

DOI: 10.20103/j.stxb.202308201800

倪丽丽, 刘晔, 李经纶, 李云玉. 基于生态水文调节服务的石家庄雨涝灾害供需匹配分析与街区规划干预. 生态学报, 2024, 44(13): 5828-5841.

Ni L L, Liu Y, Li J L, Li Y Y. Supply-demand matching and block planning interventions of waterlogging hazards in Shijiazhuang city based on eco-hydrological regulation services. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5828-5841.

基于生态水文调节服务的石家庄雨涝灾害供需匹配分析与街区规划干预

倪丽丽^{1,2}, 刘 晔^{1,*}, 李经纶¹, 李云玉¹

1 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300132

2 河北省健康人居环境重点实验室, 天津 300132

摘要: 在雨涝灾害威胁日益凸显的背景下, 基于生态系统水文调节服务供需匹配分析的规划防涝优先干预区识别, 为高效降低城市雨涝风险、利用规划措施防涝提供了新的研究思路与科学支撑。运用数据叠置、水文模拟及公式计算法, 将城市原生雨涝供给能力与雨涝需求水平统一至同一评估体系中。结合降雨量、下垫面类型, 运用径流曲线模型对街区地表径流调节率进行计算, 生成供给能力评估结果; 以 GIS 水文模拟结果计算得出的危险性、暴露性和脆弱性指数生成需求水平评估结果。根据石家庄中心四区 3a 一遇、50a 一遇情景供需匹配结果, 划定城市街区尺度的规划干预等级, 并分类提出相应规划策略。研究结果表明: 石家庄市中心四区低供给高需求街区在 3a 一遇降雨情景下以点状聚集分布; 50a 一遇降雨情景下, 在京广铁路沿线呈现纵向聚集形态。同时, 在两种降雨情景下, 规划干预高等级街区均集中出现于桥西区苑东街道、彭后街道、东华街道, 长安区长丰街道、建北街道, 裕华区裕翔街道、建华南街道。根据规划干预等级、供需相对关系及供需失衡原因, 分别提出 3a 一遇、50a 一遇降雨情景下的九类规划干预策略, 为城市雨涝灾害的规划应对提供优化思路。

关键词: 生态水文调节服务; 雨涝供需匹配; 规划干预; 石家庄中心四区

Supply-demand matching and block planning interventions of waterlogging hazards in Shijiazhuang city based on eco-hydrological regulation services

NI Lili^{1,2}, LIU Ye^{1,*}, LI Jinglun¹, LI Yunyu¹

1 School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China

2 Key Laboratory of Healthy Human Settlements in Hebei Province, Tianjin 300132, China

Abstract: In the context of the increasing threat of waterlogging, based on the existing hydrological regulation service capacity of the ecosystem, the identification of urban waterlogging risks and areas in urgent need of planning and optimization of flood prevention can provide a scientific basis for the efficient reduction of urban waterlogging risk and the use of planning measures to prevent flooding. Data overlay, hydrologic simulation and formula calculation methods were used to unify the urban primary rainfall and flooding supply capacity, as well as rainfall and flooding demand levels into the same assessment system. Combining rainfall and subsurface type, the runoff curve model was used to calculate the neighborhood surface runoff regulation rate to generate the supply capacity assessment results; and the hazard, exposure, and vulnerability indices calculated from GIS hydrologic simulation results were used to generate the demand level assessment results. Based on the results of matching supply and demand for the 1-in-3-year and 1-in-50-year scenarios in four central districts of Shijiazhuang city, the planning intervention level of urban block scale was delineated, and corresponding planning strategies were proposed. The results show that the low supply and high demand blocks in the four municipal

基金项目: 河北省高等学校人文社会科学研究项目 (BJS2022007)

收稿日期: 2023-08-20; 网络出版日期: 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ly9816@126.com

districts of Shijiazhuang City are distributed in a point-like aggregation under the scenario of 1-in-3-year period, while under the scenario of 1-in-50-year period, the blocks along the Beijing-Guangzhou Railway line show a longitudinal aggregation pattern. Under both scenarios, the high planning intervention level blocks are concentrated in Yuandong Street, Penghou Street, Donghua Street in Qiaoxi District, Changfeng Street, Jianbei Street in Changan District, Yuxiang Street and Jianhua South Street in Yuhua District. Based on the planning intervention level, relative relationship between supply and demand, and the causes of supply and demand problems, we propose nine types of planning intervention strategies for the 1-in-3-years and 1-in-50-years rain and flood scenarios, which provide optimization directions for cities to cope with waterlogging disasters.

Key Words: eco-hydrological regulation services; matching supply and demand of waterlogging; planning interventions; four municipal districts in the center of Shijiazhuang

近年来,全球气候变化及城市化导致的雨涝灾害频繁发生。联合国发布的相关报告指出,与 1980—1999 年相比,近二十年洪涝灾害次数翻倍增加。城市作为高密度物质聚集体,雨涝等极端灾害天气会对其正常运行造成极大影响。生态系统具备天然的水文调节服务能力^[1-2],雨涝场景下表现为其对雨水的吸、蓄、渗等自然过程。但受城市建设发展影响,雨涝调节过程中易出现生态水文调节供给与城市主体期望的需求出现失衡现象,影响甚至限制了原生生态水文调节能力的发挥,导致城市雨涝威胁上升。因此,识别城市供需不匹配的问题区域并进行针对性规划防控,可为城市安全稳定发展提供有力支撑。

当前针对城市生态水文调节服务供需评估的测度方法可概括为矩阵专家评估法^[3]、数据叠置法^[4]、水文模拟法^[5-7]、公式计算法^[8]、实地调查法^[9]等,其中,矩阵专家评估法通过构建评估矩阵、专家评价生成结果,主观性较强,适用于难以获取数据的宏观研究;数据叠置法评估通过空间叠加影响因素指标结果进行评估,结果精度相对较高,适用于宏、中观;水文模拟法通过模拟真实地表水文变化确定供需数值,对数据要求较高,如需建立精细模型工作量繁多,适用于宏、中、微观;公式计算法以指标计算公式得出结果,需多种基础数据,适用于宏、中、微观;实地调查法需对现实环境或结合历史数据进行测量计算,工作量大、数据获取难度大,适用于微观。现阶段生态水文调节服务供需研究更多关注单一情景下的供需评估结果及分析,未能对不同情景进行对比分析,且少有研究进一步明确供需评估与空间的关系、结合规划学理论提出基于供需关系的规划提升及应用策略。

因此,本研究基于生态系统服务供需关系,根据上述方法适用尺度及优缺点,选用数据叠置、水文模拟结合公式计算法,构建生态水文调节服务雨涝供需评价体系,对 3a、50a 一遇两情景供需关系进行匹配分析与对比研究。并进一步关联城市雨涝灾害的规划防控,确定街区规划干预分级,提出分类优化策略,为提高城市雨涝灾害应对能力、高效规划防涝提供宏观格局支撑及优化方向。

1 研究区概况

石家庄市地处河北省中南部,是河北省省会、特大城市,是京津冀地区的重要城市之一,作为交通枢纽,是连接华北、华东和华南的重要节点。石家庄中心四区包括新华区、桥西区、长安区、裕华区,其地势较为平坦,且西北高、东南低。气候类型为大陆性季风气候,降雨主要集中于夏季 6—8 月,1963 年 8 月、1996 年 8 月、2008 年 8 月、2016 年 7 月、2022 年 8 月、2023 年 7 月均发生重大雨涝灾害,造成严重的经济损失、人员伤亡,严重影响城市正常运转^[10]。此外,根据 2014 年管理部门开展的石家庄中心四区排水管网摸排结果可知^[11],除重要地区外,实际雨水管道排水能力均低于 1a 一遇的雨水重现期设计能力。随着近年来城市化进程加快,中心四区下垫面结构发生变化,草地、耕地、林地、裸地、水域分别占总面积的 2.80%、3.84%、10.50%、14.82%、2.37%,而建设用地形成的不透水面占比高达 65.67%。中心四区地面硬化比例高,且呈现中部向外围扩散的趋势,软质下垫面则普遍分布于边缘地区。强降雨威胁加剧、城市排涝能力不足以及原生雨水调蓄能力薄弱导致石家庄中心四区雨涝安全问题尤为突出。因此,以石家庄中心四区为研究对象,并以 2021 年前已建成的

