域的错配问题相对较轻，未来工作应侧重于维护与局部微调，以保证现有设施的长期效能与运行稳定性。

需要说明的是，上述3类分区是在供需错配分析基础上，通过与行政街道边界叠加聚合得到的，其目的是将空间分析结果转换为规划管理可直接使用的行政单元。结合后续12个综合提质类子区的GI类型最优配置热图，从而建立行政街道分区与具体工程措施之间的对应关系，避免研究对象在空间分析与管理实践之间产生割裂感。

2.3 最优分配结果分析与实施可行性

通过遗传算法生成的12个片区最优GI类型分配热力图（图6）显示，经过多轮迭代后，模型始终倾向于选择兼具滞蓄与渗透功能的核心设施组合，以缓解中度改善区的供需失衡问题。模型所得结果表明，在绝大多数片区中，渗井、植草沟与渗滤类设施（如透水铺装、人工土壤渗滤、调节塘等）被组合使用，形成从源头控制到过程调蓄的分级体系。从功能定位来看，渗井主要承担调节洪峰和集中蓄水的作用，适合布设于道路交叉口、广场节点等易汇水位置；植草沟依托其植物和土壤的天然过滤和储存功能，有效截留和渗透路面径流，适宜沿道路两侧、停车场边缘等线性空间布设；渗滤类设施则通过大面积透水表面形成分布式渗滤节点，加强区域尺度上的水量调节。三者共同构成了从径流源头到汇点的连续“收集-储存-渗排”循环链条，体现了以小尺度分