主、次干路相交形成的街区(图 1)为供需匹配分析基本单元,数量共计 362 个。

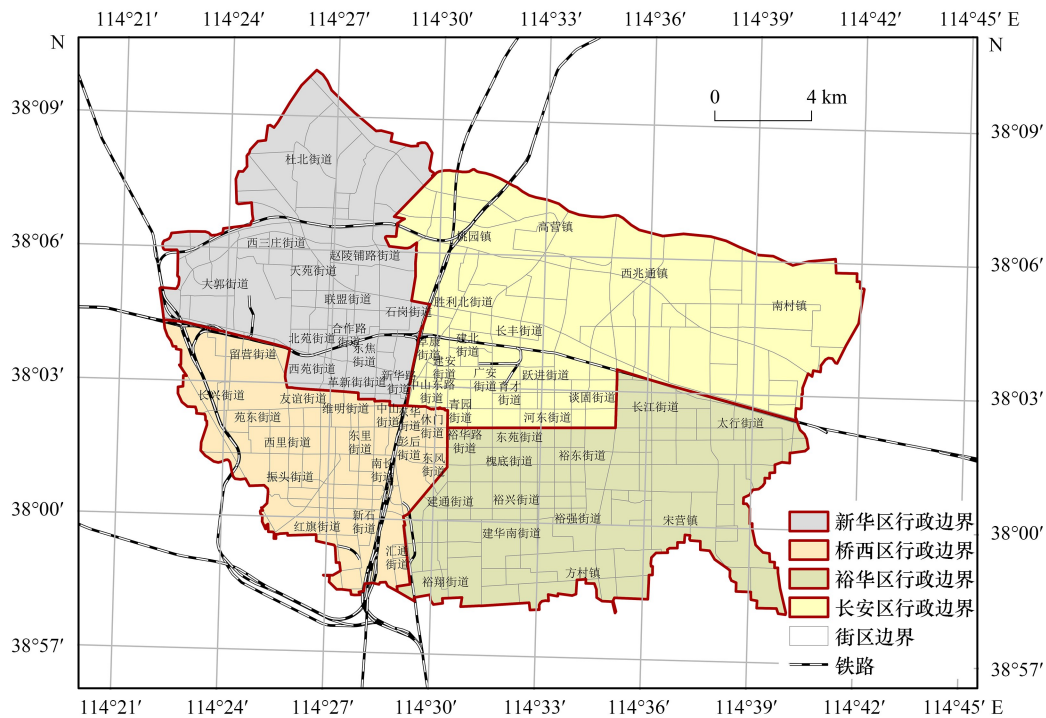


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

根据研究需要,对卫星遥感影像、土壤、数字高程、人口、路网、建筑、降雨数据进行收集。数据具体来源、年份、精度及用途如下表(表 1)。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据名称 Data name	来源 Sources	数据年份 Year of data	数据精度 Data precision	用途 Use
卫星遥感影像数据 Satellite remote sensing image data	地理空间数据云网站 (https://www.gscloud.cn)	2021 年	15m	识别研究区下垫面类型,支撑地表径流模拟
土壤数据 Soil data	中国土壤科学数据库 (http://vdb3.soil.csdn.cn/)	2021 年	1:100 万	确定研究区土壤类型,支撑地表径流模拟
数字高程数据 Digital elevation data	NASA 地球科学数据网站 (https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)	2021 年	12.5m	支撑 GIS 水文模拟
人口数据 Population data	链家房产网站 (https://sjz.lianjia.com/)	2021 年	各小区	计算指标值
路网及建筑数据 Road network and building data	Open Street Map 网站 (http://www.openstreetmap.org/)	2021 年	—	计算指标值
历史积水位置 Historical waterlogging location	石家庄市市政部门及交管部门	2021 年	—	验证 GIS 水文模拟结果

2.2 技术路线

研究以生态水文调节服务作为切入点,运用数据叠置、水文模拟及公式计算法,将城市原生雨涝供给能力与雨涝需求水平统一至同一评估体系中。通过计算 3a 一遇、50a 一遇情景降雨量、提取下垫面类型,对街区地表径流调节率进行计算,生成供给能力评估结果;根据多指标计算得出的危险性、暴露性和脆弱性指数生成需求水平评估结果。运用 Z-score 标准化方法及优先级指数进行供需关系匹配、规划干预等级划分。最终分类提出两情景下的街区规划干预策略。研究技术路线如下图(图 2)。

2.3 研究方法

2.3.1 生态水文调节服务下雨涝供需评估体系构建及权重确定方法

供给能力评估主要衡量生态系统提供的自然资源与服务^[12],雨涝情景下则体现为调节地表径流。因此,生态水文调节服务下的雨涝供给能力可通过街区内综合地表径流调节率进行评估^[13]。

需求水平评估主要衡量城市主体期望的服务数值与品质^[14]。针对雨涝灾害,则体现为城市或居民期望减少的雨涝危险及损害。灾害系统三要素即危险性、暴露性、脆弱性决定了灾情灾损的大小^[15],因此,以此三要素作为评估框架准则层进行需求评估指标筛选。危险性在雨涝灾害中主要体现为致灾因子及孕灾环境造成的影响^[16-18],但在获取淹没范围时,已经综合孕灾环境中的地面高程及坡度影响,因此确定淹没范围为此项指标;暴露性指雨涝灾害中受雨涝影响的承灾体信息,可分为人口暴露、经济暴露两类子因子^[19],选取受灾人口、道路、建筑信息作为指标;脆弱性为承灾体承受雨涝灾害的能力^[8],因缺少人口年龄构成、车辆类型等相关数据,选择建筑结构灾损和室内财产灾损作为该项指标。

研究将层次分析法与熵权法结合,运用线性计算的方法^[20-21],确定综合指标权重(表 2)。

表 2 雨涝调节服务供需评估指标体系及权重

Table 2 Indicator system and weights for assessing the supply and demand of waterlogging regulation services

目标层 Objective	准则层 Criterion	子准则层 Sub-criterion	指标层 Indicator	层次分析法权重 Hierarchical analysis weight	熵权法权重 Entropy weight	最终权重 Final weight	指标性质 Nature of the indicator
供给 Supply	调节地表径流能力	—	地表径流调节率	—	—	1	正向
需求 Demand	危险性(H)	降雨	淹没范围	0.36	0.14	0.22	正向
	暴露性(E)	人口暴露	受灾人口	0.17	0.16	0.17	正向
		经济暴露	受灾道路长度	0.19	0.15	0.10	正向
			受灾建筑面积	0.09	0.11	0.16	正向
	脆弱性(V)	经济脆弱	建筑结构灾损	0.10	0.26	0.20	正向
			室内财产灾损	0.08	0.18	0.14	正向

2.3.2 生态水文调节服务下雨涝供给能力评估方法

因《室外排水设计规范(2016 版)》(GB 50014—2006)规定,石家庄中心四区所属的特大城市中心城区雨水管渠设计重现期为 3—5a,内涝防治设计重现期为 50—100a。因此,研究将选取 3a 一遇与 50a 一遇降雨量分别对石家庄市中心四区雨涝供需能力进行评估分析。

研究依据《石家庄市暴雨强度公式(2013 年修订)》得出重现期为 3a 及 50a 的单位时间平均降雨深度。公式如下:

$$q = \frac{2676.342(1 + 0.886\lg P)}{(t + 13.45)^{0.807}} \quad (P = 3) \quad (1)$$

$$q = \frac{1800.427(1 + 0.812\lg P)}{(t + 9.911)^{0.691}} \quad (P = 50) \quad (2)$$

$$q = \frac{10000 \times 1000i}{1000 \times 60} = 167i \quad (3)$$

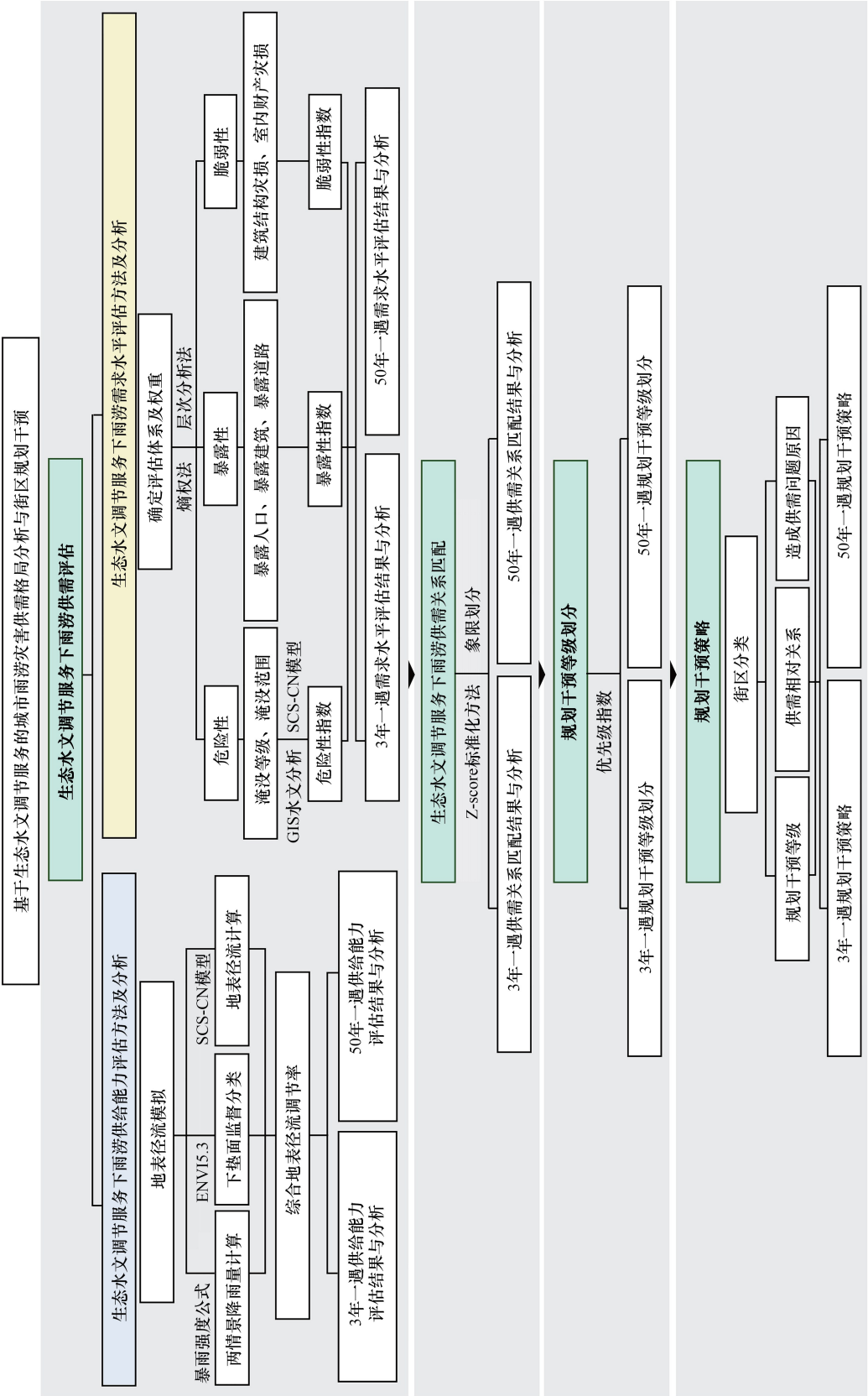


图2 研究技术路线
Fig.2 Research technical route

$$H = t \times i \quad (4)$$

其中, q 为设计暴雨强度 ($L s^{-1} hm^{-2}$); P 为重现期 (a); t 为降雨历时 (120min); i 为暴雨强度 (mm/min); H 为单位时间平均降雨深度 (mm)。

计算得出 3a 重现期单位时间 (120min) 平均降雨深度为 52.95mm, 50a 重现期的为 107.18mm。

而后, 运用 ENVI 对研究区遥感影像进行下垫面监督分类, 识别建设用地、草地、裸地、林地、耕地、水域六类结果^[22-23]。同时对径流曲线模型 (Soil Conservation Service Curve Number, 简称 SCS-CN) 进行简化^[24-25], 综合考虑土壤类型、湿度影响, 参考美国工程手册、我国经验值及石家庄实际情况, 确定各下垫面对应的 CN 值 (表 3)。根据街区内面积占比, 确定不同下垫面的 CN 值权重, 采用加权法计算各街区综合 CN 值, 对街区进行 3a、50a 情景下的地表径流量计算。公式如下:

$$CN = CN_1 \times a_1 + CN_2 \times a_2 + CN_3 \times a_3 + CN_4 \times a_4 + CN_5 \times a_5 + CN_6 \times a_6 \quad (5)$$

$$Q = \frac{(P_h - 0.2S)^2}{(P_h + 0.8S)} \quad (6)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

其中, CN_1 、 CN_2 、 CN_3 、 CN_4 、 CN_5 、 CN_6 为建设用地、草地、裸地、林地、耕地、水域对应的 CN 值; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 为六类下垫面分别在街区内的面积占比; Q 为地表最大径流量 (mm); S 为径流产生前的潜在的入渗量 (mm); CN 为街区综合 CN 值; P_h 为降雨量 (mm)。

表 3 不同下垫面类型及土壤类型 CN 值^[25]

Table 3 CN values for different subsurface types and soil types

下垫面类型 Type of underlayment	砂土、壤质砂土、 砂质壤土 Sandy soil, loamy sand soil, sandy loam	壤土、粉砂壤土 Loam, silt loam	砂黏壤土 Sandy clay loam	黏壤土、粉砂黏壤土、 砂黏土、粉砂黏土 Clay loam, caly silty loam, sand clay, silty clay
建设用地 Building land	77	86	91	94
草地 Grassland	30	58	71	78
裸地 Bare ground	77	86	91	94
林地 Woodland	32	58	72	79
耕地 Farmland	67	78	85	89
水域 Water	98	98	98	98

CN: 径流曲线数 Curve Number

同时, 将下垫面径流量计算结果带入公式, 计算地表径流调节率^[26]。公式如下:

$$C = \Delta v \times (0.001 \times P_h \times A)^{-1} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta v = \sum_{i=1}^n 0.01 \times (Q_i - Q_n) \times A_i \quad (9)$$

其中, C 为地表径流调节率, 即雨涝调节服务供给评价结果; Δv 为地表径流调蓄量 (mm); P_h 为降雨量 (mm); A 为研究单元面积 (m^2); Q_i 为不透水面的地表径流量 (mm); Q_n 为下垫面实际地表径流量 (mm); A_i 为像元面积 (m^2)。