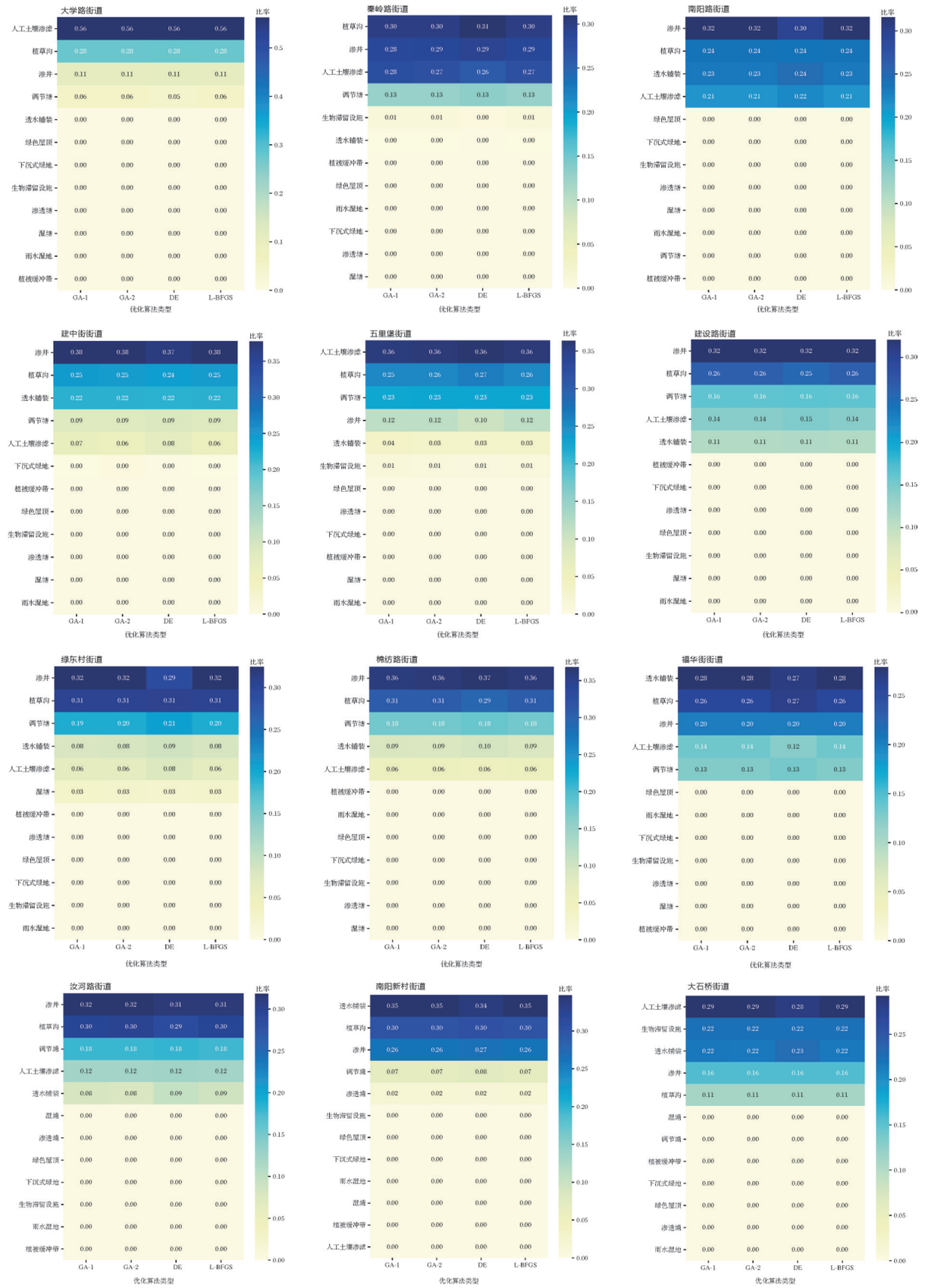


图 6　遗传算法衍生解决方案热图可视化

Fig. 6　Heatmap visualization of solutions derived from the genetic algorithm

散式设施支撑大尺度系统承洪能力的优化思路。

在实施可行性方面，利用遗传算法进行类型配置优化的片区主要位于郑州市核心西部老城区，高建设强度与存量空间约束决定了上述渗井、植草沟与渗滤类设施的组合更适合以嵌入式和微更新方式实施。透水铺装与人工土壤渗滤可优先依托道路、人行道、停车场及广场铺装更新等存量改造工程，在不新增用地的条件下降低产流、增强入渗；植草沟可结合道路绿化带、分隔带及边角线性空间进行连续布设，形成可串联的径流拦截与传输通道；渗井则宜在道路交叉口、低洼积水点周边及具备入渗条件的节点空间布设，以发挥集中调蓄与削峰作用。而调节塘对场地连续性与面积条件要求更高，可优先嵌入街区小微开敞空间、公园绿地边缘及城市更新释放地块，作为分散式调蓄节点补充区域蓄滞能力。与此同时，老城区地下管线密集、交通组织复杂，渗井与调节塘等涉及开挖的设施在施工扰动与成本控制上存在一定约束，建议与道路大中修、管网更新、老旧小区改造及河道整治等既定市政工程统筹实施，通过同步施工降低边际成本并减少对城市运行的影响。总体而言，优化结果提供了可操作的类型组合与布设逻辑，但在工程落地层面仍需进一步结合土壤渗透性、地下管线分布、用地属性及管理边界等情况开展节点级核查，并据此形成分区分级、分期滚动推进的实施清单。