对生态水文调节服务下雨涝供给能力及后续需求水平评估结果进行等级划分, 采用自然断点法, 分为高、较高、中、较低、低五个等级。为探寻供给能力、需求水平与城市空间的相关性^[27], 研究选用 GeoDa 软件对供给及后续需求评估结果进行分析。

2.3.3 生态水文调节服务下雨涝需求水平评估方法

(1) 危险性评估

运用 GIS 水文分析 D8 算法对石家庄中心四区进行淹没模拟, 计算过程不考虑上游来水及下游排水顶托等对研究区河流沟渠的影响。基于 DEM 与街区尺度数据生成 147 个汇水分区, 根据 SCS-CN 模型计算各汇

水分区地表径流量。结合《室外排水设计标准》(GB50014—2021),将石家庄中心四区排水管网排水能力概化为 1a 一遇。最终,计算出汇水分区雨涝积水量,即地表径流量与城市排水管网排水量的差。利用等体积法计算各汇水分区的雨水高度^[28],生成研究区 3a 一遇、50a 一遇淹没范围。

考虑雨涝对城市的实际影响及《城镇内涝防治技术规范》(GB51222—2017)内容,对淹没深度 D 进行等级重分类并赋予相应权重:去掉 $0 < D \leq 15\text{cm}$ 深度,划分 $15\text{cm} < D \leq 30\text{cm}$ 为一级、 $30\text{cm} < D \leq 45\text{cm}$ 为二级、 $45\text{cm} < D \leq 60\text{cm}$ 为三级、 $D > 60\text{cm}$ 以上为四级,分别赋予 0.2、0.4、0.6、0.8 权重值。以街区内淹没深度等级及淹没范围计算危险性指数,公式如下:

$$H = \sum_{i=1}^4 a_i(u_k) \times t \quad (c = 1, 2, 3; t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) \quad (10)$$

$$a_i(u_k) = \frac{b_i(u_k)}{X_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2, 3, \dots, 362) \quad (11)$$

其中, H 为淹没危险性指数; t 为淹没深度权重; $a_i(u_k)$ 为研究单元 k 内淹没等级 i 的淹没面积占研究区内该暴露等级总淹没面积的比例; i 为暴露等级; $b_i(u_k)$ 为研究单元 k 内淹没等级 i 的淹没面积(m^2); X_i 为淹没等级 i 总淹没面积(m^2)。

(2) 暴露性评估

暴露性评估方法参考权瑞松提出的暴雨内涝灾害暴露性指数计算方法^[29],通过淹没深度进行暴露等级划分,确定等级及权重方法与危险性评估中的方法相同。综合决定灾害暴露性的人口、建筑、道路指数均通过相似公式计算。公式如下:

$$E_c = \sum_{i=1}^4 g_i(u_k) \times t \quad (c = 1, 2, 3; t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) \quad (12)$$

$$g_i(u_k) = \frac{f_i(u_k)}{C_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2, 3, \dots, 362) \quad (13)$$

其中, E_1 、 E_2 、 E_3 分别为人口、建筑、街道暴露性指数; t 为淹没深度权重; $g_i(u_k)$ 各指标分别对应的研究单元 k 内暴露等级 i 人口占该暴露等级总人口、建筑面积占该暴露等级总建筑面积、道路长度占该暴露等级总道路长度的比例; i 为暴露等级; $f_i(u_k)$ 为各指标对应的研究单元 k 内暴露等级 i 人口数(人)、建筑面积(m^2)、道路长度(m); C_i 为各指标分别对应的暴露等级 i 总人口数(人)、总建筑面积(m^2)、总道路长度(m)。

(3) 脆弱性评估

评估过程选用澳大利亚 ANUFLOOD 建筑结构水深—损失率曲线公式、李慧提出的石家庄市内涝灾害的居住建筑室内财产灾损曲线^[30]及仓储、公建、工商业建筑室内财产灾损曲线公式。公式如下:

$$y_a = 0.006 x^3 - 0.032 x^2 + 0.169x + 0.041 \quad (14)$$

$$y_{b1} = -0.16645 x^2 + 0.8494x - 0.06747 \quad (15)$$

$$y_{b2} = 1.2 \times (-0.16645 x^2 + 0.8494x - 0.06747) \quad (16)$$

其中, y_a 为建筑结构脆弱性灾损率; y_{b1} 为住宅室内财产涝灾灾损率; y_{b2} 为商业建筑、工业仓储、公共建筑室内财产涝灾灾损率; x 为淹没水深(m)。

基于街区尺度,将上述两因子灾损率结果分别进行等级划分并赋予权重: $0 < y \leq 20\%$ 为一级、 $20\% < y \leq 40\%$ 为二级、 $40\% < y \leq 60\%$ 为三级、 $y > 60\%$ 为四级,并分别赋予权重 0.2、0.4、0.6、0.8。计算建筑结构脆弱性指数、建筑室内财产脆弱性指数,计算公式如下:

$$V_i = \sum_{j=1}^4 m_j(u_k) \times l \quad (i = 1, 2; l = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) \quad (17)$$

$$m_j(u_k) = \frac{n_j(u_k)}{D_j} \quad (j = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2, 3, \dots, 362) \quad (18)$$

其中, V_1 、 V_2 为建筑结构脆弱性指数、建筑室内财产脆弱性指数; $m_j(u_k)$ 为研究单元 k 内灾损率 j 等级建筑基底面积占该暴露等级总建筑基底面积的比例; j 为灾损率等级; $n_j(u_k)$ 为研究单元 k 内灾损率 j 等级建筑基底

面积(m^2); D_j 为灾损率 j 等级总建筑基底面积(m^2)。

(4) 生态水文调节服务下雨涝需求水平评估

通过以上研究计算获得的影响因子指数,代入各影响因子权重,对最终的雨涝调节服务需求水平进行评估。公式如下:

$$R = 0.25H + 0.17E_{1+} + 0.17E_{2+} + 0.10E_3 + 0.18V_1 + 0.13V_2 \quad (19)$$

其中, R 为雨涝调节服务需求评价结果; H 、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 V_1 、 V_2 为危险性、暴露性、脆弱性对应的各项指标评价结果。

2.3.4 街区单元雨涝供需匹配方法

评估结果表征的是空间上的供需关系,因此,研究将供给与需求评估结果以 Z -score 方法进行标准化处理,对计算结果进行象限划分^[31-33],直观体现雨涝调节供需关系匹配特征。公式^[34]如下:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (20)$$

其中, z 为供给、需求各自对应的标准化结果; μ 为数据均值; σ 为数据标准方差; x 为个体数据值。

2.3.5 街区规划干预等级划分方法

为城市规划防涝提供科学依据,研究引入优先级指数^[35-36],以需求水平与供给水平的比值关系判定街区防涝规划干预等级,指数结果与规划干预等级呈负相关。运用自然断点法将优先级指数对应的街区单元划分为规划干预一至五级,其中,一、二级为低等级干预街区,三级为中等等级干预街区,四、五级为高等等级干预街区。优先级指数计算公式如下:

$$P_r = \frac{R}{C} \quad (21)$$

其中, P_r 为优先级指数结果; R 为雨涝调节服务供给评价结果; C 为雨涝调节服务需求评价结果。

3 结果与分析

3.1 生态水文调节下雨涝供给能力与需求水平评估分析

3.1.1 生态水文调节服务下雨涝供给能力评估分析

评价结果显示(图3),两情景下雨涝供给能力在空间分布上具有较强的一致性。供给能力较高、高等级的街区在中心四区西北部较为突出且集中。3a 一遇情景下较低、低等级的街区集中于中心四区东北部及中部;50a 一遇情景下则蔓延至中心四区中部、东部、南部、西部大片区域。供给能力较高、高等级的街区基本特征为城镇化率、地面硬化率较低、生态空间占比高,而在城镇化率高的中部少量高供给街区,内部均有面积较大的面状或带状绿地。中心四区东北部街区虽生态环境较好,但受土壤下渗能力弱影响,供给能力在两情景下均为低值;中部街区则主要受城镇化开发影响,下垫面硬化率高,街区内部雨水难以下渗,供给能力在两情景下呈现低值且集中成片。此外两重现期情景对比可知(图4),各街区的 3a 一遇供给能力均高于 50a 一遇供给能力。其中,中心四区西北部、东南部差值明显较大,原因为两片区绿地率较高,由植被覆盖的下垫面的地表径流调节率在强降雨时反而会下降。

两重现期下供给评估的空间自相关分析结果呈现出一致性,因此本研究以 3a 一遇结果为例进行分析。雨涝调节服务供给能力在城市空间内 Moran's I 指数为 0.486,空间正相关性较强,由 Lisa 聚集图(图5)可知,代表高供给能力街区集中的高-高聚集片区,主要分布于中心四区西北部。代表低供给能力街区集中的低-低聚集片区,主要分布于中心四区东北部及中部四区交界处。其中,东北部片区形成原因为该片区土壤下渗率整体偏低,生态空间的雨水调节能力弱;中部片区由于其属于中心四区核心区域,包括解放广场、中央商务区、高密度住宅区等,开发量大、用地硬化严重,导致片区内街区供给能力普遍较低。

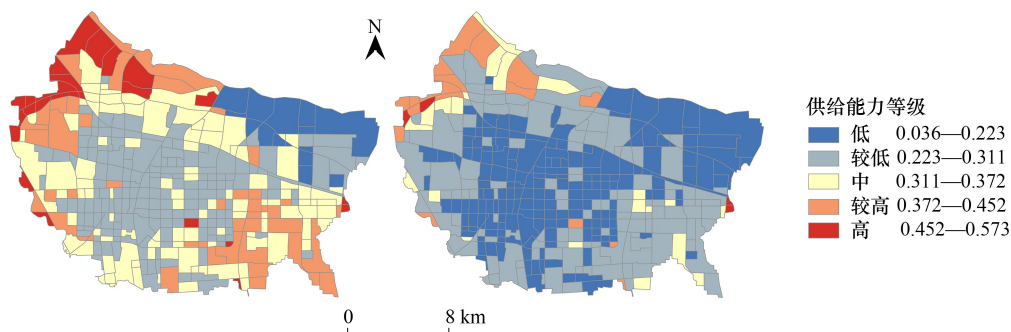


图3 3a、50a 一遇街区尺度雨涝调节服务供给能力评估结果

Fig.3 Results of the assessment of the capacity to supply waterlogging regulation services at the 3-year and 50-year block scale

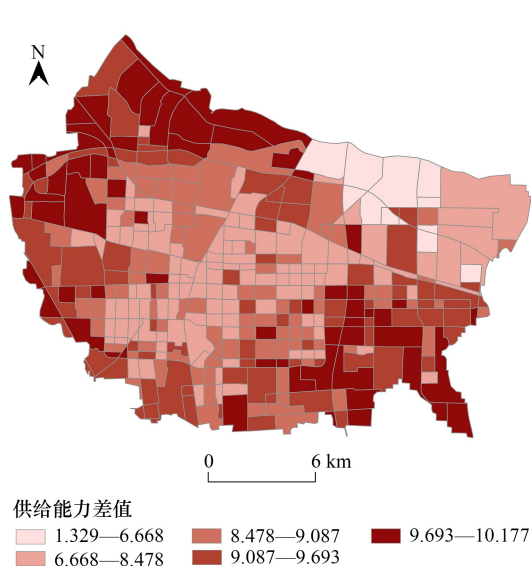


图4 3a、50a 一遇街区尺度雨涝调节服务供给能力差值

Fig.4 Difference in capacity to supply waterlogging regulation services at the block scale of 1 in 3 years versus 1 in 50 years

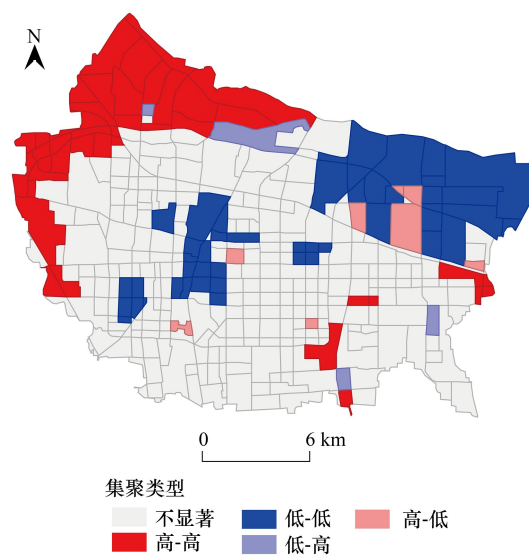


图5 3a 一遇街区尺度雨涝调节服务供给能力 LISA 集聚图

Fig.5 LISA clustering map of 50-year block-scale rainfall and flood regulation service supply capacity

LISA: 空间联系的局部指标

3.1.2 生态水文调节服务下雨涝需求水平评估分析

将 3a、50a 的雨涝淹没情景模拟结果与实际历史淹没数据进行对比,二者重合度较高。故基于模拟结果,对生态水文调节服务下雨涝需求水平进行评估。

结果(图 6)可知,在两情景下均为较高或高需求的街区位于:桥西区西北部、东北部、长安区中部、裕华区南部。造成上述街区需求高的原因为:内部多有闲置地或汽车园等类型园区,地面坑洼不平,雨涝情景下街区内积水深、面积大,且园区内建筑密度高,雨涝过程中建筑结构、室内财产等灾损严重,综合导致街区需求提升。在 50a 一遇较 3a 一遇情下,需求显著提升的街区位于:新华区北部及东南部、桥西区中部、长安区中部、裕华区东北部。其中,因滹沱河流经新华区北部,岸线周边地势平整度较低,滩涂凹陷面积较大、较深,虽承灾体密度不高,但极端降雨后在低洼处的积水面积、深度大幅增加,最终导致该片区内街区需求显著提升;新华区东南部、桥西区中部因内部住宅密集、人口密度大,导致内部街区需求水平较高;其余街区需求增加的主要原因为铁路、废弃工厂坐落于街区中,其内部地势低洼,在极端降雨情况下,积水点个数、积水高度增加,进而需求提升。

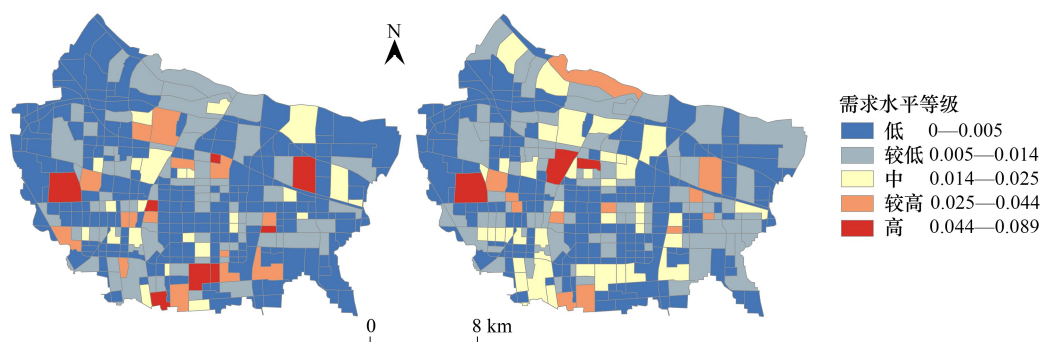


图6 3a、50a一遇街区尺度雨涝调节服务需求评估结果

Fig.6 Results of the assessment of the capacity to demand waterlogging regulation services at the 3-year and 50-year block scale