3 讨 论

本研究以郑州市主城区为典型案例，面向“7·20”等极端降雨暴露出的高密度建成区承洪短板，在提升洪涝韧性目标导向下，整合自然气候、工程设施、生态格局与社会经济等多维因子，构建十余项指标的综合评估框架，从空间部署优先区识别与类型配置优化两阶段量化提出承洪型GI部署策略。优先区识别结果显示，承洪GI部署优先区呈现显著空间集聚，高优先区主要分布于老城区、主要河道两侧及低洼汇水通道等区域，这些区域普遍具有不透水面比例高、人口密度大、排水系统承载压力突出的共同特征，且其范围与天地图发布的“7·20”助民（郑州灾害专题）地图中积水点、塌方点、停电小区等点位分布高度重合[63]，在实证层面验证了本研究识别结果对历史灾害暴露的指向性与方法的科学性。值得注意的是，研究还在主城区外围识别出花园口镇与马寨镇两处潜在雨洪风险区域，尽管其优先部署得分相对同类区域不高，且近年未出现大规模洪涝灾害记录，但在本研究评价体系中均被划入综合提质区，提示其可能存在风险累积或情景触发下的脆弱性，应在规划与治理层面纳入前瞻性监测与适度干预序列。进一步的供需分析表明，郑州市主城区承洪GI供需错配存在显著空间差异，重点整治区呈现“高需求-低供给”的结构性短板，是优先补齐覆盖规模的关键区域；综合提质区与优化平衡区则分别以结构优化与局部完善为主要需求，说明单一以面积扩张或强度提升为导向的GI建设难以应对差异化承洪风险，应转向分区分类、因需施策的配置逻辑。在此基础上，本研究引入多目标遗传算法对不同子区内GI类型组合与比例进行优化，算法经多轮迭代后模型始终倾向于选择兼具滞蓄与渗透功能的核心设施组合，以缓解中度改善区的供需失衡；且在绝大多数片区中，渗井、植草沟与渗滤类设施被复合组合，形成从源头控制到过程调蓄的分级承洪体系。三者共同构成从径流源头到汇点的连续“收集-储存-渗排”循环链条，体现了以小尺度分散式设施支撑大尺度系统承洪能力的优化思路，也表明复合型GI较单一设施更有利于提升局部洪涝调控效率与系统冗余度。

从规划与治理启示看，郑州市主城区承洪GI建设宜遵循“源头削减-过程滞蓄-末端分散渗排”的连续策略，并落实分区分类实施路径，在重点整治区优先补足GI规模与覆盖，在综合提质区侧重优化GI类型结构与组合，在优化平衡区以查漏补缺和精细维护为主；同时，GI应与排水管网、调蓄设施与行洪通道相统筹，推进“蓝-绿-灰”协同，构建更能适应极端降雨情景的复合调蓄体系，提升整体韧性与资源配置公平性。

需要指出的是，本研究仍存在一定局限。其一，GI类型效能赋值采用“关联即赋值1”的简化处理，隐含不同类型效能近似的假设，一定程度上可能会削弱类型差异与精细化配置的判别力；后续可结合监测数据或水文-水动力模拟对“类型-指标”效能进行量化校准，并引入权重修正以提升结果精度。其二，现阶段优化主要基于承洪能力与布局结构等静态指标，尚未与城市排水管网模型、多重暴雨重现期情景及复合灾害链过程系统耦合，可能低估极端事件下管网约束、回水顶托与失效传播对GI布局反馈的影响。未来研究可在本框架基础上开展多情景优化，将其与水文-水动力模型耦合，纳入多降雨情景、土地利用演替与气候变化影响，并引入多主体偏好与

实施约束，形成更贴近规划实践的决策支持工具。

参考文献 References

[1] 王岩，王昊，崔鹏，等．气候变化的灾害效应与科学挑战[J]．科学通报，2024，69(2)：286-300.WANG Y，WANG H，CUI P，et al.Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges[J].Chinese science bulletin，2024，69(2)：286-300(in Chinese with English abstract).

[2] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等．中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战[J]．水科学进展，2024，35(3)：357-373.SONG X M，XU N T，ZHANG J Y，et al.Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J].Advances in water science，2024，35(3)：357-373(in Chinese with English abstract).

[3] 吕永龙，王尘辰，曹祥会．城市化的生态风险及其管理[J]．生态学报，2018，38(2)：359-370.LÜ Y L，WANG C C，CAO X H.Ecological risk of urbanization and risk management[J].Acta ecologica sinica，2018，38(2)：359-370(in Chinese with English abstract).

[4] GRABOWSKI Z J，MCPHEARSON T，MATSLER A M，et al.What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning[J].Frontiers in ecology and the environment，2022，20(3)：152-160.

[5] 陈睿山，陈丹，王云．风景园林应对气候变化的创新路径[J]．华中农业大学学报，2023，42(4)：23-31.CHEN R S，CHEN D，WANG Y.Innovative approaches to address climate change in landscape architecture[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2023，42(4)：23-31(in Chinese with English abstract).