3a一遇情景下, Moran's I 指数仅为 0.061, 空间相关性不明显。50a一遇情景下, Moran's I 指数为 0.098, 空间相关性较 3a一遇有所上升, 因此对该情景 Lisa 聚集图(图 7)进行分析, 代表低需求水平街区集中的低-低聚集街区, 主要分布于中心四区西部。代表高需求水平街区集中的高-高聚集的街区, 主要分布于中心四区西部及中部。其中, 西部高-高聚集片区形成原因为其内部居住区连片现象明显, 人口集中, 承灾体暴露性强; 中部高-高聚集片区因横纵铁路线在其间穿过, 铁路两侧及闲置地内部的低洼空间连续性强, 淹没范围大, 最终导致需求水平整体偏高。

3.2 街区单元雨涝供需匹配分析

由供需匹配结果(图 8)可知, 3a一遇情景下, 高供高需、高供低需、低供高需、低供低需街区占比分别为 10.77%、28.73%、17.68%、42.82%, 问题突出的低供高需街区在空间分布上形成点状聚集, 在新华区赵陵铺路、宁安街道、桥西区南长、彭后街道、长安区建北、长丰街道处较为明显; 50a一遇情景下, 四类街区占比分别为: 13.26%、25.41%、19.34%、41.99%, 低供高需街区在京广铁路沿线呈现纵向聚集形态, 在新华区赵陵铺路、石岗、宁安街道、长安区建北、长丰街道区域内连续性较强、范围较大。

在两种情景下, 低供高需街区均集中出现于新华区与长安区交界处、桥西区南长、彭后街道, 原因主要为京广铁路线穿过其内部, 铁路及周边建设年代较早, 缺少绿地空间, 无论降雨量大小, 生态水文调节雨涝供给能力均为较低水平, 且铁路两侧地势较低, 承灾体密集, 需求水平相应较高。将两种匹配结果对比可知, 50a一遇较 3a一遇情景下, 供给显著降低、需求显著升高的街区主要分布于四区交界处、长安区东北部, 前者主要由于内部商业、商务、居住用地较多, 缺乏绿地, 建筑、人口密度大, 在极端降雨情况下, 街区内生态系统径流调节率降低, 受灾建筑面积及人口显著提升, 因此供需不匹配程度增强; 后者虽承灾体密度低, 但主要由于土壤下渗率及植被配置问题, 裸地及耕地占比较大, 严重影响极端降雨情况下的供给能力。

3.3 街区防涝规划干预等级划分及策略

如图(图 9)所示, 3a一遇情景下, 规划干预高等级街区集中于桥西区苑东、彭后、东华街道、长安区长丰、建北街道、裕华区裕翔、建华南街道。规划干预中等级主要分布于新华区东部、桥西区西南部、裕华区南部等,

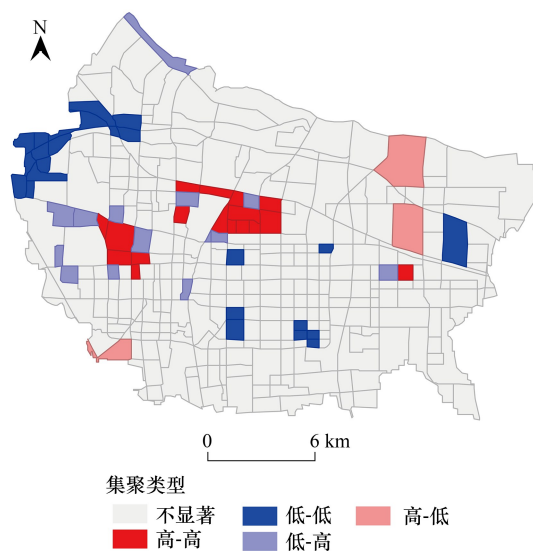


图7 50a一遇街区尺度雨涝调节服务需求 LISA 聚集图

Fig.7 LISA clustering map of 50-year block-scale rainfall and flood regulation service demand capacity

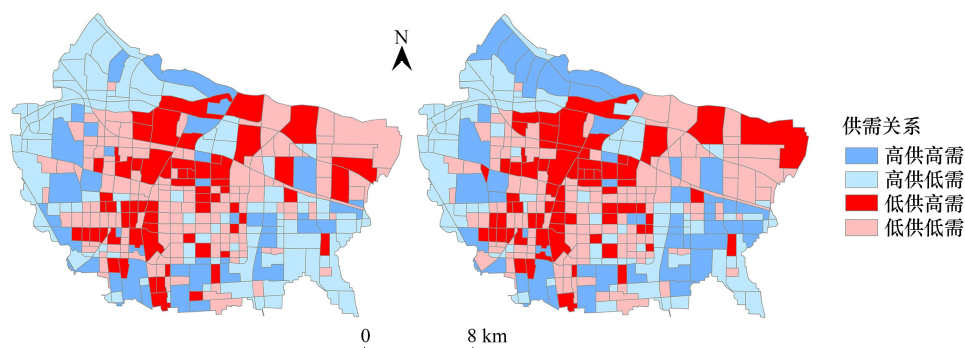


图8 3a、50a一遇街区尺度雨涝调节服务供需匹配结果

Fig.8 Results of matching supply-demand for 3-year and 50-year block-scale waterlogging regulation services

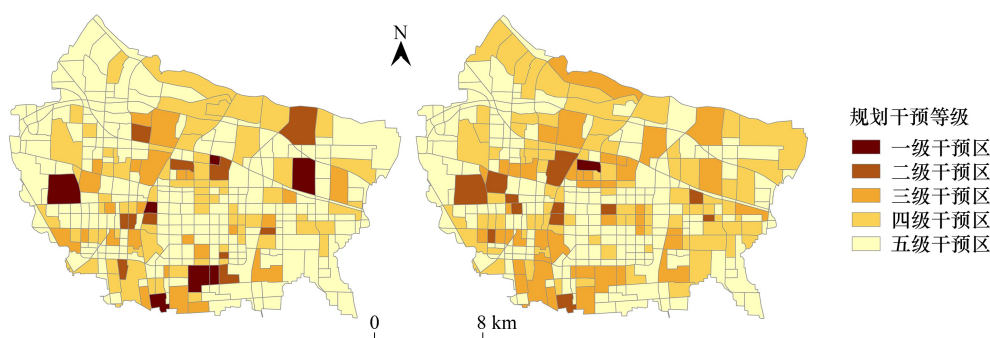


图9 3a、50a一遇街区尺度规划干预等级划分结果

Fig.9 Results of the 3-year and 50-year block-scale planning intervention levels

规划干预低等级成片分布于新华区西北部、长安区东北部、裕华区东南部及西北部。

50a一遇情景下,规划干预高等级街区集中于新华区宁安、西苑街道、桥西区苑东、维明街道、长安区建北街道。规划干预中等级主要分布于新华区东部、桥西区南部、长安区东部及裕华区南部。规划干预低等级主要成片分布于新华区西北部、桥西区西部及裕华区中部。

将两种匹配结果对比可知,在两种情景下,规划干预高等级街区均集中出现于桥西区苑东、彭后街道、长安区建北、东华街道、裕华区裕翔街道,应作为规划干预重点街区。

因规划干预低等级街区反映出的雨涝问题较弱,本研究对规划干预中、高等级街区提出针对性规划策略。规划干预中、高等级街区均为供给能力无法达到需求水平的街区,因此,基于规划干预等级、供需相对关系及供需不匹配原因,最终将街区划分为下文九大类(图10),并根据3a一遇、50a一遇两雨涝情景提出差异性策略:

(1) 高等级—土壤导致低供特征明显街区

该类街区内部耕地、草地面积普遍占比较大,但土壤粘性强,雨水难以下渗。3a一遇情景下,应在保障生态空间占比的情况下,优化生态系统结构,丰富植被种类,提升土壤保持能力,从而提升街区供给能力。50a一遇情景下无该类街区。

(2) 高等级—硬质下垫面导致低供特征明显街区

多分布于中心四区核心位置,开发建设量较大,街区内缺少生态空间,雨水处理能力弱,且该类街区与周边低供给街区聚集度较高。3a一遇情景下,应加强绿色基础设施建设,降低不透水面的连续性,使绿色基础设施在相邻街区之间形成网络;还应完善灰色基础设施的建设,通过管网、蓄水装置等将未下渗的地表径流及

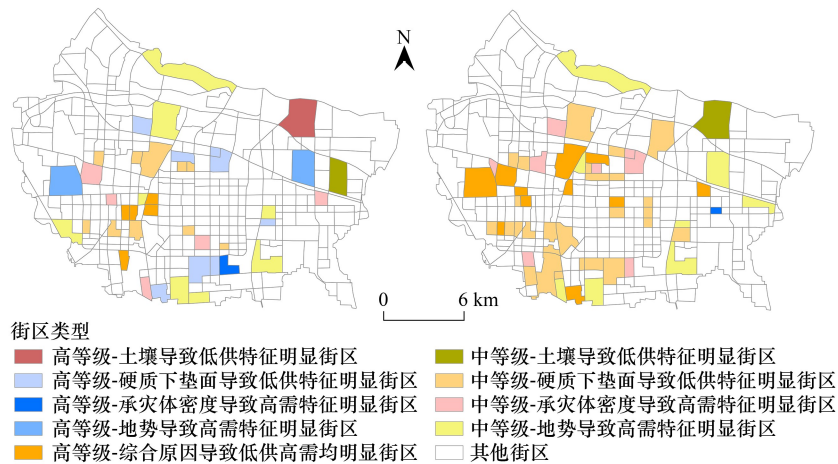


图 10 3a、50a 一遇规划干预街区类型

Fig.10 Classification of blocks for 1 in 3 years and 1 in 50 years planning interventions

时疏散到相邻的较高供给等级街区,以避免造成大面积连续街区的财产安全损失。50a 一遇情景下无该类街区。

(3) 高等级—承灾体密度导致高需特征明显街区

该类街区内人口、建筑等承灾体密集。3a 一遇情景下,应借助现有承灾体,在街区内增加低影响开发雨水管理设施,通过建筑屋顶、路面、植草沟等,将雨水引入绿地或街区周边人工渠。50a 一遇情景下,人口及建筑高密度聚集区应增强路面雨水引、导流功能,增加或增强绿地等公共空间及其蓄滞水能力,亦可增建大型蓄滞水设施,形成街区联动减轻街区内部承灾压力。

(4) 高等级—地势导致高需特征明显街区

街区内有闲置地或未开发完全的园区,地面平整度不足,坑洼较多,易出现雨涝积水。3a 一遇情景下,应平整闲置地及园区土地,进行合理的竖向规划,并联合街道对闲置地开展“四小园”建设,充分利用开放空间的承灾功能。50a 一遇情景下无该类街区。

(5) 高等级—综合原因导致低供高需均特征明显街区

该类街区综合前文街区二至四种特征。3a 一遇情景下,该街区应综合上述 3a 一遇策略的基础上,增强防涝工程措施与公共空间韧性承涝系统、防洪系统等的多维联动提高道路行泄能力,构建街区间的高效排涝联动通道,为低供高需街区向相邻的低供低需或高供低需街区疏散雨涝压力提供空间,并减轻地下管网压力。50a 一遇情景下,在综合前文 50a 一遇策略的基础上,分期对排水设施进行修复、更换与提升改造,适当优化布置泵站及大型蓄滞设施,优化管网设计。

(6) 中等级—土壤导致低供特征明显街区

街区内裸地面积较大,滹沱河岸线南侧滨河绿带目前尚未建设完全,裸露的粘性土壤供给能力较差。3a 一遇情景下,优化岸线的生态服务能力,对现存林地进行保护及适当扩大范围。50a 一遇情景下,借助城市内现有人工渠民心河与滹沱河形成的蓝色网络^[37],构建滹沱河生态岸线,增加树木种植,平日作为城市休闲游憩空间,极端雨涝情景下,岸线周边绿地进行储水蓄水,实现平灾结合。

(7) 中等级—硬质下垫面导致低供特征明显街区

街区内部多为老旧小区,绿地率严重不足,此类街区在 50a 一遇情景下连续性较强。3a 一遇情景下,改造街区下垫面结构,在街区内见缝插绿,增强绿地斑块数量及形态,运用透水铺装改造硬质地面。50a 一遇情景下,因民心河三条支流多流经此类街区,且位于中心四区建设量较高的核心位置,可在雨涝发生前,预降河道水位,扩大调蓄容积,结合管网实现排水通畅,避免此类街区相邻造成的大面积雨涝问题。

(8) 中等级—承灾体密度导致高需特征明显街区

街区内多为人口密度大的新建小区,道路布置多为窄路密网,雨涝灾害暴露性较强。3a 一遇情景下,应对路面进行改造,加强其透水性,利用窄路密网的排水管网优势,结合智慧系统进行管网实时监控。50a 一遇情景下,在易涝建筑周边增加蓄水设施或调整用地高程,确保极端降雨情况下,雨水实现及时蓄滞。

(9) 中等级—地势导致高需特征明显街区

除部分街区内部闲置地坑洼较多外,多数街区内有铁路或废弃工厂,导致地势较低,形成积水连续且面积较大。3a 一遇情景下,对铁路线周边及废弃铁路工厂进行更新,调整地面高度的同时,增加其观赏游览价值。50a 一遇情景下,结合地形设置蓄水池、蓄水景观^[38],利用线性绿地将超出蓄存能力的雨水输送至就近的河流湖泊,与周边街区共同构建城市雨水廊道。

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究借用生态系统服务供需关系评估思路,结合多种供需评估方法,对石家庄市中心四区生态水文调节服务雨涝供需关系进行探究,充分考虑了城市原生生态对于地表径流调节的贡献及自然、人口、经济等方面面临雨涝灾害时对水文调节服务的期望,为优化城市生态水文调节服务能力提供技术路径参考。

研究是针对两种降雨情景进行的供需匹配,结果凸显了明显的时空异质性,与现有石家庄雨涝相关研究成果^[10,39]及《石家庄城市排水防涝综合规划(2014—2020)》中雨涝现状评估结果较为一致,证实了研究的可靠性。此外,研究清晰地判定出规划干预等级,从而生成对应干预强度的策略,为进一步制定专项规划、城市设计等提供研究依据,弥补城市防涝规划前期的量化分析研究支撑性不足,促进城市安全健康发展。

研究仍存在以下局限:需求评估前运用的水文分析 D8 算法是以现状地形为基础将进行淹没可视化,节约了城市管网构建、修正时间,但削弱了城市雨涝场景的复杂性,后续研究可结合高精度雨涝模拟技术对微观街区尺度雨涝情景进行深入分析,提高规划科学性。此外,在供需评估中,研究采用指标指数进行评估,未对供需进行数量的直接匹配,仅可在宏观尺度进行关系识别,下一步应对供需内在关系进行探究,探寻供需关系实质定量分析方法。

4.2 结论

本文基于遥感、地形、气象、社会经济等类型数据,构建了基于生态水文调节服务的城市雨涝灾害供需评估体系,并对石家庄市中心四区街区尺度城市空间进行雨涝调节供需水平分析、匹配,在此基础上进行了规划干预分级,提出了分类规划应对策略,为城市雨涝规划防控提供依据。研究主要结论如下:

(1) 供需匹配结果显示,3a 一遇情景与 50a 一遇情景下各供需类型占比有变化但并不突出,而空间分布上却存在明显差异,其中 3a 一遇情景下低供高需街区在空间分布上呈现明显点状聚集;50a 一遇情景下则在京广铁路沿线呈现纵向聚集形态。此外在两种情景下,低供高需街区均集中出现京广铁路沿线街区。除地形原因外,铁路沿线尤其西侧为老城区,市政设施与绿地系统薄弱、建设密度较大,铁路防护绿地宽度较窄。因此,在城市建设过程中应关注老城区及铁路等特殊地区的雨涝疏解。

(2) 3a 重现期下,规划干预高等级街区集中于桥西区苑东、彭后、东华街道、长安区长丰、建北街道、裕华区裕翔、建华南街道;50a 重现期下,集中于新华区宁安、西苑街道、桥西区苑东、维明街道、长安区建北街道。可见,不同降雨情景下呈现出不同的空间分布及雨涝成因特征,应在后续规划管理过程中充分考虑同一街区不同降雨强度下雨涝灾害的差异化防控。

(3) 城市规划可通过生态用地修复、蓝绿网络构建、绿色基础设施增设等途径提高供给能力,或通过土地功能优化、管网设施能力提升等方式降低需求水平,实现单元针对性防涝干预。

参考文献 (References):

- [1] 吕一河,胡健,孙飞翔,张立伟. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.

- [2] 孙倩莹, 高艳妮, 张林波, 王昊, 李凯. 基于土地利用的厦门市生态水文调节服务评估. 环境科学研究, 2019, 32(1): 66-73.
- [3] 刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究——以嘉兴市为例. 生态学报, 2019, 39(4): 1189-1202.
- [4] 金荷仙, 王磐岩, 中国风景园林学会女风景园林师分会, 《中国园林》杂志社有限公司. 中国风景园林学会女风景园林师分会 2022 年会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 11.
- [5] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. Ecological Indicators, 2012, 21: 67-79.
- [6] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. Ecological Indicators, 2014, 38(3): 198-211.
- [7] 朱文彬, 孙倩莹, 李付杰, 高艳妮, 张林波. 厦门市城市绿地雨洪减排效应评价. 环境科学研究, 2019, 32(1): 74-84.
- [8] 许萌, 董潇楠, 谢苗苗, 王玉, 全德. 基于承灾脆弱性与生态系统服务供需匹配的城市空间治理分区. 生态学报, 2021, 41(15): 6012-6023.
- [9] 孙琦. 太原市区生态环境需水量特征及水资源优化配置研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [10] 苑希民, 秦旭东, 张晓鹏, 封桂敏. 石家庄市暴雨内涝精细化水动力模型应用. 水利水运工程学报, 2017(3): 41-50.
- [11] 张春洋, 王家卓, 栗玉鸿, 胡应均, 范锦, 张彦平, 赵智, 范丹. 基于问题导向的海绵城市规划方案编制探讨——以石家庄市为例. 给水排水, 2020, 56(S1): 702-707.
- [12] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [13] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响. 生态学报, 2020, 40(16): 5525-5533.
- [14] Villamagna A.M, Angermeier P.L, Bennett E.M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.
- [15] 张会, 李铖, 程炯, 吴志峰, 吴艳艳. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(2): 175-190.
- [16] 唐清竹, 徐宗学, 王京晶, 陈浩, 杨芳. 深圳河流域城市洪涝风险分析. 水力发电学报, 2023, 42(6): 13-22.
- [17] 严志涛, 李谢辉, 刘子堂, 徐佳奥, 潘昱杉. 气候变暖背景下西南四省市暴雨洪涝灾害风险变化. 灾害学, 2021, 36(2): 200-207.
- [18] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 杨聪辉, 王峥, 黄婷, 马经广. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6, 17.
- [19] 吴舒祺, 赵文吉, 王志恒, 曹诗颂, 屈新原, 王颖, 李善飞. 基于 GIS 的洪涝灾害风险评估及区划——以浙江省为例. 中国农村水利水电, 2020(6): 51-57.
- [20] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 江东, N H Ravindranath, Atiq Rahman, Nyo Mar Htwe, Tartirose Vijitpan. 基于 AHP_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估. 地理研究, 2020, 39(8): 1892-1906.
- [21] 黄亦轩, 徐宗学, 陈浩, 杨芳. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析. 水资源保护, 2023, 39(1): 101-108.
- [22] 李鹏利, Muhammad Amir Siddique, 樊柏青, 黄华国, 刘东云. 下垫面覆盖类型变化对城市热岛的影响——以北京市朝阳区为例. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 99-109.
- [23] 温素馨, 韦玉春, 汪美会. TM 遥感图像 FLAASH 大气校正异常值的改正. 测绘科学, 2017, 42(7): 165-171, 177.
- [24] Yao L, Chen L D, Wei W, Sun R H. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 300-308.
- [25] Lian H S, Yen H, Huang J C, Feng Q Y, Qin L H, Bashir M A, Wu S X, Zhu A X, Luo J F, Di H J, Lei Q L, Liu H B. CN-China: revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. Water Research, 2020, 177: 115767.
- [26] 曹言, 王杰, 柴素盈, 戚娜. 昆明市区地表径流影响因子分析. 水土保持研究, 2019, 26(2): 139-144, 152.
- [27] 庄思冰, 龚建周, 陈康林, 李江涛. 粤港澳大湾区小型公园绿地生态系统文化服务的供需匹配特征. 生态学报, 2023, 43(14): 5714-5725.
- [28] 丁锶媛, 王宁, 倪丽丽, 曾坚. 基于 SCS-CN 与 GIS 耦合模型的闽三角城市群承灾空间淹没风险研究. 灾害学, 2022, 37(1): 171-177.
- [29] 权瑞松. 多情景视角的上海中心城区地铁暴雨内涝暴露性分析. 地理科学, 2015, 35(4): 471-475.
- [30] 李慧, 王昊, 李智, 刘子龙, 宋利祥. 居住建筑内涝灾害损失研究——以石家庄为例. 净水技术, 2022, 41(S2): 133-141.
- [31] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 王倩雯, 丁锶媛. 城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分. 生态学报, 2022, 42(2): 500-512.
- [32] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [33] 鄧宏宇, 张磊. 黄河流域生态系统服务供需匹配及生态管理分区研究. 环境污染与防治, 2023, 45(5): 730-735.
- [34] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Kong X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. Science of the Total Environment, 2019, 657: 781-791.
- [35] Maragno D, Gaglio M, Robbi M, Appiotti F, Fano E A, Gissi E. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. Ecological Modelling, 2018, 386: 1-10.
- [36] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 沈中健. 城市热环境调节服务供需失衡关键区识别与优先级划分. 地理研究, 2022, 41(11): 3124-3142.
- [37] 蒋祺, 郑伯红. 城市雨洪调蓄空间对洪涝灾害影响研究——以长沙市 2017 年洪涝灾害为例. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 29-38.
- [38] 倪丽丽, 曾坚, 张彦平. 基于精细模型的城市暴雨内涝规划应对——以石家庄局部城区为例. 城市发展研究, 2015, 22(6): 4-10.
- [39] 苑希民, 桑林浩, 秦旭东, 田福昌. 石家庄市不同类型下垫面措施下的空间抗涝效应. 水电能源科学, 2018, 36(11): 64-68.