[6] 艾伦·巴伯，谢军芳，薛晓飞．绿色基础设施在气候变化中的作用[J]．中国园林，2009，25(2)：9-14.BARBER A，XIE J F，XUE X F.The role of green infrastructure in climate change[J].Chinese landscape architecture，2009，25(2)：9-14(in Chinese with English abstract).

[7] REU JUNQUEIRA J，SERRAO-NEUMANN S，WHITE I.Using green infrastructure as a social equity approach to reduce flood risks and address climate change impacts：a comparison of performance between cities and towns[J/OL].Cities，2022，131：104051[2025-11-14].https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104051.

[8] 李开然．绿色基础设施：概念，理论及实践[J]．中国园林，2009，25(10)：88-90.LI K R.Green infrastructure：concept，theory and practice[J].Chinese landscape architecture，2009，25(10)：88-90(in Chinese with English abstract).

[9] WANG Z H，LI Z H，WANG Y F，et al.Building green infrastructure for mitigating urban flood risk in Beijing，China[J/OL].Urban forestry & urban greening，2024，93：128218[2025-11-14].https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128218.

[10] 王雪原，周燕，禹佳宁．基于元胞自动机模拟城市扩张下的绿色基础设施布局演变与内涝风险评估：以武汉市为例[J]．风景园林，2020，27(11)：50-56.WANG X Y，ZHOU Y，YU J N.Evolution of green infrastructure layout and waterlogging risk assessment based on cellular automata simulation of urban expansion：a case study of Wuhan City[J].Landscape architecture，2020，27(11)：50-56(in Chinese with English abstract).

[11] 刘颂，毛家怡，沈洁．基于SWMM的场地绿色雨水基础设施水文效应评估：以同济大学校园为例[J]．风景园林，2017(1)：60-65.LIU S，MAO J Y，SHEN J.Hydrology evaluation of green stormwater infrastructure based on SWMM：case study on Tongji University campus[J].Landscape architecture，2017(1)：60-65(in Chinese with English abstract).

[12] 洪歌，吴雪飞，蔡锐鸿．最佳网格分析尺度下城市绿色基础设施的景观格局对碳汇绩效的影响研究[J]．中国园林，2023，39(3)：138-144.HONG G，WU X F，CAI R H.Influence of urban green infrastructure landscape pattern on carbon sequestration performance at the optimal grid unit[J].Chinese landscape architecture，2023，39(3)：138-144(in Chinese with English abstract).

[13] 贾佳，荆忠伟，李文．基于区域差异化视角的资源型城市绿色基础设施网络构建与优化：以大庆市主城区为例[J]．中国园林，2021，37(9)：77-82.JIA J，JING Z W，LI W.Construction and optimization of green infrastructure network in resource-based cities based on the perspective of regional differentiation：a case study of the main urban area in Daqing，China[J].Chinese landscape architecture，2021，37(9)：77-82(in Chinese with English abstract).

[14] 许超，孟楠，逯非，等．生态系统服务需求视角下的澳门城市绿色基础设施管理研究[J]．中国园林，2020，36(9)：104-109.XU C，MENG N，LU F，et al.Research on urban green infrastructure management in Macao from the perspective of ecosystem service demand[J].Chinese landscape architecture，2020，36(9)：104-109(in Chinese with English abstract).

[15] HE L，LI S，CUI C H，et al.Runoff control simulation and comprehensive benefit evaluation of low-impact development strategies in a typical cold climate area[J/OL].Environmental research，2022，206：112630[2025-11-14].https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112630.

[16] HUANG J J，XIAO M，LI Y，et al.The optimization of Low Impact Development placement considering life cycle cost using genetic algorithm[J/OL].Journal of environmental management，2022，309：114700[2025-11-14].https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114700.

[17] YU Y，ZHOU Y C，GUO Z Y，et al.A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale：integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform[J/OL].Science of the total environment，2022，831：154843[2025-11-14].https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154843.

[18] HERATH Mudiyanselage Malhamige Sonali Dinesha，FUJINO T，SENAVIRATHNA M D H J.Urban planning with rational green infrastructure placement using a critical area detection method[J].Geomatics，2024，4(3)：253-270.

[19] MEEROW S，NEWELL J P.Spatial planning for multifunctional green infrastructure：growing resilience in Detroit[J].

Landscape and urban planning, 2017, 159: 62-75.

[20] LI L Y, UYTTENHOVE P, VAN EETVELDE V. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk: a methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent[J/OL]. Landscape and urban planning, 2020, 194: 103703[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103703.

[21] 国务院灾害调查组. 河南郑州"7·20"特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2022. State Council Disaster Investigation Team. Investigation report on the "7·20" extraordinarily heavy rainstorm disaster in Zhengzhou, Henan[R]. Beijing: The State Council, 2022(in Chinese).

[22] SHARIFI A. Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): a review[J/OL]. Sustainable cities and society, 2023, 99: 104910[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104910.

[23] CARDONA O D, VAN AALST M K, BIRKMANN J, et al. Determinants of risk: exposure and vulnerability[M]// FIELD C B, BARROS V, STOCKER T F, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012: 65-108.

[24] 张会,李铖,程炯,等. 基于"H-E-V"框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2019, 38(2): 175-190. ZHANG H, LI C, CHENG J, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability[J]. Progress in geography, 2019, 38(2): 175-190 (in Chinese with English abstract).

[25] WANG Y H, ZHANG Q T, LIN K R, et al. A novel framework for urban flood risk assessment: multiple perspectives and causal analysis[J/OL]. Water research, 2024, 256: 121591[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121591.

[26] APARICIO URIBE C H, BONILLA BRENES R, HACK J. Potential of retrofitted urban green infrastructure to reduce runoff: a model implementation with site-specific constraints at neighborhood scale[J/OL]. Urban forestry & urban greening, 2022, 69: 127499[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127499.

[27] EPPS T H, HATHAWAY J M. Using spatially-identified effective impervious area to target green infrastructure retrofits: a modeling study in Knoxville, TN[J]. Journal of hydrology, 2019, 575: 442-453.

[28] ARNOLD C L Jr, GIBBONS C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator[J]. Journal of the American planning association, 1996, 62(2): 243-258.

[29] RODRIGUEZ M, FU G T, BUTLER D, et al. The effect of green infrastructure on resilience performance in combined sewer systems under climate change[J/OL]. Journal of environmental management, 2024, 353: 120229[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120229.

[30] XU Z C, SOHN W. A longitudinal comparison of stormwater runoff mechanisms in growing and shrinking regions: evaluating impervious composition and green infrastructure connectivity changes[J/OL]. Urban climate, 2024, 55: 101875[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101875.

[31] KEYVANFAR A, SHAFAGHAT A, ISMAIL N, et al. Multifunctional retention pond for stormwater management: a decision-support model using analytical network process (ANP) and global sensitivity analysis (GSA)[J/OL]. Ecological indicators, 2021, 124: 107317[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107317.

[32] ZHOU K J, KONG F H, YIN H W, et al. Urban green infrastructure for flood resilience: runoff sink-source regime shifts and vegetation structure influences[J/OL]. Geography and sustainability, 2025, 6(5): 100333[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2025.100333.

[33] LOPES H S, VIDAL D G, CHERIF N, et al. Green infrastructure and its influence on urban heat island, heat risk, and air pollution: a case study of Porto (Portugal)[J/OL]. Journal of environmental management, 2025, 376: 124446[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124446.

[34] JONES L, ANDERSON S, LÆSSØE J, et al. A typology for urban green infrastructure to guide multifunctional planning of nature-based solutions[J/OL]. Nature-based solutions, 2022, 2: 100041[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100041.

[35] KAVEHEI E, JENKINS G A, ADAME M F, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 94: 1179-1191.

[36] ZHANG R W, YING J, ZHANG Y Q, et al. Future carbon sequestration benefits: the role of urban green Infrastructure's spatial patterns[J/OL]. Ecological indicators, 2024, 166: 112582[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112582.

[37] GANESHAN M, MURTUGUDDE R, IMHOFF M L. A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall[J]. Urban climate, 2013, 6: 1-23.

[38] THORSSON S, BÄCKLIN O, FRIBERG J, et al. A framework for integrated assessment of blue-green infrastructure: a decision support tool for evaluating climate adaptation and social benefits in relation to construction and maintenance costs[J/OL]. Cities, 2025, 166: 106239[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106239.

[39] ZELLNER M, MASSEY D, MINOR E, et al. Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations[J]. Computers, environment and urban systems, 2016, 59: 116-128.

[40] ZELLNER M L, MASSEY D. Modeling benefits and tradeoffs of green infrastructure: evaluating and extending parsimo-

nious models for neighborhood stormwater planning[J/OL]. Heliyon, 2024, 10(5): e27007[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27007.

[41] PREGNOLATO M, FORD A, WILKINSON S M, et al. The impact of flooding on road transport: a depth-disruption function[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2017, 55: 67-81.

[42] QIU J L, TAN H W, YUAN S N, et al. Selection of urban-flood-shelter locations based on risk assessment[J]. Water-energy nexus, 2024, 7: 151-162.

[43] SRITART H, MIYAZAKI H, KANBARA S, et al. Methodology and application of spatial vulnerability assessment for evacuation shelters in disaster planning [J/OL]. Sustainability, 2020, 12(18): 7355[2025-11-14]. https://doi.org/10.3390/su12187355.

[44] JIA Z, TANG S, LUO W, et al. Small scale green infrastructure design to meet different urban hydrological criteria[J]. Journal of environmental management, 2016, 171: 92-100.

[45] ZHOU H, GAO C, LUAN Q H, et al. Multi-objective optimization of distributed green infrastructure for effective stormwater management in space-constrained highly urbanized areas[J/OL]. Journal of hydrology, 2024, 644: 132065[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132065.

[46] WANG M, ZHAO J Y, XIONG Z H, et al. Strategic deployment of nature-based solutions for urban flood management in high-density urban landscapes [J/OL]. Ecological indicators, 2025, 176: 113681[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113681.

[47] YANG B, LEE D K. Planning strategy for the reduction of runoff using urban green space[J/OL]. Sustainability, 2021, 13(4): 2238[2025-11-14]. https://doi.org/10.3390/su13042238.

[48] STACCIONE A, CANDIAGO S, MYSIAK J. Mapping a Green Infrastructure Network: a framework for spatial connectivity applied in Northern Italy[J]. Environmental science & policy, 2022, 131: 57-67.

[49] LI Y, OSEI F B, DAI S Q, et al. Identifying landscape patterns at different scales as driving factors for urban flooding[J/OL]. Ecological indicators, 2025, 176: 113614[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113614.

[50] KÖIV-VAINIK M, KILL K, ESPENBERG M, et al. Urban stormwater retention capacity of nature-based solutions at different climatic conditions [J/OL]. Nature-based solutions, 2022, 2: 100038[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100038.

[51] GOLDEN H E, HOGHOOGHI N. Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science [J/OL]. WIREs water, 2018, 5: e1254[2025-11-14]. https://doi.org/10.1002/wat2.1254.

[52] HASALA D, SUPAK S, RIVERS L. Green infrastructure site selection in the Walnut Creek wetland community: a case study from southeast Raleigh, North Carolina[J/OL]. Landscape and urban planning, 2020, 196: 103743[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103743.

[53] PALLATHADKA A, SAUER J, CHANG H, et al. Urban flood risk and green infrastructure: who is exposed to risk and who benefits from investment? A case study of three U.S. cities[J/OL]. Landscape and urban planning, 2022, 223: 104417[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104417.

[54] ELLIOT T, TORRES-MATALLANA J A, TEEBKEN J. Urbanization under extreme climate events leads to synchronized decreases in flood protection and increases in vulnerability [J/OL]. Cities, 2025, 160: 105827[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105827.

[55] LI C N, JIANG C B, CHEN J, et al. An overview of flood evacuation planning: models, methods, and future directions[J/OL]. Journal of hydrology, 2025, 656: 133026[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133026.

[56] SELSOR H, BLEDSOE B P, LAMMERS R. Recognizing flood exposure inequities across flood frequencies[J/OL]. Anthropocene, 2023, 42: 100371[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100371.

[57] HERREROS-CANTIS P, HOFFMAN L, KENNEDY C, et al. Co-producing research and data visualization for environmental justice advocacy in climate change adaptation: the milwaukee flood-health vulnerability assessment [J/OL]. Cities, 2024, 155: 105474[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105474.

[58] VAN DER BORGHT R, PALLARES-BARBERA M. Greening to shield: the impacts of extreme rainfall on economic activity in Latin American cities[J/OL]. Global environmental change, 2024, 87: 102857[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102857.

[59] YANG M, MOHAMMAD YUSOFF W F, MOHAMED M F, et al. Flood economic vulnerability and risk assessment at the urban mesoscale based on land use: a case study in Changsha, China [J/OL]. Journal of environmental management, 2024, 351: 119798[2025-11-14]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119798.

[60] KUMMU M, KOSONEN M, MASOUMZADEH SAYYAR S. Downscaled gridded global dataset for gross domestic product (GDP) per capita PPP over 1990－2022[J/OL]. Scientific data, 2025, 12(1): 178[2025-11-14]. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04487-x.

[61] RUI C, ZHANG H F, CHEN B Z. China temporal administrative map: a multitemporal database for Chinese historical administrative divisions (2009－2023)[C]//Third International Conference on Environmental Remote Sensing and Geographic Information Technology (ERSGIT 2024). November 22-24, 2024. Xi'an, China: SPIE, 2025: 497-507.

[62] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南：低影响开发雨水系统构建(试行)[R]. 北京：中国建筑工业出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical guide for sponge city construction: development of low im-

pact development (LID) stormwater systems (trial)[R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014(in Chinese).

[63] 河南省测绘地理信息技术中心.7·20助民—天地图·河南[EB/OL].https://henan.tianditu.gov.cn/map/thematicLayer. Henan Geomatics Center. 7·20 public assistance: Tianditu · Henan[EB/OL].https://henan.tianditu.gov.cn/map/thematicLayer (in Chinese).

Genetic-algorithm-based optimization of flood-resilient green infrastructure planning: a case study of Zhengzhou

KUANG Da[1], ZHANG Yinhao[1], YANG Xiaotong[1], LI Xiangyi[1,2]

1.*School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*;
2.*State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Shenzhen 518060, China*

Abstract Traditional grey infrastructure has shown significant limitations in responding to complex disaster chains due to neglecting the synergistic effects of natural hydrological processes and ecosystem services. Green infrastructure (GI), by leveraging natural processes for regulation and achieving multi-functional synergy, was regarded as an effective way to overcome these limitations. This article took Zhengzhou City as an empirical case to develop a framework for the optimization of planning GI for flood-resilience that integrates multi-criteria decision-making and evaluation with genetic algorithm. An indexes system was constructed from four dimensions including the natural geography and climatic baseline, infrastructure sensitivity, natural environmental response, and the socio-economic impacts. A spatial deployment priority model of GI was built on a GIS platform. On this basis, a genetic algorithm was introduced to perform quantitative optimization of the types and scales of GI for flood-resilience within each priority zone under multiple objectives and constraints to obtain near-optimal GI layout schemes for different regions. The results showed that the proposed framework can effectively identify the high-priority deployment areas and key control zones of GI for flood-resilience in Zhengzhou City while simultaneously considering the safety of flood-resilience and construction constraints, optimize the portfolio configuration of different types of GI, and achieve a closed-loop planning process from spatial priority identification to type allocation optimization. It is confirmed that coupling multi-criteria spatial evaluation with a multi-objective genetic algorithm can provide quantifiable basis for planning and decision-making, and replicable computational framework for improving flood-resilience in high-density megacities. It will provide a transferable technical reference for constructing the layout of flood-resilience-oriented GI in other rapidly urbanizing areas of the same type.

Keywords urban flood-resilience; green infrastructure (GI); GIS; genetic algorithm; multi-criteria decision analysis

(责任编辑:边书京)